

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Máster Universitario en Automatización y Telecontrol para la
Gestión de Recursos Hídricos y Energéticos**



**AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS
RESIDUALES**



TRABAJO FIN DE MASTER

AUTOR:

María Gyomar González González

DIRECTOR/ES:

Antonio Ruiz Canales
José Miguel Molina Martínez

Septiembre 2015

A mi hermano Fran,
por haber vuelto y traer consigo a Kevin

A mi Pichón,
por estar a mi lado y apoyarme en todo

A mis padres,
por todo lo que han hecho por mi

A mi tata,
en mi recuerdo siempre



Recursos necesarios para su realización
Ordenador, teléfono, artículos, publicaciones, libros, desplazamientos a EDARs, conexión a internet.
Descripción del trabajo propuesto
Este trabajo trata sobre diferentes casos de estudio de depuradoras de aguas residuales (EDAR), de las que se describen sus principales infraestructuras y se definen los diferentes puntos críticos de consumo energético existentes. A continuación, se proponen distintos tipos de medidas para mejorar la eficiencia energética y el ahorro, tanto energético como económico, explicando en qué consiste cada una de las medidas propuestas y cómo afectan a la mejora de la eficiencia energética y al ahorro.
Índice del Trabajo Fin de Máster
<ol style="list-style-type: none"> 1. Introducción. 2. Características de las EDAR. 3. Puntos críticos de consumo energético. 4. Medidas de ahorro y eficiencia energética en equipos e instalaciones. 5. Optimización de la factura eléctrica. 6. Valoración de las medidas de ahorro y eficiencia energética. 7. Metodología para auditoría energética. 8. Conclusiones. 9. Bibliografía.

EXPONE: Que estando matriculado en los estudios del **Máster Oficial en Automatización y Telecontrol para la gestión de recursos hídricos y energéticos** y cumpliendo los requisitos establecidos en la Normativa específica y demás Disposiciones vigentes es por lo que,

SOLICITA: Se autorice el índice del Trabajo Fin de Máster que acompaña a esta solicitud.

RESOLUCIÓN:

Favorable

Desfavorable

Motivación de la resolución (*en caso desfavorable*)

Orihuela, a de de 20 Fdo.: (*Director Máster*)

SR. D. ANTONIO RUIZ CANALES, DIRECTOR DEL MÁSTER OFICIAL EN AUTOMATIZACIÓN Y TELECONTROL PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y ENERGÉTICOS

Anexo V
MÁSTER OFICIAL EN AUTOMATIZACIÓN Y TELECONTROL
PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y
ENERGÉTICOS
REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Identificaciones:

Autor: María Gyomar González González

Título: Ahorro y Eficiencia Energética en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

Title: Energy Efficiency and Savings in Wastewater Treatment Plants

Director/es del TFM: Antonio Ruiz Canales y José Miguel Molina Martínez

Año: 2015

Titulación: Máster Oficial en Automatización y Telecontrol para la Gestión de Recursos Hídricos y Energéticos

Tipo de Trabajo: Trabajo Fin de Máster

Palabras claves: depuración, agua, ahorro, eficiencia, energía

Keywords: wastewater, water, saving, efficiency, energy

Nº citas bibliográficas: 75

Nº de planos: 0

Nº de tablas: 15

Nº de figuras: 58

Nº de anexos: 0

Resumen: Este trabajo trata sobre diferentes casos de estudio de depuradoras de aguas residuales (EDAR), de las que se describen sus principales infraestructuras y se definen los diferentes puntos críticos de consumo energético existentes. A continuación, se proponen distintos tipos de medidas para mejorar la eficiencia energética y el ahorro, tanto energético como económico, explicando en qué consiste cada una de las medidas propuestas y cómo afectan a la mejora de la eficiencia energética y al ahorro. De este modo se establece una propuesta metodológica de auditoría energética en EDARs y los resultados obtenidos en diversos casos de estudio según fuentes bibliográficas y experiencias particulares.

Abstract: This work discusses different studies of Wastewater Treatment Plants (WWTP), describing their main infrastructures and establishing their critical points related to energy consumption. We propose different measures to improve the energy efficiency of these WWTP, explaining how these actions could affect to energetic and economic savings. In this way, a methodological proposal of energy audit in WWTPs and several obtained results in case studies according to bibliography references and particular experiences is established.



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Máster Universitario en Automatización y Telecontrol para la
Gestión de Recursos Hídricos y Energéticos**



**AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS
RESIDUALES**

TRABAJO FIN DE MASTER

AUTOR:

María Gyomar González González

DIRECTOR/ES:

Antonio Ruiz Canales
José Miguel Molina Martínez

Septiembre 2015

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
2. CARACTERÍSTICAS DE LAS EDAR	10
3. PUNTOS CRÍTICOS DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	14
4. MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EQUIPOS E INSTALACIONES	18
4.1 PRIORIZACIÓN DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES COMO APOYO ENERGÉTICO.....	18
4.1.1 COGENERACIÓN	18
4.1.2 ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	20
4.1.3 ENERGÍA EÓLICA.....	23
4.1.4 ENERGÍA HIDRÁULICA.....	26
4.2 ACTUALIZACIÓN DE EQUIPOS POR MODELOS DE ALTA EFICIENCIA	28
4.2.1 EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE AIRE.....	28
4.2.2 MOTORES.....	37
4.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS GRUPOS DE BOMBEO	43
4.4 INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN EL ARRANQUE DE MOTORES	51
4.5 MEJORAS EN EL FACTOR DE POTENCIA DE LOS EQUIPOS	56
4.6 ACTUALIZACIÓN Y/O MEJORA DE LA INSTALACIÓN	60
4.6.1 TELEGESTIÓN	60
4.6.2 SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO PARA AIREACIÓN EN EL REACTOR BIOLÓGICO	62
4.6.3 ADECUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS A LA DEMANDA REAL DEL SISTEMA.....	69
4.6.4 MODULARIDAD DE LA INSTALACIÓN.....	71
4.6.5 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE EN EL REACTOR BIOLÓGICO	71
4.7 MEJORAS EN ILUMINACIÓN.....	74
4.7.1 APROVECHAMIENTO DE LA ILUMINACIÓN NATURAL	75
4.7.2 ADAPTACIÓN DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN.....	76
4.7.3 SUSTITUCIÓN DE LÁMPARAS Y LUMINARIAS.....	76
4.7.4 SUSTITUCIÓN DE REACTANCIAS ELECTROMAGNÉTICAS POR BALASTOS ELECTRÓNICOS EN LÁMPARAS FLUORESCENTES.....	77
4.7.5 CONTROL, GESTIÓN Y MANTENIMIENTO	78
4.8 PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE EQUIPOS E INSTALACIONES	78
4.8.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO GENERAL	79

4.8.2	MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO PREVENTIVO	80
4.8.3	MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO PREDICTIVO	81
4.8.4	MANTENIMIENTO METROLÓGICO.....	82
4.8.5	MANTENIMIENTO CORRECTIVO	82
4.8.6	MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO LEGAL O REGLAMENTARIO	82
4.8.7	MANTENIMIENTO DE EQUIPOS ESPECIALES CONTRATADO	82
4.9	GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS	83
4.10	OTRAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO	84
4.10.1	AUTOMATIZACIÓN DE LA DESODORIZACIÓN.....	84
4.10.2	SINERGIA DE COSUSTRATOS	86
4.10.3	EDAD DE FANGO.....	87
4.10.4	CALORIFUGADO DE LOS DIGESTORES	87
4.10.5	USO DEL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE DE VEHÍCULOS	88
4.10.6	CONCENTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE VARIAS POBLACIONES EN EDARS DE MAYOR TAMAÑO	90
4.10.7	OTRAS MEDIDAS.....	92
5.	OPTIMIZACIÓN DE LA FACTURA ELÉCTRICA.....	92
5.1	PLATAFORMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA	93
5.2	AJUSTE DE LA TARIFA CONTRATADA	96
5.3	AJUSTE DE LA POTENCIA CONTRATADA	101
5.4	CALIDAD DE SUMINISTRO	104
6.	VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA ..	106
7.	METODOLOGÍA PARA AUDITORÍA ENERGÉTICA	109
7.1	PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DE UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA	110
7.2	MATERIAL NECESARIO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	114
8.	CONCLUSIONES	117
8.1	MEDIDAS EN FUNCIÓN DEL COSTE DE INVERSIÓN	117
8.2	MEDIDAS EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DE AHORRO.....	123
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) (INIMA, 2011).	8
Figura 2. Esquema básico de una EDAR (Metcalf y Eddy, 1995).	11
Figura 3. Potencia requerida por unidad de tratamiento (IDAE, 2010).	16
Figura 4. Consumos eléctricos según tratamiento o servicio (González y Moreno, 2009).	16
Figura 5. Consumo eléctrico de EDAR El Prat (Barcelona) por sectores (Aguiló, Martínez y Curto, 2013).	17
Figura 6. Solución implantada en la EDAR Murcia Este (Murcia) (Schneider Electric, 2014).	19
Figura 7. Planta de cogeneración de la EDAR Murcia Este (Murcia) (Schneider Electric, 2014).	20
Figura 8. Placas Solares en la EDAR de Pilar de la Horadada (Alicante) (EPSAR, 2015).	22
Figura 9. Aerogenerador en la EDAR de Paterna (Valencia) (IVEM, 2015).	25
Figura 10. Aerogenerador de una de las EDAR de Ourense (Ourense) (Energética XXI, 2013).	26
Figura 11. Consumo medio diario en el periodo de trabajo con bombas turbocompresoras (ACA, 2011).	30
Figura 12. Evolución del consumo de energía del reactor biológico (ACA, 2011).	30
Figura 13. Esquema funcionamiento turbo levitación (Simón et al., 2012).	31
Figura 14. Sección turbo de levitación magnética (Simón et al., 2012).	32
Figura 15. Consumos eléctricos a distintos caudales para soplante de émbolos y compresor de levitación (Simón et al., 2012).	33
Figura 16. Ratio eléctrico por m³ de aire para soplante de émbolos y compresor de levitación (Simón et al., 2012).	33
Figura 17. Fases de la compresión interna entre los tornillos de la soplante (Simón et al., 2012).	34
Figura 18. Reducción del consumo eléctrico por la instalación de una soplante de tornillo (Simón et al., 2012).	35
Figura 38. Sustitución equipos de aireación en dos EDAR (Simón et al, 2012).	36
Figura 19. Clases de eficiencia energética actuales para motores de inducción de 50 y 60 Hz.	39
Figura 20. Potencia del motor frente al factor de carga (EEAE, 2015).	40
Figura 21. Comparativa del motor de eficiencia normal con el rendimiento standard, mejorado y alto rendimiento para un motor de 2 polos (EEAE, 2015).	42
Figura 22. Relaciones entre clases de eficiencia energética.	42
Figura 23. Métodos de control para la regulación de caudal de un sistema de bombeo (Díaz y Folgueras, 2012).	46
Figura 24. Ejemplo de arrancadores estáticos (Abadía et al., 2008).	52
Figura 25. Ejemplo de conexión de un variador de frecuencia.	53
Figura 26. Triángulo de potencias.	56
Figura 27. Ejemplo del cuadro de una batería de condensadores (Tessai, 2011).	59
Figura 28. Vista general del software de adquisición, supervisión y control de energía en la EDAR de Martorell (Barcelona) (ACA, 2013).	62
Figura 29. Gráficos de evolución del ratio eléctrico en EDAR Caravaca de la Cruz (Murcia) (Simón et al., 2012).	64

Figura 30. Gráfica de evolución de parámetros y ciclos del sistema NIPHO (Simón, Lardín y Abellán, 2012).	65
Figura 31. Gráfico evolución del ratio eléctrico (kWh·m⁻³) en la EDAR de Los Alcázares (Murcia), donde la parte final es ya con sistema NIPHO (Simón et al., 2012).	66
Figura 32. Gráfica de evolución de parámetros y ciclos del Sistema ACN+ (Simón et al., 2012).	67
Figura 33. Esquema ejemplo de funcionamiento de un sistema de aireación mediante lógica difusa o fuzzy (Empresa General Valenciana del Agua SA, EGEVASA, 2015).	69
Figura 34. Rendimiento de dos bombas en función del caudal impulsado (Simón et al., 2012).	70
Figura 35. Detalle de un disco difusor.	72
Figura 36. Ejemplo de un agitador.	73
Figura 37. Ejemplo de un agitador-aireador.	73
Figura 39. Efecto de la dosificación de ácido fórmico sobre el proceso de aireación (Simón et al., 2012).	80
Figura 40. Efecto del mantenimiento preventivo sobre el rendimiento de los equipos aireación (Simón et al., 2012).	81
Figura 41. Producción de gas en los digestores anaerobios (Fernández y Estévez, 2012).	86
Figura 42. Efecto del calorifugado de digestores (Torres y Martín, 2009).	88
Figura 43. Digestores calorifugados en la EDAR Murcia Este (Murcia) (CONAMA, 2014).	88
Figura 44. Esquema de limpieza del biogás (Martín y Moya, 2011).	89
Figura 45. Representación de las cantidades de metano y dióxido de carbono en % (Martín y Moya, 2011).	90
Figura 46. Ejemplo de aplicación en EDAR Murcia Este (Murcia) (Martín y Moya, 2011).	90
Figura 47. Consumo de energía en kWh·m⁻³ tratado (Albaladejo, 2014).	91
Figura 48. Distribución de los costes de la electricidad.	93
Figura 49. Distribución porcentual de los costes de explotación de una EDAR en el año 2012 (TecnoAqua, 2015).	97
Figura 50. Distribución porcentual actual de los costes de explotación de una EDAR. (TecnoAqua, 2015).	98
Figura 51. Ejemplo de curvas de demanda horaria de caudal (Albaladejo y Trapote, 2013).	99
Figura 52. Discriminación horaria tipo 3.1 A para 2015 (Cavo Energías, 2015).	100
Figura 53. Discriminación horaria tipo 6.1 para 2015 (Cavo Energías, 2015).	100
Figura 54. Cronograma de las etapas de una auditoría energética en EDAR.	111
Figura 55. Ejemplos de analizadores de redes.	115
Figura 56. Medición en cabecera de instalación.	115
Figura 57. Medición en cuadros secundarios o CCM's.	116
Figura 58. Ejemplo de caudalímetro ultrasónico portátil.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1995).	11
Tabla 2. Comparativa entre motores y microturbinas (Torres y Martín, 2009).	18
Tabla 3. Ahorro energéticos y económicos tras la sustitución por motores de alta eficiencia (Díaz y Folgueras, 2012).	43
Tabla 4. Calificación de la eficiencia energética de los bombeos (EEAE, 2015).	51
Tabla 5. Consignas de N-NH4 para cada periodo de tarifa eléctrica (Simón et al., 2012). ..	66
Tabla 6. Consumos específico estándar de diferentes tecnologías de depuración de aguas residuales (Velázquez et al., 2006).	72
Tabla 7. Comparativa entre lámparas de uso industrial (EEAE, 2015).	76
Tabla 8. Diferentes elementos de alojamiento de una lámpara (EEAE, 2015).	77
Tabla 9. Términos de potencia y energía de las tarifas de acceso en AT 3.1 A y 6.1 vigentes desde el 1 de abril de 2012.	101
Tabla 10. Valores de Ki según el periodo tarifario.	102
Tabla 11. Precios de la energía reactiva vigentes.	104
Tabla 12. Medidas con bajo coste de inversión.	119
Tabla 13. Medidas con coste de inversión medio.	120
Tabla 14. Medidas con elevado coste de inversión.	122
Tabla 15. Medidas en función del potencial de ahorro.	123



ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ADEX: Control Adaptativo Predictivo Experto.

AMEB: Proceso de obtención de combustible para vehículos a través de biogás.

APPA: Asociación de Productores de Energías Renovables.

AT: Alta Tensión.

BT: Baja Tensión.

CCM: Cuadro de Control de Motores.

CEMEP: European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics.

CONAMA: Congreso Nacional del Medio Ambiente.

COV's: Compuestos Orgánicos Volátiles.

CT: Centros de Transformación.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

DB HE: Documento Básico de Ahorro de Energía.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

EDARs: Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

EEB: Eficiencia Energética de los Bombeos.

EGEVASA: Empresa General Valenciana del Agua SA.

EMASESA: Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla SA.

EPSAR: Entidad de Saneamiento de Aguas de la Comunidad Valenciana.

ESAMUR: Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia.

ESF: Energía Solar Fotovoltaica.

ESHA: European Small Hydropower Association.

ETAP: Estación de Tratamiento de Agua Potable.

GENCAT: Generalitat de Catalunya.

He: Habitante equivalente.

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

IEC: International Electrotechnical Commission.

ITC-BT: Instrucción Técnica Complementaria de Baja Tensión.

IVEM: Ingeniería de Verificaciones ElectroMecánicas.

MICYT: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.

MOV: Most Open Valve.

MT: Media Tensión.

pH: Potencial hidrógeno.

PID: Proportional Integral Derivative Controller, Controlador Proporcional Integral y Derivativo.

PLC: Power Line Communications, comunicaciones mediante cable eléctrico.

RD: Real Decreto.

REE: Red Eléctrica Española.

RETEMA: Revista Técnica de MedioAmbiente.

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition, Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

SCEE: Sistemas de Conversión de Energía Eólica.

SOTE: Pruebas de transferencia de oxígeno en difusores.

SS: Sólidos Suspendidos.

TIR: Tasa Interna de Rentabilidad.

UV: Ultravioleta.

VAN: Valor Actualizado Neto.

1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la interrelación o binomio agua y energía es cada vez más importante debido a la actual situación de incertidumbre desde el punto de vista energético, y en particular en lo que se refiere al régimen especial, la desconfianza en el horizonte tarifario y un escenario tendencial creciente de precios. A medida que el agua se convierte en un recurso cada vez más escaso en relación con la demanda de la creciente población y la economía urbana, se intensifica la competencia por este recurso en todos los sectores productivos (Lee et al, 2015).

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) son parte esencial en la gestión integral del ciclo del agua, pues son el punto de retorno del agua a su medio en las condiciones óptimas. Estas plantas son los principales consumidores de energía en dicho ciclo, en torno a un 65%, y aquellas de gran consumo presentan un importante potencial de autoabastecimiento mediante la producción de biogás. Asimismo, según los últimos estudios sobre el potencial energético de los lodos en España, la producción obtenida en el año 2020 podría llegarse a multiplicar por 2,5 a la obtenida en 2007, incrementándose desde 49 a 123 toneladas equivalentes de petróleo (iAgua, 2014; Dalla et al, 2015).



Figura 1. Ejemplo de Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) (INIMA, 2011).

Con todo ello se deduce que uno de los procesos más importantes en lo que a consumo energético se refiere en el ciclo integral del agua son las plantas depuradoras de aguas residuales. La optimización energética de estos procesos permitirá optimizar el consumo energético de una manera importante en este sector (Gewald et al, 2012).

Todos los procesos que concurren dentro de una estación depuradora junto con sus consumos energéticos dan como resultado un complejo mapa lleno de interrelaciones.

Para incrementar el grado de complejidad, hay que reseñar que la producción de una depuradora y, por lo tanto, su consumo e incluso su consumo específico, puede llegar a ser altamente estacional. Un consumo estándar alcanzaría los $0,67 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ anuales, donde el tratamiento biológico representa más de la mitad del total (iAgua, 2014).

Además de las metodologías hasta ahora utilizadas, la tecnología actual y la posibilidad de reducción de costes permiten emplear metodologías alternativas que además son globales, sostenibles y presentan una mejor eficiencia sobre el aprovechamiento energético de la planta (Zhang et al, 2015).

En definitiva, se trata de decidir cuáles deben ser los flujos de energía en la explotación de los componentes de generación y consumos de los que dispone la estación de tratamiento para obtener el máximo rendimiento y la optimización económica y energética.

Para poder alcanzar este óptimo, en cada momento es necesario tener en cuenta la situación instantánea de las demandas eléctrica y térmica, los consumos de procesos, el periodo y los precios de las tarifas eléctricas, etc. Adicionalmente, se deben conocer y tener en cuenta las previsiones de la demanda de energía térmica, eléctrica y de proceso.

Mediante el análisis instantáneo de estos parámetros se puede tomar la decisión con respecto a la actuación a acometer, cuándo realizar la puesta en marcha de la cogeneración u otras energías y el régimen de funcionamiento de las mismas, maximizando su potencial o estableciendo restricciones para no generar excedentes y evitar posibles penalizaciones u otras posibles actuaciones en beneficio de la optimización energética y económica.

Este trabajo trata sobre las características respecto al consumo energético de las depuradoras de aguas residuales (EDAR), de las que se describen sus principales infraestructuras y se definen los diferentes puntos críticos existentes. A continuación, se proponen distintos tipos de medidas correctoras para mejorar la eficiencia energética y el ahorro, tanto energético como económico, explicando en qué consiste cada una de las medidas propuestas y cómo afectan a la mejora de la eficiencia energética y al ahorro. Por último se establecerá una propuesta metodológica de auditoria energética en EDARs y los resultados obtenidos en diversos casos de estudio según fuentes bibliográficas y experiencias particulares de casos de estudio.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS EDAR

El tratamiento de depuración de aguas residuales se realiza mediante una combinación de tecnologías físicas, químicas y biológicas que se aplican según las características de dichas aguas a tratar y bajo criterios de funcionalidad, coste y efectividad.

En la práctica se diferencia entre aguas residuales urbanas, aquellas aguas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica, actividades comerciales, las aguas de drenaje y escorrentía, entre otras, y aguas residuales industriales, que son las aguas procedentes de actividades relacionadas con la industria. Tanto en aguas residuales urbanas como industriales se emplean en gran parte las mismas tecnologías.

El objetivo de las EDAR es, en general, reducir al máximo la contaminación del vertido y convertirlo en inocuo para el medio ambiente. A nivel específico puede tener como finalidad ahorrar energía y aprovechar los residuos obtenidos de la depuración para otros usos. En cuanto a la reducción de la contaminación del vertido, más concretamente se refiere a:

- Eliminación de residuos, aceites, grasas, flotantes y arenas y evacuación a punto de destino final adecuado.
- Supresión de sólidos sedimentables orgánicos y/o inorgánicos.
- Eliminación de la materia orgánica.
- Eliminación de compuestos amoniacales y que contengan fósforo.
- Transformación de los residuos retenidos en lodos estables y velar porque sean utilizados correctamente.

Todo ello se consigue eliminar en diversas etapas del proceso mediante tratamiento físico, químico o biológico. En la siguiente tabla se denomina la función de cada etapa y el tipo de proceso.

Tabla 1. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1995).

ETAPAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES		
Etapa	Función	Tipo de proceso
Pretratamiento	Eliminación de sólidos gruesos	Físico y/o químico
Tratamiento primario	Eliminación de materia en suspensión y grasas	Físico
Tratamiento secundario	Eliminación de materia orgánica biodegradable	Biológico
Tratamiento terciario	Eliminación de sales disueltas, nutrientes, patógenos, materia orgánica refractaria y afino en la reducción de sólidos y demanda biológica de oxígeno	Físico y/o químico y/o biológico
Tratamiento de lodos	Estabilización y reducción de volumen de los lodos o fangos producidos en el tratamiento del agua	Físico y/o químico

En la siguiente figura se puede observar un esquema básico de una estación depuradora de aguas residuales.

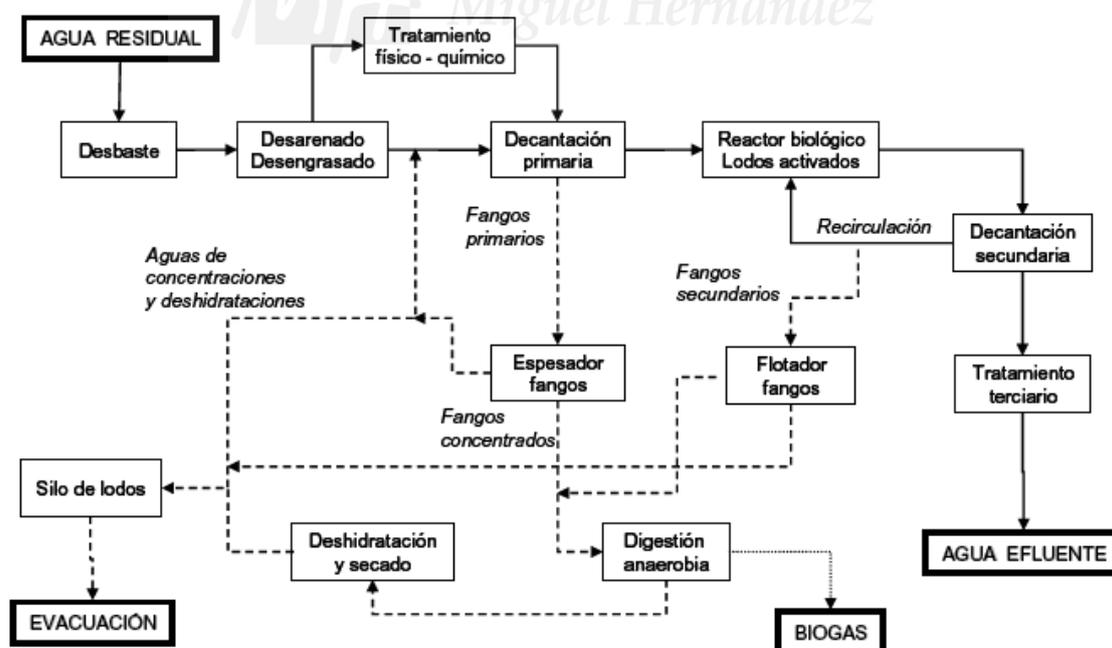


Figura 2. Esquema básico de una EDAR (Metcalf y Eddy, 1995).

Como se puede apreciar, hay dos líneas claramente diferenciadas: la línea de agua, que es el recorrido trazado por el agua desde el desbaste hasta su salida (línea de trazo

continuo); y la línea de fangos, que es el recorrido que realiza el fango, tanto primario como secundario, hasta su evacuación (línea de trazo discontinuo). A continuación se describen cada una de las líneas por separado.

LÍNEA DE AGUA

El agua residual llega a la planta depuradora a través de un sistema de colectores. El tratamiento se inicia en desbaste, también conocido como pretratamiento, donde en el pozo de gruesos se extraen, por medios mecánicos, los elementos de más peso y tamaño. Seguidamente se pasa al cribado de gruesos en el que unas rejillas de cribado retienen la suciedad sólida más gruesa. El pretratamiento continúa con las rejillas de finos donde se separan las partículas pequeñas. Finalmente, en la etapa de desarenado-desengrasado se hacen hundir las arenas y flotar las grasas, a través de procesos mecánicos.

En la decantación primaria se separan los detritus (que constituyen la materia en suspensión) por medios físicos. El objetivo es que se depositen los fangos en el fondo de los decantadores. Estos fangos son los conocidos como fangos primarios. En caso de que el agua residual provenga de industria y con gran carga contaminante, se realiza un tratamiento químico en el que se agregan coagulantes químicos para que se produzca la floculación lo que favorece la decantabilidad de la materia en suspensión.

En la etapa del reactor biológico se elimina la carga contaminante restante por medios biológicos, esto es, utilización en el tratamiento de ciertas bacterias que se alimentan de materia orgánica, ya sea disuelta o en suspensión. Para ello, es necesario un depósito denominado reactor biológico y la aportación de oxígeno mediante soplantes ya que dichas bacterias necesitan aporte de aire para asimilar la materia orgánica.

Tras el tratamiento biológico, el agua pasa a la decantación secundaria en la que los biosólidos formados en el reactor, por su peso, se depositan en el fondo de los decantadores secundarios. De este modo, quedan separados el agua y los fangos secundarios.

Es de gran importancia que parte del fango obtenido en la decantación secundaria se recircule de nuevo al reactor biológico para concentrar los microorganismos hasta valores elevados y disminuir así el tiempo de retención del agua en el reactor. Para un correcto funcionamiento del proceso hay que extraer fango de manera continuada. Las

purgas de fangos en exceso se pueden perpetrar en el reactor biológico o en la recirculación, esta última lógicamente estará más concentrada.

El agua, denominada efluente, ya puede ser reutilizada o, si se desea, se puede realizar un tratamiento terciario para mejorar la calidad de ésta.

LÍNEA DE FANGOS

Como se ha detallado en la línea de agua, con la decantación primaria y secundaria se obtienen los fangos del tratamiento primario y secundario, respectivamente. Ambos se incorporan mediante bombeo a la línea de fangos.

Dicho fango está prácticamente disuelto en agua por lo que es necesario unificarlo mediante espesamiento y poder además enviar ese agua sobrante a cabecera de la línea de agua para poder ser depurada de nuevo y por tanto aprovechada. En el caso de los fangos primarios, este proceso se produce en el espesador de fangos por gravedad que es, en definitiva, un decantador donde por medio de gravedad se consigue el espesamiento del fango.

En cuanto a los fangos secundarios, como se ha citado previamente, parte de ellos retornan a la etapa biológica para mantener la concentración de bacterias, el resto se redirigen a un flotador de fangos donde se produce el espesamiento mediante flotación aumentando así la concentración del fango.

En la siguiente etapa, la digestión anaerobia, se reduce la materia orgánica presente en el fango espesado en un digestor. Durante este proceso se libera gas metano (biogás) que se quema mediante antorcha. En estaciones depuradoras de gran volumen se almacena el biogás en gasómetros (el excedente se quema en antorcha) para aprovecharlo como fuente alternativa de energía.

Una vez se ha digerido el fango, se almacena en depósitos donde se acumula para alimentar el proceso de deshidratación y secado. Aquí se pretende reducir su peso eliminando la mayor parte de agua posible. La deshidratación pasa por procedimientos tales como filtros de banda o prensa o el más común que son las centrifugas. El secado se puede realizar al aire o mediante el calentamiento a través de calentadores o intercambiadores de calor. El objetivo es hacer un fango menos voluminoso y con ello reducir el coste económico del transporte del mismo.

Finalmente los fangos deshidratados y secados se acumulan en silos para su posterior recogida. Estos fangos ya pueden ser utilizados tanto en agricultura como jardinería, en construcción, etc.

Correlacionado con el proceso de depuración de aguas residuales está la desodorización por medio de diversos métodos, como puede ser la adsorción química, tanto en la etapa de desbaste como en la deshidratación y espesamiento.

3. PUNTOS CRÍTICOS DE CONSUMO ENERGÉTICO

En una planta de tratamiento de aguas el consumo energético varía según el tamaño de la misma, la carga contaminante de influente, la tipología de tratamiento y la tecnología que se lleva a cabo en la explotación, lo que conlleva que el coste de la energía variará de una a otra estación de depuración.

El origen de la energía consumida en una EDAR es mayoritariamente eléctrico, excepto en aquellas instalaciones que por sus dimensiones tengan posibilidad de contar con sistemas de autoabastecimiento como pueden ser energías renovables o sistemas de cogeneración. Éstos últimos son utilizados principalmente para calefacción del digester, deshidratación de lodos, etc.

Entre los costes de operación y mantenimiento de las EDARs, el coste de la energía es el mayor de todos, pues supone más del 56% de los costes totales de operación y mantenimiento (Albadalejo y Trapote, 2013). Dicho consumo se irá incrementando paulatinamente como consecuencia tanto del mayor volumen de agua tratada como de la implementación de nuevas tecnologías destinadas a obtener efluentes de mayor calidad.

El objetivo pues, en términos generales, de un estudio de eficiencia energética y auditoría energética en una EDAR es identificar cómo disminuir esos consumos, de productos y servicios en la explotación, manteniendo la calidad del agua tratada y la seguridad en operación. Por tanto, un estudio de eficiencia energética y auditoría energética ha de analizar el uso de los recursos energéticos en la explotación que son, como ya se cita previamente, sobre todo energía eléctrica. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que el consumo de energía eléctrica es sólo una parte de los impactos y costes de una planta de tratamiento y que las decisiones en un punto del sistema pueden tener consecuencias diversas y complejas. También es muy importante el efectuar una

correcta disociación entre los costes variables y costes fijos de una EDAR y determinar por procesos la dependencia del caudal de cada uno de ellos, especialmente en instalaciones sobredimensionadas.

Para llevar a cabo dicho estudio hay diferentes ratios que pueden ser utilizados ya sea el kWh en función del habitante equivalente (he), en función del incremento de DBO (Δ DBO), del incremento de sólidos suspendidos (Δ SS), entre otros. Pero el más comúnmente utilizado es el indicador que relaciona el consumo energético con el caudal de agua depurado conocido como ratio energético: $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de agua tratada.

El análisis energético de los distintos procesos que se llevan a cabo en una EDAR requiere de la dotación de medios adecuada y de un pormenorizado estudio del suministro eléctrico de cada uno de ellos. La mayoría de depuradoras cuentan con cuadros de control de motores (CCM) que contienen la paramenta eléctrica correspondiente a un sector o zona de la instalación. En la mayoría de los casos, la distribución espacial de los consumos de un proceso no queda acotada a un único CCM. Gracias a ello y a los equipos de medida en línea, es posible la monitorización del consumo eléctrico por procesos facilitando así el estudio energético y la posibilidad de futuras mejoras.

En el estudio de prospectiva “Consumo energético en el sector del agua” del Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (IDAE, 2010), se puede apreciar que, para el año en que se realizó el estudio, la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas en España es de 305 MW, lo que equivale a una media de $5,6 \text{ W}\cdot\text{he}^{-1}$ o $49 \text{ kWh}\cdot\text{he}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ó $0,67 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$. En la figura 3 se puede observar con más claridad lo obtenido en el estudio.

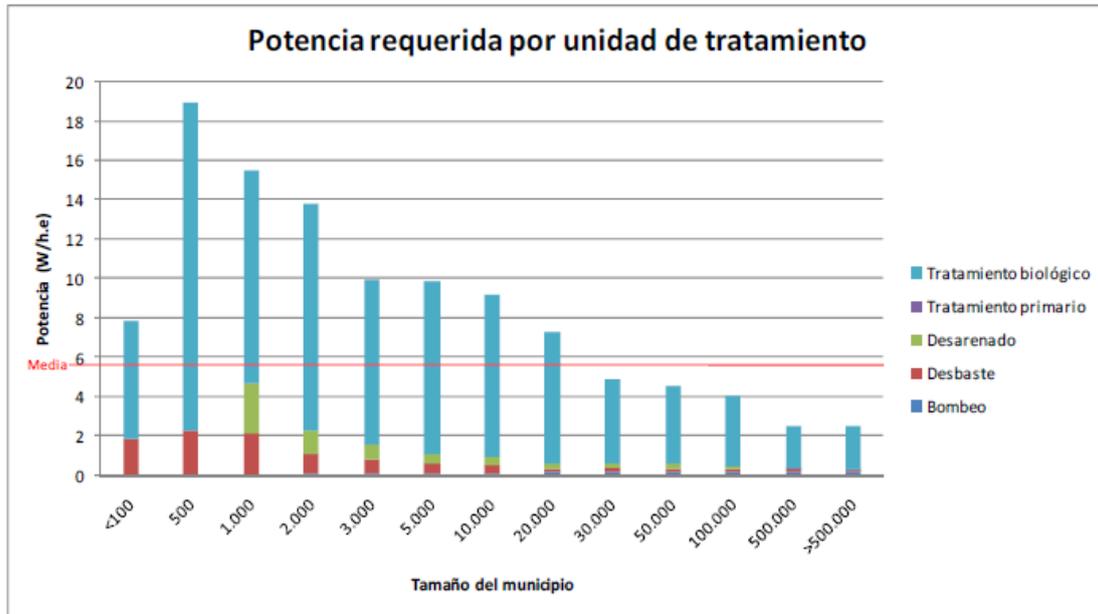


Figura 3. Potencia requerida por unidad de tratamiento (IDAE, 2010).

Según la figura anterior se puede dar por hecho que la etapa donde se concentra la mayor potencia en las EDARs, sea cual sea su tamaño, es en el tratamiento biológico. Teniendo en cuenta pues la cantidad de horas que el agua se encuentra en el reactor biológico a lo largo del año se deduce que esta etapa es la de mayor consumo energético. En la figura 4 se refleja la distribución en porcentaje de los consumos eléctricos según tratamiento o servicio.

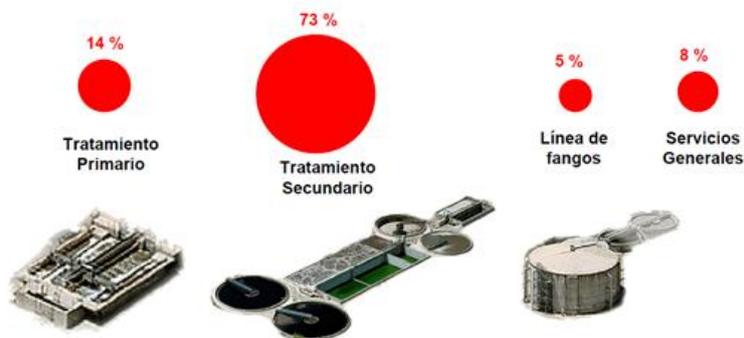


Figura 4. Consumos eléctricos según tratamiento o servicio (González y Moreno, 2009).

Este 73% en el tratamiento secundario, que incluye el tratamiento biológico más la decantación secundaria, se debe concretamente a los equipos implicados en el suministro de oxígeno a los reactores biológicos. La optimización del funcionamiento de estos equipos es clave, no sólo para reducir el consumo global de la EDAR, si no para mejorar la calidad del agua tratada. El incremento de los sólidos en suspensión del

licor mezcla, temperatura del reactor o la biodegradabilidad del influente se asocia directamente con el consumo eléctrico del sistema de aireación. En la siguiente figura se muestra un ejemplo real de consumo eléctrico distribuido por sectores.

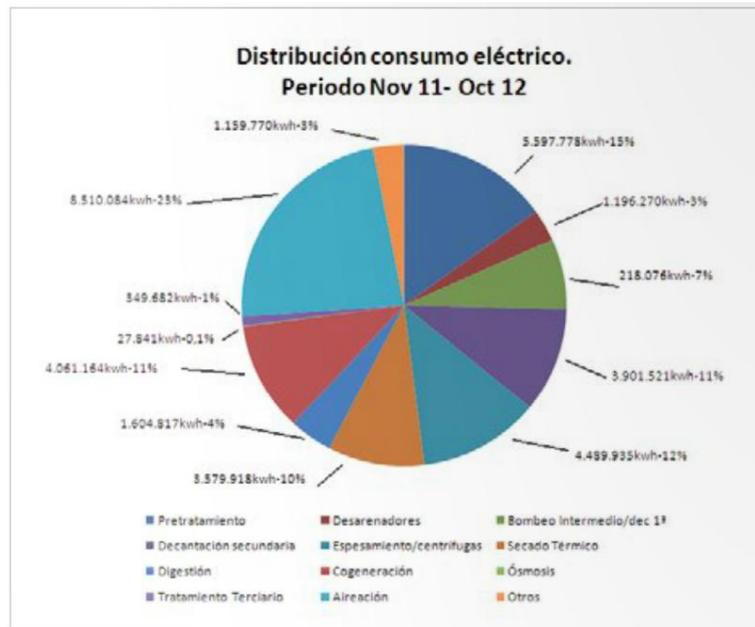


Figura 5. Consumo eléctrico de EDAR El Prat (Barcelona) por sectores (Aguiló et al., 2013).

Como se aprecia en el ejemplo, la EDAR El Prat (Barcelona) durante el periodo de noviembre de 2011 a octubre de 2012 tuvo el mayor consumo eléctrico en la aireación del reactor biológico, un 23% que es casi una cuarta parte del total consumido y el segundo mayor consumo fue en el pretratamiento con un 15%.

Con todo ello se concluye que una de las principales partes donde operar para conseguir un mayor ahorro energético es en el tratamiento secundario. No obstante, también hay otros factores que reducirían el consumo energético en gran medida como puede ser la optimización de los grupos de bombeo en cabecera que influye en el pretratamiento. Como se ha mostrado en las anteriores figuras constituye aproximadamente un 15% del consumo energético, o la posible implementación de medidas de autoabastecimiento, en la medida que ello sea viable.

Otras posibles actuaciones con repercusión en el ahorro pueden ser un diseño eficaz de la instalación, un correcto mantenimiento, mejoras en la telegestión y la automatización, etc.

Por último, pueden adoptarse ciertas medidas que a pesar de no generar ahorro energético, permiten que el coste de la energía se reduzca.

4. MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EQUIPOS E INSTALACIONES

4.1 PRIORIZACIÓN DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES COMO APOYO ENERGÉTICO

4.1.1 COGENERACIÓN

Se define como cogeneración el proceso en el que se produce simultáneamente energía eléctrica (o mecánica) y energía térmica útil a partir de un combustible. En el caso de las depuradoras de aguas residuales dicho combustible es el biogás generado en los digestores. Su existencia está ligada fundamentalmente al secado de fangos o lodos que se obtienen en el proceso de tratamiento de aguas. El proceso se realiza mediante fermentación anaerobia de los fangos, del cual se obtiene biogás con un alto contenido en metano que se utilizará posteriormente como biocombustible, es decir, que de su combustión se obtiene energía. Este se aprovecha para obtención de calor y producción de energía eléctrica mediante motores específicos o microturbinas.

Tabla 2. Comparativa entre motores y microturbinas (Torres y Martin, 2009).

Motores	Microturbinas
30 Kw – 30 Mw	30 – 250 Kw
Bajo contenido en H ₂ S y siloxanos	Alto contenido en H ₂ S, bajo contenido en CH ₄
Elevadas emisiones	Bajas emisiones
	Temperatura de salida de gases: 204 – 315°C
25.000 – 50.000 horas de vida	40.000 – 80.000 horas de vida
0,068-3,1 bar en el gas de entrada	3,44 a 5,5 bar en el gas de entrada. Requiere de un compresor
Mantenimiento elevado cada 1.000 h*	Mantenimiento sencillo y cada 8.000 h.
Rendimiento eléctrico sensible al contenido de metano.	Rendimiento eléctrico independiente del contenido en metano.
Rendimiento eléctrico 30-40%	Rendimiento eléctrico 28-33%
Total rendimiento 70-80%	Total rendimiento 65-75%
Grandes dimensiones y peso.	Pequeñas dimensiones y poco peso
Aplicaciones de cogeneración de bajas temperaturas	Aplicaciones de cogeneración de bajas temperaturas
Elevado nivel de ruido	Bajo nivel de ruido

Para poder hacer uso de este biogás es necesario su acondicionamiento, es decir, eliminar los siloxanos presentes. Esto se consigue mediante diferentes métodos como el enfriamiento del biogás, ya sea bajar la temperatura del mismo a 15 °C o hasta 5 °C o hacer uso de filtros de carbón activo y grafito activo. También para mejorar la calidad se puede purificar y deshumidificar el biogás.

El método de cogeneración es un proceso altamente eficiente, ya que el calor es producido durante el proceso de generación de la electricidad y supone, por tanto, el aprovechamiento de un calor residual.

No sólo se consigue mejorar el rendimiento energético de la instalación, sino también una importante mejora medioambiental reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, al mismo tiempo que se disminuye el consumo de combustibles fósiles y se sustituye por una fuente de energía renovable. La aportación de la energía eléctrica procedente del biogás puede llegar a suponer la mitad de la energía consumida en las EDAR.

Un ejemplo de aplicación de la cogeneración en depuración es en la EDAR Murcia Este (Murcia) (ver figura 6). La instalación cuenta con una central de cogeneración de 1MW con dos generadores de 500 KW y, en paralelo, un sistema de desulfuración del biogás generado en la EDAR, así como un sistema de purificación y deshumidificación del mismo.

Este sistema debe estar en funcionamiento las 24 horas del día, adecuando su producción a las necesidades de la planta. De este modo se evita inyectar energía a la red eléctrica pública, y por tanto, su aprovechamiento es del 100%. Dicha instalación de cogeneración de energía a partir del biogás cuenta con su propio sistema de automatización como se puede observar en la figura 6 (Schneider Electric, 2014).



Figura 6. Solución implantada en la EDAR Murcia Este (Murcia) (Schneider Electric, 2014).

La solución implementada para llevar a cabo una gestión eficiente de la instalación ya está consiguiendo importantes ahorros energéticos y económicos, del orden del 40% de la energía consumida en la planta procede de la cogeneración. Además supone un claro beneficio para el medioambiente, permitiendo reducir de manera extraordinaria las emisiones contaminantes de la planta.



Figura 7. Planta de cogeneración de la EDAR Murcia Este (Murcia) (Schneider Electric, 2014).

En la Comunidad Valenciana, por ejemplo, la cogeneración del biogás por parte de todas las EDARs que tienen a su disposición este tipo de instalaciones con unos 20 motores, supuso en el año 2009 la obtención de 23,3 GWh de energía eléctrica, equivalente al consumo de 2000 toneladas de petróleo (EPSAR, 2010).

Entre otros ejemplos de EDAR con cogeneración se tienen a nivel nacional: EDAR Copero (Sevilla), EDAR La Palma (Islas Baleares), EDAR León (León), EDAR Elx (Alicante), EDAR Baix Llobregat (Barcelona), EDAR Tablada (Sevilla), EDAR Benidorm (Alicante), EDAR Palencia (Burgos), EDAR Huelva (Huelva), EDAR Novelda (Alicante), EDAR Sant Feliu (Barcelona), EDAR de Valladolid (Valladolid), entre otras. Como se puede apreciar la implantación de este sistema ya está bastante extendido en el tratamiento de aguas.

4.1.2 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

En nuestro país existe una legislación vigente enfocada a la regularización del uso de las energías renovables. La producción de energía eléctrica utilizando fuentes de energías renovables, como la fotovoltaica, tiene la consideración de producción en régimen

especial. Ello implica que se rige por unas disposiciones específicas que incluyen unos derechos y obligaciones. En una estación de tratamiento de aguas se puede estudiar la posibilidad de aprovechar la superficie de los edificios para la producción de energía eléctrica para autoconsumo por sistemas fotovoltaicos o, como ha pasado hasta ahora, ligar los rendimientos que se produzcan por la venta de dicha energía eléctrica a la sostenibilidad de la gestión del agua.

Un sistema de energía solar fotovoltaica (ESF) es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica. El módulo fotovoltaico colocado en la placa solar es el encargado de la captación de la energía solar. Dicha captación se puede llevar a cabo gracias al material del que está formado el módulo, principalmente silicio, que es conductor y genera electrones mediante la radiación solar. Existen distintas calidades, en función de la energía que son capaces de captar y depende fundamentalmente de la manera en la que el silicio se presenta en las células fotovoltaicas, ya sea en estructura monocristalina que es la de mayor calidad, estructura policristalina que es intermedia y estructura amorfa que es la que peor capta la radiación por lo que es la más barata.

Entre las ventajas cabe señalar la gran fiabilidad que proporciona este tipo de instalaciones, además de su larga duración. La producción de la energía se produce de manera limpia, es decir, no produce contaminación directa y es fácil de distribuir. Por otro lado, sus costes de mantenimiento y personal se consideran relativamente bajos. No obstante, también hay que señalar que la inversión inicial es bastante elevada.

Para abordar la viabilidad técnica de este tipo de instalaciones se realiza a priori, un estudio del potencial solar de la zona en que está ubicada cada instalación. Los datos de radiación solar se pueden obtener a partir de la red de estaciones meteorológicas repartidas por todo el territorio nacional.

Con respecto a la instalación se debe tener claro desde el principio si va a estar aislada de la red de manera que sea para autoconsumo o si, por el contrario, va a estar conectada a la red para verter así la energía producida.

Respecto al dimensionamiento, instalación y mantenimiento de los sistemas solares fotovoltaicos, cabe recurrir a las prescripciones establecidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE), en concreto en la exigencia básica HE5 del documento básico DB

HE de ahorro de energía. Efectivamente, en la DB HE5 “Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica” se obliga a determinados edificios a incorporar sistemas fotovoltaicos en función de las características específicas de los mismos. Pues bien, este documento constituye un manual técnico con instrucciones de cálculo, instalación y mantenimiento de sistemas ESF, el cual puede ser empleado para el dimensionamiento de este tipo de instalaciones.

Un ejemplo práctico se encuentra en la EDAR de Pilar de la Horadada (Alicante). Los ingresos generados por la energía producida en la planta fotovoltaica de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) de Pilar de la Horadada (Alicante) permiten cubrir el 47% del gasto energético anual de la depuradora.

En concreto, esta instalación consumió en 2011 más de 1,3 millones de kWh, lo que supone un coste superior a los 160.000 euros anuales, mientras que generó una cantidad superior a los 159.500 kWh, cuyo valor de venta a la red es de 76.000 euros (ElPeriodic, 2012).



Figura 8. Placas Solares en la EDAR de Pilar de la Horadada (Alicante) (EPSAR, 2015).

Otro ejemplo es la EDAR Copero (Sevilla) donde EMASESA, Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A., dispone de una instalación fotovoltaica, que junto con otra situada en una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), tienen en total una potencia nominal de 1 MW, utilizando paneles dotados con dispositivo de seguimiento solar que mejoran su rendimiento. Contribuyen

aproximadamente con un 3% al total de energía generada con recursos propios (EMASESA, 2015).

4.1.3 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y es a día de hoy la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables.

Dicha energía se basa en la energía cinética de las masas de aire en movimiento. La corriente de dichas masas de aire tiene su origen en un calentamiento desigual de la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean los patrones globales de circulación. Las masas se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

La energía disponible en el viento se determina mediante tres componentes, estas son: la velocidad del viento, su variación en el tiempo y, en menor grado, la densidad del aire.

Así pues, la potencia contenida en el viento, soplando con una velocidad V y pasando a través de un área A perpendicular a V , es:

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (1)$$

Donde:

P_{viento} : potencia eólica expresada en vatios, W.

P : densidad del aire ($1.2 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a nivel del mar).

V : velocidad del viento en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

A : área del rotor en m^2 .

Se podrá llevar a cabo la extracción de dicha potencia contenida en el viento en estaciones depuradoras gracias a centrales mini-eólicas o de pequeña potencia donde el aprovechamiento de los recursos eólicos se realiza mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW. De acuerdo con las normas internacionales, los equipos que aprovechen esta tecnología deben tener un área de barrido que no supere los 200 m^2 (Asociación de Productores de Energías Renovables, APPA, 2015).

Entre las distintas ventajas de esta energía renovable figuran: la generación de energía próxima a los puntos de consumo, reduciendo así las pérdidas de transporte (generación distribuida), versatilidad de aplicaciones y ubicaciones, la inversión requerida es relativamente baja y sus reducidos costes de operación y mantenimiento.

Por tanto, para poder dar apoyo y suplir parte de la demanda energética ocasionada por el tratamiento del agua se puede hacer uso de la energía eólica, de modo que habría que dotar a la instalación, en su propia parcela o en el entorno, de aerogeneradores funcionando en régimen de autoconsumo. Para ello se debe estimar la potencia eólica necesaria para cubrir las demandas ocasionadas por el ciclo de tratamiento. Seguidamente, para poder decidir si los consumos energéticos pueden o no ser abastecidos por dicha energía renovable, hay que conocer el potencial eólico de la zona de emplazamiento de la instalación.

Determinar el potencial energético eólico de una zona, es una tarea que requiere tiempo y recursos económicos para realizarse adecuadamente. Es necesario recopilar datos meteorológicos durante el tiempo que se estime oportuno, que normalmente suele ser de un año, si se desea realizar una prospección con cierto grado de certidumbre. El recurso eólico, por su propia naturaleza, tiene un comportamiento específico en cada lugar y presenta variaciones espaciales substanciales. Con ello se deduce que al tomar mediciones puntuales en un lugar concreto, las magnitudes de la velocidad de viento y su dirección, a una distancia de 100 metros, son diferentes, no obstante puede darse el caso de existir cierta correlación entre sus magnitudes y su comportamiento.

La adecuada determinación de la variación del recurso eólico permite seleccionar el aerogenerador adecuado para un requerimiento dado de energía. Al mismo tiempo, al conocerse los períodos largos de calma, se identificará la necesidad de abastecerse de la red eléctrica, o en su defecto, mediante otro sistema de autoconsumo, como un sistema fotovoltaico.

Así pues, la estrategia que se lleve a cabo para evaluar el recurso estará acorde con las necesidades energéticas de la instalación y el nivel de sofisticación de la evaluación será mayor.

Estimaciones del recurso eólico se basan en algunas estrategias útiles como son: colección de información de manera empírica, anemómetros totalizadores, por factores

de correlación, instalación de pequeños sistemas de conversión de energía eólica (SCEE) o por adquisición de datos en tiempo real.

Esta práctica lleva explotándose en Canarias desde hace ya bastantes años. Un ejemplo es en San Nicolás de Tolentino, una experiencia auspiciada por la Consejería de Industria en 1986, relativa a la aplicación de energía eólica en la depuración de aguas residuales. El aerogenerador instalado alimentaba la planta depuradora del municipio (Gobierno de Canarias, 2015).

Otro ejemplo de aplicación es en la EDAR de Paterna (Valencia).



Aerogenerador en la EDAR de Paterna - Fuente del Jaro (Valencia)
Suministro y puesta en marcha de aerogenerador de eje horizontal de 3,5 kW

Figura 9. Aerogenerador en la EDAR de Paterna (Valencia) (IVEM, 2015).

También en la diputación de Ourense se han instalado cuatro instalaciones minieólicas en varias de las depuradoras de la provincia. En este caso la selección del tipo de depuradoras para la instalación de minieólica ha sido a consecuencia de la estabilidad de consumo de las mismas, ya que tienen un consumo constante durante las 24 horas del día que se compensa con la producción también constante de la minieólica durante las mismas 24 horas del día según estudios de recurso eólico. En Galicia la producción gracias al viento llega a las 1800 horas perfectamente.

Estas instalaciones dadas de alta en industria y legalizadas están ya inyectando a la red interna de las depuradoras y se calcula que ahorren entre un 15 y un 30% de la factura

total de las mismas. Las depuradoras seleccionadas se encuentran en las poblaciones de As Touzas, Baltar, Monterrei y Sandías donde se han instalado 3 Enair 70 y un Enair 160 (Energética XXI, 2013).



Figura 10. Aerogenerador de una de las EDAR de Ourense (Ourense) (Energética XXI, 2013).

4.1.4 ENERGÍA HIDRÁULICA

La finalidad de un aprovechamiento hidroeléctrico es transformar la energía potencial de una masa de agua situada en el punto más alto en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo. La potencia eléctrica que se obtiene en un aprovechamiento es proporcional al caudal utilizado y a la altura del salto.

Entre las ventajas destacan la producción de energía eléctrica estable, eficiente, barata y limpia, con costes de explotación y mantenimiento bajos y todo ello a temperatura ambiente. Aparte cuenta con una alta disponibilidad debido al flujo de agua necesario para la producción de la EDAR. Entre sus inconvenientes cabe citar el emplazamiento y el coste económico.

La calidad del agua no se ve afectada ya que ni se consume ni empeora, únicamente es explotada. Por ello existe la posibilidad de realizar pequeños aprovechamientos mini o microhidráulicos, siempre que sea posible y económicamente viable. Se considera minihidráulicos a aquellos cuya potencia extraída es menor a 10 MW. Con este método

se pretende aprovechar las pendientes significativas y la necesidad de disminuir las presiones que se pueden llegar a alcanzar.

En la actualidad existen muy pocos precedentes de recuperación de energía mediante métodos hidroeléctricos de agua residual depurada aun sabiendo los beneficios energéticos y medioambientales que ofrecen este tipo de instalaciones, sobre todo aquéllas de gran capacidad.

Para poder extraer la energía hidráulica del fluido uno de los factores clave es el conocimiento preciso del caudal por lo que la instalación debe contar con caudalímetros. Hay que considerar que en esta medida no se puede controlar a priori la producción energética debido a que ésta depende directamente de la demanda de agua pero con un trabajo exhaustivo de campo donde se recojan los caudales en función de la hora y durante un periodo lo suficientemente largo se podrá realizar previsiones de consumo.

Previamente para la detección de los posibles puntos de aprovechamiento, será necesario el estudio cartográfico eligiendo aquellos puntos de mayor altura, mayor caudal y menor longitud. Con ello se seleccionarán indirectamente aquellos puntos de mayor potencial minihidráulico y, por ende, los que ocasionarán menor coste.

Para la extracción de energía del fluido se hace uso de turbinas hidráulicas. Éstas deben seleccionarse de forma que no existan períodos en que no estén operativas por no cumplir sus condiciones de caudal mínimo de funcionamiento. El tipo de turbina elegida debe proporcionar el mayor rendimiento posible en las condiciones específicas de cada emplazamiento. Para este tipo de máquinas hay que solicitar presupuesto a aquellas empresas que fabriquen específicamente turbinas de baja potencia ya que de manera normal no suelen fabricarse en serie. Para cada instalación deberá estudiarse la viabilidad de esta medida y su amortización pues a priori supone un coste considerable.

Dependiendo de la topología de la EDAR, inicialmente existen dos medios de explotación hidroeléctrica del agua residual:

- Se intercala la turbina aguas arriba de la planta de depuración, de modo que se opera con el agua residual, aprovechando el desnivel existente entre la red y la instalación. En este caso es trascendental la selección de la turbina puesto que tiene que soportar las impurezas del agua mecánicamente hablando o tener a su disposición un sistema de pretratamiento antes de la llegada del agua a la

turbina. Es indudable pues que la turbina que trabaja con agua bruta está sujeta a un desgaste y una corrosión muy superior a la que trabaja con agua ya tratada.

- La turbina se intercala en el efluente, esto es, el agua ya depurada, suponiendo que existe un desnivel entre la planta y el mar o río en la que se descargue. Aquí es importante que se determinen las condiciones de caudal y salto neto para el aprovechamiento.

Un ejemplo de proyecto de aplicación de dicho método es en la EDAR de La Cartuja (Zaragoza) donde la idea es aprovechar el salto de 8,50 metros que se produce entre la salida del agua depurada y la lámina del río Ebro. En este caso, la planta se construyó a una cota más alta que el río para protegerla de las crecidas. La producción de energía prevista con esta actuación será aproximadamente de 685.000 kWh al año (iAgua, 2015).

Se ha dado ya el caso de instalaciones que cuentan con este aprovechamiento de energía a nivel internacional como son la instalación en Leysin, en el cantón suizo de Vaud, en la que una turbina Pelton de 430 kW de potencia, trabaja con agua ya tratada y otra en Le Chable, en la que una turbina Pelton de 447 kW de potencia es alimentada con las aguas residuales de la estación de ski de Verbier, a la entrada de la planta de tratamiento (European Small Hydropower Association, ESHA, 2006).

4.2 ACTUALIZACIÓN DE EQUIPOS POR MODELOS DE ALTA EFICIENCIA

En la actualidad, en algunas depuradoras, pueden existir aún equipos obsoletos cuyo rendimiento es considerablemente inferior a aquellos de nueva generación. Entre estos equipos, en los cuales sería razonable realizar un estudio de mejora, constan los equipos de producción de aire, los motores, las bombas y los intercambiadores de calor, entre otros. En este punto se van a desarrollar los equipos de producción de aire y los motores dada su importancia.

4.2.1 EQUIPOS DE PRODUCCIÓN DE AIRE

Los equipos de producción de aire más comúnmente utilizados en los últimos años, para instalaciones de tamaño medio, han sido las soplantes, que son dispositivos que inyectan el aire a los difusores y a los aireadores. En las plantas de tratamiento se usan

principalmente las de desplazamiento positivo, que son normalmente soplantes de émbolos o lóbulos rotativos.

Actualmente han surgido en el mercado otros dispositivos que buscan ser más eficientes y cuyas prestaciones superan las de las soplantes tradicionales. Tres de estas nuevas tecnologías son las soplantes centrífugas, los turbo de levitación magnética y las soplantes de tornillo.

SOPLANTES CENTRÍFUGAS

Las soplantes centrífugas pueden ser de un solo paso o de paso múltiple. Esta tecnología presenta las siguientes ventajas principales:

- Cojinetes magnéticos: mínima pérdida de energía y sin desgaste mecánico.
- No precisa aceite de lubricación, impidiendo cualquier posibilidad de contaminación del aire de proceso.
- Dispone de variador de frecuencia integrado para mantener el rendimiento óptimo en cada punto de operación, con función de arranque suave.
- Costes de mantenimiento menores respecto a los soplantes tradicionales.
- Diseño integrado, modularidad y flexibilidad.
- Monitorización en continuo, permitiendo corroborar en tiempo real el rendimiento del sistema, minimizando el riesgo de tiempo de inactividad no programados.

La implantación de este equipo se llevó a cabo en la EDAR Girona (Girona). Con esta mejora en el sistema de aireación se redujeron de forma significativa los consumos de energía en los reactores biológicos y en consecuencia en la factura energética de la EDAR. Durante las semanas posteriores a la instalación de los turbocompresores, el consumo medio diario se redujo hasta 8.144 kWh. En la figura 11 se muestra la evolución de estos consumos durante el período de evaluación de la mejora (ACA, 2011).

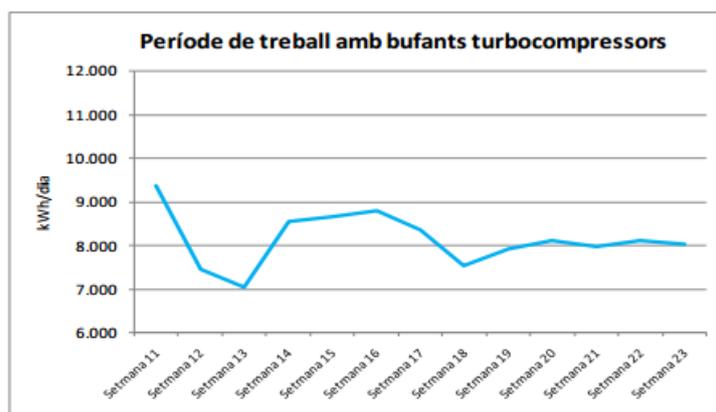


Figura 11. Consumo medio diario en el periodo de trabajo con bombas turbocompresoras (ACA, 2011).

En la figura 12 se muestra la evolución completa de la media de consumo diario de las instalaciones del reactor biológico, sin implantar la medida (semanas 1 a 10) y con la implantación de la medida (semanas 11 a 20). La disminución del consumo de energía se hace evidente una vez implantada la medida, a partir de la semana 11 y hasta la semana 23 (ambas incluidas).

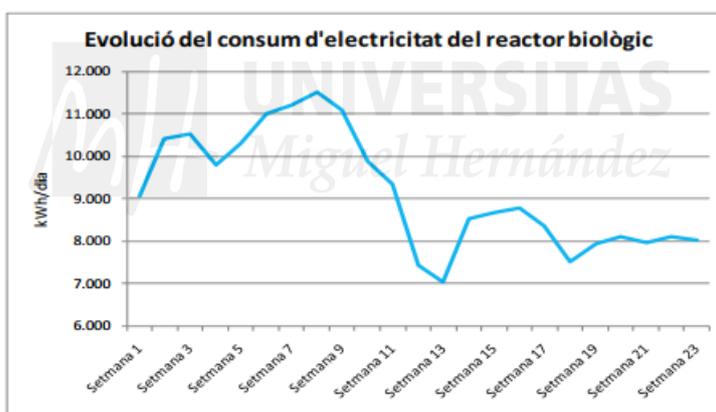


Figura 12. Evolución del consumo de energía del reactor biológico (ACA, 2011).

De la implantación de esta mejora se deriva un ahorro energético medio diario de 2.341 kWh que representa, porcentualmente, un ahorro del 22,3% respecto al consumo inicial cuando se utilizaban soplantes de émbolo rotativo para la aireación los reactores biológicos.

Considerando un precio de la energía eléctrica de 0,1 €·kWh⁻¹, este ahorro energético equivale a 234 € diarios de ahorro económico, que se traduce en un ahorro económico anual de 85.439 € y un período de retorno de la inversión de 1,63 años (ACA, 2011).

TURBOCOMPRESOR DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Los turbocompresores de levitación magnética suponen una evolución en la eficiencia mecánica del turbo convencional centrándose en disminuir al máximo las pérdidas sufridas en la parte mecánica, eliminándola casi por completo, mediante la aplicación de la levitación sobre el eje de la propia turbina.

El funcionamiento se basa en unos cojinetes de inducción que generan un campo magnético que hace levitar el único elemento móvil de la máquina. Dicho elemento consiste en un eje con la turbina de impulsión, el rotor del motor eléctrico y el ventilador de refrigeración de la máquina.

El caudal se regula mediante un variador de frecuencia incluido en el equipo que, al variar la velocidad, controla el volumen o la presión y, además, consigue un ahorro sustancial a bajas velocidades, ya que disminuye la potencia. Otro beneficio de usar un variador de frecuencia es que se ahorra energía porque el motor trabaja a la velocidad nominal para el volumen circulado.

La especial configuración del turbocompresor le posibilita girar a altas velocidades (hasta 40.000 rpm), permitiéndole trabajar en un amplio rango de caudal y de presiones (hasta $16.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a 8,5 mca) (Simón et al., 2012).

El grado de mantenimiento es más reducido debido a que las partes mecánicas expuestas son mínimas. Los equipos cuentan con un grado de seguridad muy alto, garantizando en todo momento que la levitación es correcta, contando incluso con baterías que garanticen una parada controlada ante un corte súbito de energía eléctrica, evitando que se produzcan daños sobre el equipo. Además, estos equipos cuentan con un intervalo de trabajo mayor que las soplantes, se pasa de un intervalo del 60–100% al 35–100%, siendo más flexibles a la hora de adaptarse a las necesidades de oxígeno en función de la carga de entrada a lo largo del día (Simón et al., 2012).

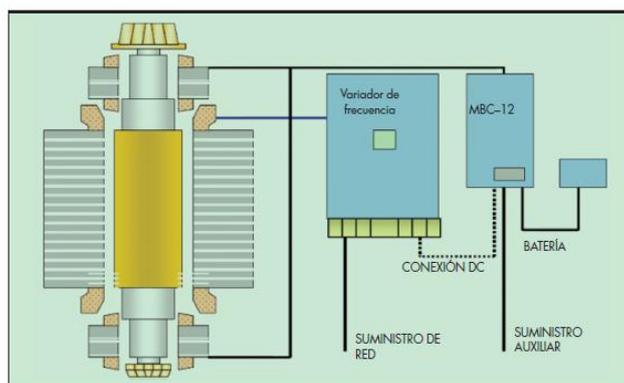


Figura 13. Esquema funcionamiento turbo levitación (Simón et al., 2012).

Entre las principales ventajas se encuentran con:

- Mínimo mantenimiento, y más espaciados en el tiempo.
- Emisión de niveles de ruido inferior.
- Equipos más compactos y ligeros.
- Mayor rango de regulación.
- Aire sin contaminación por lubricantes.

Principal desventaja: coste de adquisición elevado.

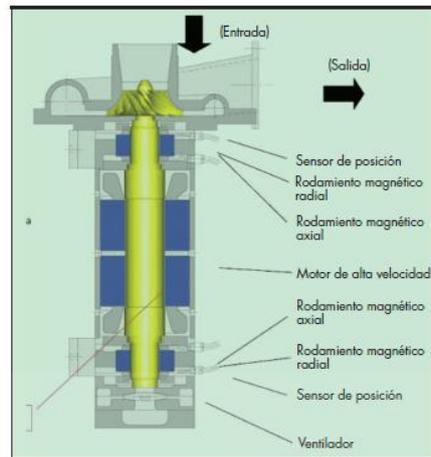


Figura 14. Sección turbo de levitación magnética (Simón et al., 2012).

En la EDAR de Caravaca de la Cruz (Murcia) se cambió la soplante trilobular de 250 kW que había por un turbo de levitación magnética de 200 kW.

Se seleccionó un equipo que produjera un caudal de aire en el mismo intervalo o más amplio que la soplante existente, pasando de un intervalo para la trilobular de $4.138 - 7.369 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a $3.520 - 8.185 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para la de levitación, según los fabricantes.

Se realizaron mediciones reales sobre ambos equipos, realizando mediciones a intervalos del 5% de incremento en el porcentaje de trabajo, desde el mínimo de ambas máquinas hasta el máximo.

En cada porcentaje de trabajo, se midieron consumos de los equipos apreciándose que el equipo de levitación consume menos energía para dar el mismo caudal de aire.

El equipo de levitación magnética, dependiendo del porcentaje de trabajo en el que funcione, consigue una reducción del consumo entre el 17% y el 23%.

El ratio eléctrico de producción de aire, se mantiene más estable a lo largo de todo el recorrido de trabajo en el compresor de levitación que en la soplante trilobular (Simón et al., 2012).

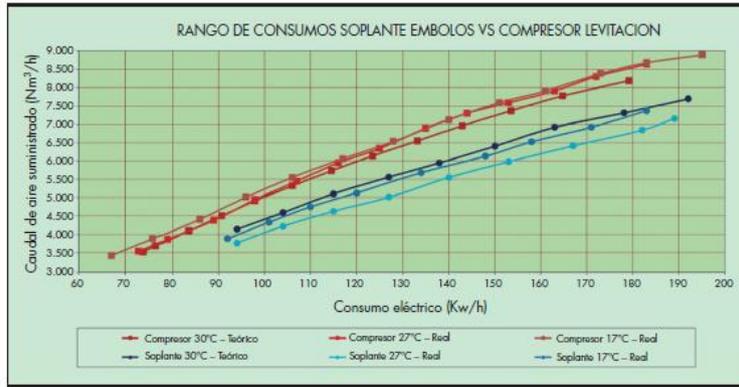


Figura 15. Consumos eléctricos a distintos caudales para soplante de émbolos y compresor de levitación (Simón et al., 2012).

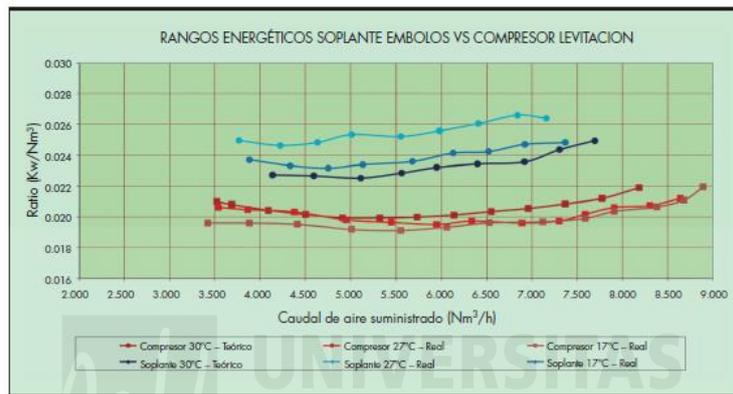


Figura 16. Ratio eléctrico por m3 de aire para soplante de émbolos y compresor de levitación (Simón et al., 2012).

SOPLANTES DE TORNILLO

El núcleo central de presurización de aire de las soplantes de tornillo se compone de émbolos rotativos de ejes gemelos, la compresión es interna, es decir entre los ejes. El aire se transporta desde la aspiración hasta la impulsión en el espacio formado entre los dos rotores helicoidales, comprimiendo el aire hasta su presión final en la impulsión, estos rotores están recubiertos de teflón y sincronizados mediante un juego de engranajes de sincronismo.

En oposición a las soplantes lobulares que la compresión es externa, entre el eje y la carcasa exterior.

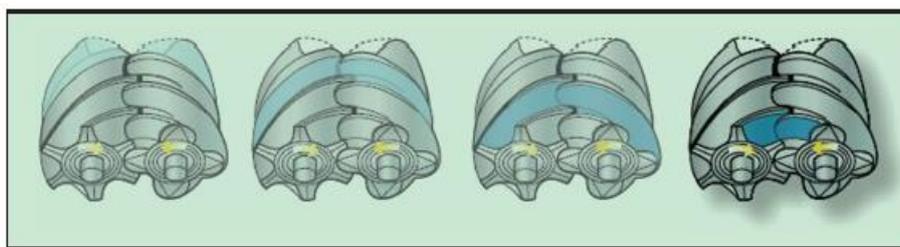


Figura 17. Fases de la compresión interna entre los tornillos de la soplante (Simón et al., 2012).

Las de tornillo trabajan a velocidades superiores a las nominales del motor, mediante variadores de frecuencia y multiplicadores mecánicos, en comparación, las soplantes lobulares que trabajan a velocidades nominales del motor o inferiores, siendo el accionamiento mediante poleas conectadas con cadena cinemática o correas, que tienen mayores pérdidas.

Los puntos diferenciales entre ambos equipos donde están las principales pérdidas son:

- La compresión en las soplantes es externa mientras que en los turbos es interna.
- La transmisión en las soplantes se lleva a cabo mediante correa/polea mientras que los turbos llevan integrada su propia caja de engranajes.
- El silenciador es de placas para las soplantes, lo que para los turbos es liso.
- El filtro es comparativamente mayor en los turbos que en las soplantes.

En la EDAR de Librilla (Murcia) se ha sustituido una soplante trilobular por otra de tornillo. En este caso se seleccionó una soplante de tornillo capaz de suministrar el mismo caudal de aire a régimen máximo. Para producir $1.600 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a 0,8 bar, la soplante trilobular consume 61 kWh frente a los 43 kWh consumidos por la de tornillo, según catálogo del fabricante.

Se realizaron mediciones en dos semanas consecutivas de un equipo y otro, en condiciones similares de trabajo y con la misma lógica de funcionamiento. En la instalación no se contaba con medidor de caudal por lo que se referenció al caudal tratado, la carga de influente fue muy estable. Los primeros siete días estuvo trabajando la trilobular, obteniéndose los siguientes datos promedio $300 \text{ kWh} \cdot \text{día}^{-1}$ de consumo eléctrico, un caudal de $551 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, dando un ratio de $0,544 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$. La segunda semana se hizo lo mismo obteniendo los siguientes datos promedio $199 \text{ kWh} \cdot \text{día}^{-1}$ de consumo eléctrico, un caudal de $548 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, dando un ratio de $0,364 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (Simón et al., 2012).

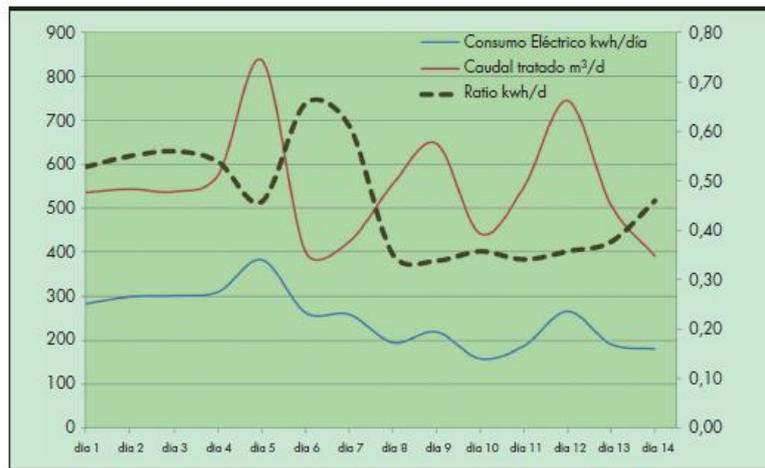


Figura 18. Reducción del consumo eléctrico por la instalación de una soplante de tornillo (Simón et al., 2012).

De la figura anterior se desprende que, aunque los caudales diarios tratados varían en una y otra semana, los ratios eléctricos obtenidos fueron distintos, siendo menores en el caso de la soplante de tornillo.

Otros ejemplos variados de actualización de equipos de producción de aire por modelos de alta eficiencia son los siguientes. Un ejemplo práctico donde se produjo la incorporación de equipos de aireación ajustados a la demanda real y que han supuesto sustanciales ahorros energéticos han sido en las EDARs de Yecla (Murcia) y Las Torres de Cotillas (Murcia). Estos ahorros derivan de la mayor eficiencia de los nuevos equipos a la hora de suministrar la cantidad de oxígeno necesario con un volumen de aire menor manteniendo las horas de funcionamiento de las soplantes. El aire es aprovechado de manera más eficaz por las bacterias con menor pérdida de carga ya que se recibe de manera más homogénea.

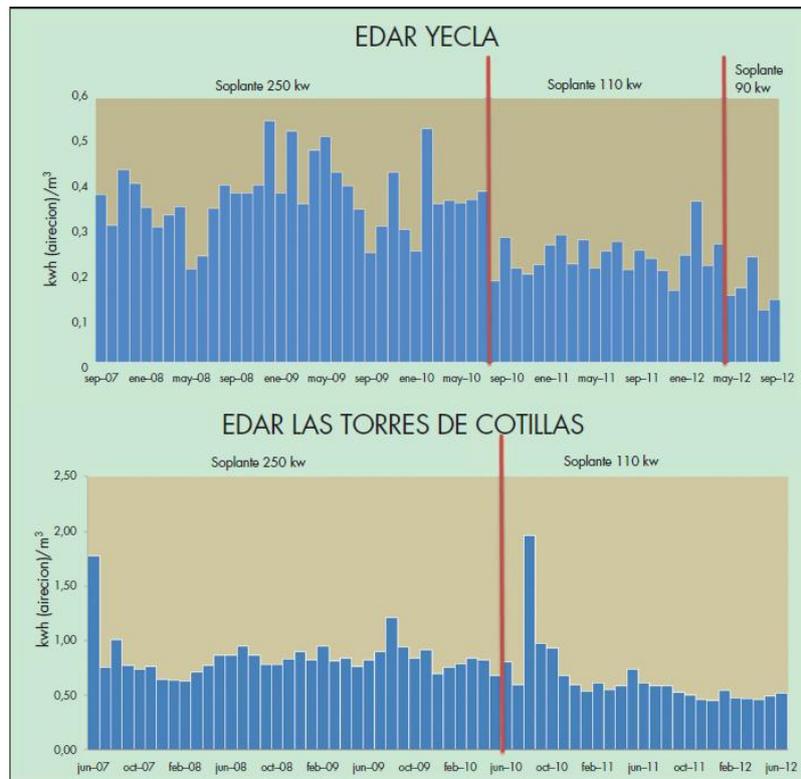


Figura 19. Sustitución equipos de aireación en dos EDAR (Simón et al., 2012).

Como se muestra en la figura 38, en la EDAR Yecla (Murcia) se produjo el primer cambio de la soplante por una de potencia inferior, de 250 kW a 110kW, en septiembre de 2010 y ya se aprecia un considerable ahorro en $\text{kWh}_{\text{aireación}} \cdot \text{m}^{-3}$. El segundo cambio por una soplante de potencia todavía menor se produjo en mayo de 2012 por una cuya potencia es de 90 kW y por lo que se aprecia comparando las épocas estivales de los diversos años, el ahorro es muy significativo (Simón et al., 2012).

De igual manera ocurre con la EDAR Las Torres de Cotillas (Murcia) donde el cambio se produjo en junio de 2010 cambiando la soplante de 250 kW por una de 110kW (Simón et al., 2012).

En EDAR La Cartuja (Zaragoza) la nueva aireación para el reactor biológico instalada en 2015 supondrá un ahorro de 1,4 millones de $\text{kWh} \cdot \text{año}^{-1}$ (iAgua, 2015).

En EDAR Murcia Este (Murcia) se produjo el cambio de dos soplantes por turbocompresores cuya inversión fue de 157.000€. Esta mejora conllevó un ahorro energético de $673.899 \text{ kWh} \cdot \text{año}^{-1}$ y un ahorro económico de $54.869,76 \text{ €} \cdot \text{año}^{-1}$. Su periodo de retorno de la inversión es de 2,9 años (Rodríguez, 2013).

4.2.2 MOTORES

Una de las medidas es elegir correctamente los motores para optimizar la eficiencia energética. Los motores de última generación funcionan a rendimientos muy elevados, con un punto óptimo que permite un ahorro energético considerable, lo que conlleva un ahorro económico.

En las aplicaciones a velocidad constante es más difícil conseguir ahorros de energía que en las de velocidad variable. Se puede aprovechar la renovación del motor para sustituirlo por uno que trabaje a velocidad variable si la plena carga sólo se necesita en ciertos momentos pero resulta una potencia excesiva en otros. Si la velocidad y el par son constantes hay que procurar dejarlas desconectadas en los momentos que no se necesiten. En las cargas de velocidad constante y par variable se puede reducir el consumo de energía para pares pequeños mediante un controlador del factor de potencia que reduce la tensión y el consumo de corriente reactiva.

Entre las medidas para mejorar la eficiencia energética de un motor se citan las siguientes:

OPTIMIZACIÓN DE LA TRANSMISIÓN

Se denomina transmisión al elemento encargado de acoplar el motor con la carga, lo que permite transmitir potencia mecánica entre ellos. En algunos casos las velocidades de entrada (n_e) y de salida (n_s) son diferentes:

- $n_s > n_e$: multiplicadores
- $n_s < n_e$: reductores
- $n_s = n_e$: acoplamientos
- n_s/n_e : variadores de velocidad mecánicos

Los rendimientos en la transmisión oscilan entre el 70% y el 98% (Díaz y Folgueras, 2012). Disminuye cuanto más desiguales son las velocidades de entrada y de salida. La variación mecánica de velocidad tiene grandes pérdidas; es mejor el acoplamiento directo y la variación electrónica de la velocidad.

Existen una serie de recomendaciones respecto a la transmisión:

- Cuando hay acople directo se recomienda asegurar un acoplamiento correcto.
- Si la transmisión es por correas se recomienda usar bandas en V y preferentemente dentadas.

- En el caso que haya reductores se adecuarán a la potencia y la relación de velocidades.
- En el caso de transmisión de cadenas hay ausencia de deslizamiento. Se recomienda para cargas elevadas.

USO DE MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

En la mayoría de auditorías que se desarrollan en EDARs se propone como mejora la sustitución de los motores eléctricos trifásicos de inducción actuales por motores eléctricos trifásicos de inducción de alta eficiencia.

En muchas ocasiones tras la avería de alguno de los motores se plantea la reparación y/o sustitución del mismo. Como recomendación genérica se aconseja en los motores de menos de 40 CV y más de 15 años que directamente sean reemplazados. De igual manera ocurre cuando el coste de reparación sea mayor que el 50% de un motor nuevo (EEAE, 2015).

En caso de proceder a la sustitución, se recomienda encarecidamente la renovación de los mismos por motores de alta eficiencia que son motores de diseño y construcción más cuidadosos que los motores estándar y sus pérdidas son menores con lo que se consigue un mejor rendimiento. Las ventajas de utilizar estos motores de alta eficiencia son la mayor robustez que implica un menor gasto de mantenimiento y mayor eficiencia que implican un menor coste de operación.

Como limitación de esta medida correctora es que las operaciones a velocidades mayores implican un incremento de la carga, además de corrientes de arranque mayores. La eficiencia de un motor eléctrico se define generalmente por:

$$\eta_{\text{motorel\u00e9ctrico}} = \frac{\text{Potencia mec\u00e1nica de la salida}}{\text{Potencia el\u00e9ctrica absorbida}} \quad (2)$$

La diferencia entre la energ\u00eda mec\u00e1nica de salida y la energ\u00eda el\u00e9ctrica de entrada es debida a las p\u00e9rdidas que se producen en una m\u00e1quina el\u00e9ctrica: p\u00e9rdidas el\u00e9ctricas, p\u00e9rdidas magn\u00e9ticas, las p\u00e9rdidas mec\u00e1nicas y las p\u00e9rdidas de carga.

Estos motores de alta eficiencia tienen un dise\u00f1o y construcci\u00f3n especial para reducir las p\u00e9rdidas en ellos. Al tener menores p\u00e9rdidas, estos motores suelen tener menor deslizamiento, lo que para la mayor\u00eda de ellos supone que giran a m\u00e1s velocidad.

Por otra parte, los pares y corrientes de arranque y m\u00e1ximo quedan modificados con respecto a un motor est\u00e1ndar.

Estos motores son más caros, voluminosos y pesados y suelen ser más duraderos. Los motores de inducción más eficientes que existen en el mercado a día de hoy tienen una eficiencia superior a los requisitos mínimos de los motores IE3, eficiencia Premium, por encima del 93,4%.

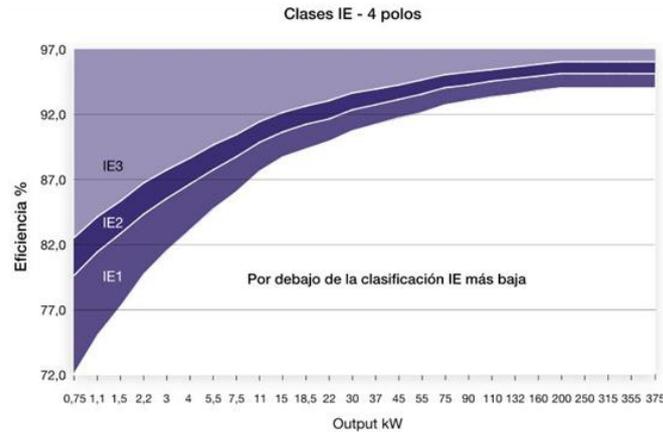


Figura 20. Clases de eficiencia energética actuales para motores de inducción de 50 y 60 Hz.

Como ventajas de los motores eléctricos IE3 para su implementación se citan: un menor consumo energético, tiempo de retorno de la inversión generalmente corto, reducción de la factura eléctrica, modernización del equipo productivo, mejora del mantenimiento, reducción de impacto ambiental por el ahorro del consumo energético y la preservación de recursos para generaciones futuras, y aumento de la productividad y competitividad de la empresa.

La sustitución de motores eléctricos antiguos por este tipo de motores conlleva también una serie de beneficios macroeconómicos como una menor dependencia del petróleo, más puestos de trabajo en empresas consultoras, en proveedores de equipos, una mayor estabilidad económica, una mejora de la balanza comercial y la reducción de la inflación.

Como recomendaciones genéricas se aconseja emplear motores de entre 10 y 75 CV cuando las horas de funcionamiento sean superiores a 2500 horas anuales. Los motores de menor potencia de 10 CV y mayor de 75 CV se emplean cuando trabajan más de 4500 horas anuales (EEAE, 2015).

Otra recomendación es que este tipo de motores se empleen cuando se sustituyan motores sobredimensionados.

En el caso de que se usen los motores con variadores de frecuencia también es recomendable el uso de motores de alta eficiencia.

SELECCIÓN CORRECTA DEL MOTOR PARA LA APLICACIÓN A LA QUE ESTÁ DESTINADO

Hay que considerar que el motor debe trabajar al mayor rendimiento posible para que no dé excesivas pérdidas.

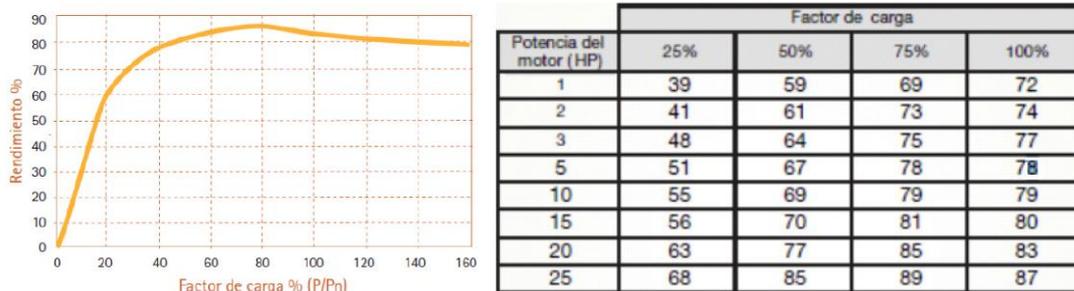


Figura 21. Potencia del motor frente al factor de carga (EEAE, 2015).

En la figura 20 se muestra que el mayor rendimiento se obtiene con un factor de carga del 75%. Por debajo del 25% hay una disminución drástica. Por tanto, un ajuste del factor de carga a valores superiores al 75% sería una medida adecuada para la mejora de la eficiencia energética.

USO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Los motores de corriente alterna son rígidos en cuanto a su velocidad, es decir no pueden variar su velocidad por sí mismos. Si se varía la frecuencia de alimentación del motor se controla la velocidad del mismo. Esta posibilidad de cambio de velocidad por medio de un variador de frecuencia tiene diferentes aplicaciones (bombas, ventiladores, compresores, etc).

Este punto se desarrolla más explícitamente en el apartado 4.4.

Hacer un cálculo bastante aproximado de la energía ahorrada y el tiempo de amortización, por ejemplo en el caso de elegir un motor eficiente en vez de uno convencional, no ofrece demasiada complejidad. A continuación se presenta la evaluación de estos conceptos:

- Ahorro energético:

$$\Delta W \text{ (kWh)} = P_n \text{ (kW)} * F_c * \left(\frac{1}{\eta_{est}} - \frac{1}{\eta_{ef}} \right) * t_s \text{ (horas)} \quad (3)$$

Donde:

∇W : ahorro energético en kWh.

P_n : potencia nominal del motor en kW.

F_c : fracción de plena carga a la que trabaja el motor.

η_{est} : rendimiento en el motor estándar.

η_{ef} : rendimiento en el motor de alta eficiencia.

t_s : tiempo de servicio, horas de trabajo del motor por año

– Ahorro económico:

$$\text{Ahorro económico (€)} = \nabla W \text{ (kWh)} * \text{Precio de la Energía (€·kWh}^{-1}) \quad (4)$$

Donde:

Precio de la Energía: coste de la electricidad (€·kWh⁻¹)

– Periodo de amortización

$$t_{amort} \text{ (horas)} = \frac{(C_{ef} - C_{est}) \text{ (€)}}{\text{Ahorro económico (€)}} * t_s \text{ (horas)} \quad (5)$$

Donde:

t_{amort} : tiempo de amortización en horas de funcionamiento del sobrepeso del motor.

C_{ef} : coste del motor estándar.

C_{est} : coste del motor de alta eficiencia.

El tiempo de amortización del sobrepeso de un motor eléctrico IE3 dependerá del precio de la energía eléctrica, a mayor precio de la energía con menor tiempo se recuperará este sobrecoste y viceversa.

Para poder llevar a cabo los cálculos anteriores si no se conoce la eficiencia del motor existente en la actualidad, una estimación razonable será suponer una eficiencia energética en el límite de las clases EFF2 y EFF3 (figura 21) para un motor que nunca se ha reparado. Si el motor se ha reparado, se debe considerar una pérdida adicional del 1% por cada reparación. Si se opera por debajo del 100% de la carga, se utilizarán los valores de la eficiencia para cargas parciales. Los fabricantes presentan en sus folletos los valores para eficiencia para el 75% y el 50% de la plena carga.

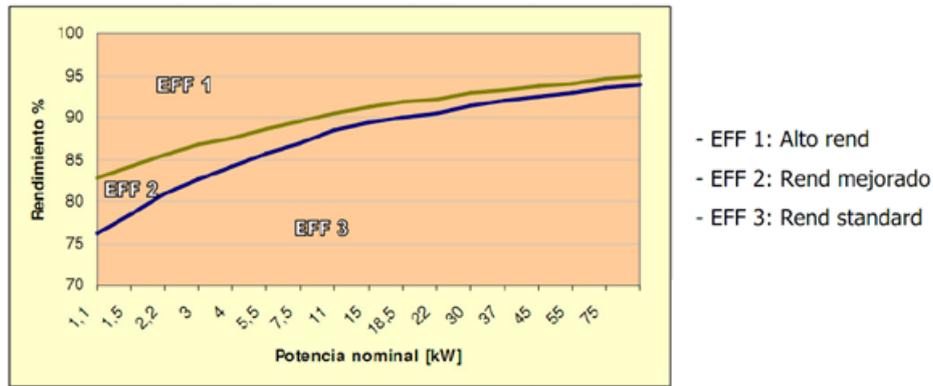


Figura 22. Comparativa del motor de eficiencia normal con el rendimiento standard, mejorado y alto rendimiento para un motor de 2 polos (EEAE, 2015).

En la norma IEC60034-30 (IEC=International Electrotechnical Commission) se han definido nuevas clases de eficiencia (o rendimiento) para los motores de inducción. Hasta ahora se hacía uso de las clases establecidas según CEMEP (CEMEP=European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics). A continuación se muestra la relación entre las clases EFF1, EFF2 y EFF3 según CEMEP y las ahora establecidas IE3, IE2 e IE1 por IEC.

- IE1: eficiencia estándar (equiparable to eff2)
- IE2: alta eficiencia (equiparable to eff1 or EPAct'92)
- IE3: eficiencia premium (equiparable to EPAct'05)

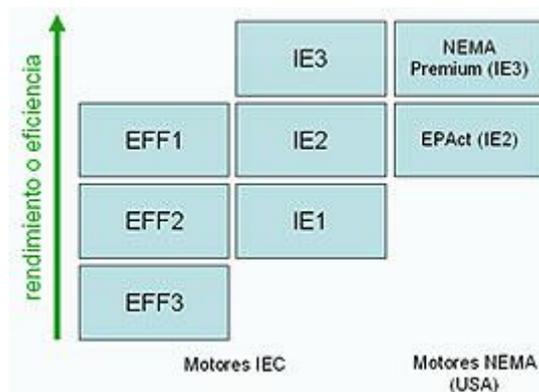


Figura 23. Relaciones entre clases de eficiencia energética.

La diferencia principal entre las clases EFF y las IE radica en el método utilizado para determinar el grado de eficiencia.

A continuación se muestra una tabla a modo de ejemplo con los ahorros conseguidos sustituyendo los motores por aquellos de alta eficiencia (Díaz y Folgueras, 2012).

Tabla 3. Ahorro energéticos y económicos tras la sustitución por motores de alta eficiencia (Díaz y Folgueras, 2012).

Mejoras Línea de Agua	Equipo	Consumo energía final eléctrica anual	Coste energía final eléctrica anual	Ahorro energético anual	Ahorro energético anual	Ahorro económico anual	Inversión	Periodo de retorno de la inversión	% Ahorro sobre consumo de energía eléctrica total	% Ahorro económico sobre los costes energéticos totales	Emisiones de CO ₂
		kWh	€	kWh	tep	€		€	años	%	%
Cambio motor IE3 + variador de velocidad	Agitador rápido	105427	7.379,87	10645	0,92	745,15	1.030,00	1,38	0,93	0,54	2,84
Cambio de motores IE3 + variador de velocidad	Floculadores	83705	5.859,35	62678	5,39	4.387,44	3.732,00	0,85	5,48	3,18	16,73
Cambio motor IE3 + arrancador progresivo	Bombas agua de lavado	36469	2.552,85	2903	0,25	203,18	6.600,00	32,48	0,25	0,15	0,77
Cambio motor IE3 + arrancador progresivo	Ventiladores aire de lavado	38848	2.719,34	3092	0,27	216,43	6.600,00	30,50	0,27	0,16	0,83
Cambio motor IE3	Bombas de trasvase floculante	727	50,91	71	0,01	4,96	50,00	10,08	0,01	0,00	0,02
Cambio motor IE3 + variador de velocidad	Bombas dosificadoras floculante	9834	688,38	6870	0,59	480,88	560,00	1,16	0,60	0,35	1,83

4.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS GRUPOS DE BOMBEO

Otra medida importante en la mejora de la eficiencia energética de las plantas depuradoras de aguas residuales es la optimización del sistema de bombeo, fundamentalmente a través de la modificación del punto de trabajo de la bomba, entre otros.

En estas instalaciones se plantean dos medidas para mejorar la eficiencia energética: el estudio de la idoneidad del circuito y una regulación adecuada.

Un ejemplo de ahorro obtenido tras la optimización de los grupos de bombeo es el caso de la EDAR Martorell (Barcelona) donde se consiguió un ahorro energético en las bombas de cabecera de $4.560 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$, con un consiguiente ahorro económico de $491\text{€}\cdot\text{año}^{-1}$ (ACA, 2011).

ESTUDIO DE LA IDONEIDAD DEL CIRCUITO

Matemáticamente hablando, las leyes de afinidad que aparecen a continuación describen la relación entre la velocidad de rotación de la bomba (n), el caudal (Q), la altura generada (H) y la potencia absorbida (P) por una bomba.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (7)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (8)$$

Cuando están en uso, las bombas siempre forman parte de un sistema de bombeo, que suele constar de una red de tuberías, tanques, válvulas y otros elementos del sistema. El sistema de bombeo se compone de dos partes diferenciadas:

- El circuito hidráulico. Se caracteriza por la longitud, diámetro y rugosidad. Para cada caudal va asociada una pérdida de carga (curva característica del circuito).
- Equipo de bombeo. Son las bombas que mueven el fluido aportando la energía necesaria para vencer la altura y las pérdidas. En función del caudal la bomba permite impulsar el fluido hasta una altura determinada (curva característica de la bomba).

El consumo energético de una instalación de bombeo se debe a la altura geométrica, pérdidas de carga y pérdidas del motor.

La característica de funcionamiento de una bomba es claramente no lineal. Por esta razón hay un funcionamiento ineficiente fuera del rango óptimo. Hay tres posibilidades para volver a poner una bomba en funcionamiento dentro del rango óptimo. Por un lado, la modificación del circuito. Por otro lado, la modificación del punto de funcionamiento. Un último aspecto es la necesidad de ajuste o sustitución.

En el caso de ciertas EDARs, los equipos de bombeo están sobredimensionados, quizá porque se construyeron en un momento en que las previsiones de población eran muy superiores a las actuales o por motivos diversos, de manera que el grupo de bombeo no está funcionando en su rendimiento máximo. Siempre se dimensionan para la época de máxima demanda, que suele ser de uno o dos meses al año, funcionando el resto del año muy por debajo de su punto de funcionamiento óptimo.

En esta situación, las bombas operan con unos caudales muy bajos que hacen que, a su vez, la eficiencia sea también muy baja. En algunos casos se han llegado a medir eficiencias por debajo del 40% (Abadía et al., 2008). Se recomienda entonces sustituir al menos uno de los grupos de bombeo por otro con menor caudal nominal a la presión demandada. Este nuevo grupo será más eficiente y la estación de bombeo trabajará con mayor rendimiento global. Si la población aumenta, y con ello la cantidad de agua

residual, entonces se usarán las bombas ya existentes para suministrar mayor caudal, pero en los períodos en los que el caudal suministrado es bajo, la estación funcionará de forma eficiente.

REGULACIÓN ADECUADA

Los sistemas de bombeo casi siempre necesitan una variación de caudal. Sin embargo, la variación necesaria puede estar en la altura de la bomba, como ocurre con los cambios cíclicos en la presión de proceso o en el bombeo a tanques con un nivel de líquido variable.

A pesar de las variaciones, la capacidad de la bomba se selecciona según la altura y el flujo máximos, o incluso según las necesidades futuras, con cierto margen de seguridad. La capacidad media de bombeo puede ser tan sólo una fracción de la capacidad máxima, y eso exigirá algún tipo de control. Hay básicamente cuatro métodos para adaptar el flujo a los requisitos del sistema. Los métodos de control de caudal más comunes para las bombas son la regulación por válvula en la impulsión, regulación por by-pass, el control de encendido/apagado y el control por variación de velocidad del accionamiento, normalmente un motor eléctrico. Este último se detalla más explícitamente en el siguiente capítulo. Haciendo uso de las valvulas de estrangulamiento en la impulsión se introduce una pérdida de carga en el circuito y el rendimiento global desciende, si es mediante by-pass se recircula cierta cantidad de fluido por la apertura de una válvula de by-pass pero es la opción menos eficiente energéticamente. En cuanto al uso del control de encendido/apagado resulta perjudicial para la bomba ya que produce golpes de ariete y sobre el variador decir que es el método más eficiente, ya que la bomba opera en su punto óptimo.

Como se aprecia el control por variación de la velocidad de accionamiento desde el punto de vista energético es el óptimo, sobre todo si se va a trabajar a menudo fuera del punto de diseño, pero a veces también tiene algunos inconvenientes. En el punto de máximo rendimiento las pérdidas de energía del sistema de variación de la velocidad lo hacen menos eficaz que una bomba bien seleccionada.

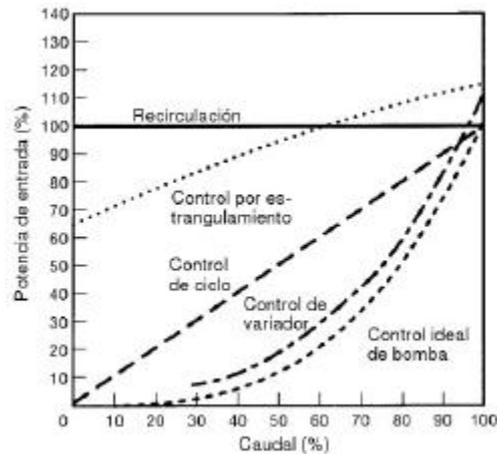


Figura 24. Métodos de control para la regulación de caudal de un sistema de bombeo (Díaz y Folgueras, 2012).

Para entender las ventajas del control por variación de la velocidad hay que tener en cuenta las curvas de rendimiento. Con sistemas de altura estática baja, el rendimiento óptimo de la bomba sigue la curva de sistema.

Con el control por variación de la velocidad de accionamiento, el punto de servicio de la bomba sigue la curva de sistema, sin cambios. Si se cambia la velocidad de la bomba, las curvas de rendimiento de la misma se moverán de acuerdo con las leyes de afinidad. Si la velocidad del propulsor de la bomba se reduce, la curva de rendimiento se mueve hacia abajo. Si la velocidad aumenta, se mueve hacia arriba. Esto significa que la capacidad de bombeo coincide exactamente con los requisitos del proceso.

De este modo se muestra que el método de control de velocidad variable es el que ahorra más energía en las aplicaciones de bombeo. El control de estrangulamiento conlleva una gran pérdida en la bomba y la válvula cuando el sistema funciona con un caudal reducido. La pérdida en el motor permanecerá relativamente constante a lo largo de todo el rango de flujos. En el control por velocidad variable, el punto de funcionamiento sigue la curva de sistema, lo que resulta óptimo para el rendimiento de la bomba. En general, según las leyes de afinidad, el consumo de energía cae drásticamente cuando se reduce la velocidad, y el ahorro de energía con el control mediante variador de velocidad resulta por tanto significativo.

Las ventajas del uso de un variador de velocidad en las aplicaciones de bombeo se puede resumir pues en los siguientes puntos: ahorro de energía, ahorro de materia prima en los procesos como en los sistemas de dosificación, reducción de los costes de mantenimiento, y reducción de condensadores de compensación de energía reactiva, ya

que el control mediante este sistema mejora el factor de potencia haciendo innecesario el uso de dichos condensadores.

Para poder hacer un uso eficiente de la bomba con el variador instalado es preciso analizar, pues, el ciclo de funcionamiento. Un correcto diseño del recorrido de las canalizaciones antes y después del bombeo y una acertada selección de las mismas también reducen las pérdidas. Mediante una simulación hidráulica del grupo de bombeo y de dichas canalizaciones se pueden simular diversos escenarios de demanda, a fin de conocer el comportamiento del conjunto ante diferentes situaciones que se pueden dar a lo largo del año. De esta forma se puede evaluar el funcionamiento y prever el comportamiento ante posibles cambios en la demanda. Para la simulación es necesario conocer los caudales trasegados en las diferentes épocas del año, la distribución de caudales a lo largo de las canalizaciones y los datos referentes a las bombas (curvas características, presión de consigna). Con ello, se puede estimar la eficiencia en los distintos escenarios.

El conocimiento del rendimiento de los grupos de bombeo en distintas situaciones de demanda sirve para programar adecuadamente los arranques de bombas para que, ante las variaciones en la demanda, se pongan en marcha, paren o cambien de régimen las bombas, de forma que en todo momento la eficiencia sea la más alta posible para un determinado caudal.

Para tener conocimiento de si nuestro grupo de bombeo está trabajando de manera eficiente hay dos maneras de calcularlo: mediante análisis energético y análisis de alturas piezométricas y potencias.

- Cálculo de la eficiencia energética de los bombeos (EEB) mediante análisis energético.

El cálculo de la eficiencia energética del bombeo mediante un análisis de tipo energético, se obtiene mediante la relación entre la energía hidráulica suministrada y la energía consumida. La energía consumida se puede obtener directamente de las facturas eléctricas, y corresponde con la energía activa total consumida por los bombeos. Por tanto, EEB se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$EEB = \frac{E_s}{E_c} = \rho * g * \frac{\sum V_k * H_k}{\sum E_{k \text{ facturada}}} = \frac{1000 * 9,81}{3.600.000} * \frac{\sum V_k * H_k}{\sum E_{k \text{ facturada}}} = 0,002725 * \frac{\sum V_k * H_k}{\sum E_{k \text{ facturada}}}$$

(9)

Donde:

EEB: eficiencia energética de los bombeos, en tanto por uno.

E_s : energía hidráulica suministrada, en kWh.

E_c : energía consumida, en kWh.

V_k : volumen de agua suministrado por el bombeo k, en m³.

H_k : altura manométrica suministrada por el bombeo k, en m.

$E_{k \text{ facturada}}$: energía facturada por el bombeo k, en kWh.

Según se incluyan en los sumatorios los datos de un único bombeo, los bombeos de un sector hidráulico o los de toda la red de distribución, se obtendrá la EEB individual de cada bombeo, del sector hidráulico o de toda la instalación, respectivamente.

El cálculo de EEB mediante la ecuación anterior a partir de los datos de funcionamiento habituales de la red de distribución, por un lado requiere que el bombeo funcione a una altura manométrica constante, y por otro que la facturación de la energía consumida por cada bombeo sea independiente para cada uno de los bombeos. Únicamente los bombeos a cota constante y los pozos pueden suministrar una altura manométrica constante, por lo que no se podría aplicar a bombeos que inyectan directamente a red. Por otro lado, cada estación de bombeo debe tener un contrato eléctrico que sólo abastezca a dicho bombeo. Esta situación es habitual cuando se tienen estaciones de bombeo aisladas unas de otras, pero cuando existen varios bombeos próximos, se suele tener un mismo contrato eléctrico para todos los bombeos. En esos casos, no se puede conocer la energía facturada por cada uno de los bombeos contabilizados en el contrato, por lo que se debe recurrir a calcular la EEB mediante un análisis de potencias.

- Cálculo de la eficiencia energética de los bombeos (EEB) mediante análisis de alturas piezométricas y potencias.

El cálculo de la eficiencia energética de un bombeo mediante un análisis de potencias se obtiene mediante la relación entre la potencia suministrada y la potencia absorbida por el bombeo. La potencia suministrada equivale a la potencia hidráulica suministrada, y la

potencia absorbida, en caso de que el bombeo se accione con un motor eléctrico, equivale a la potencia eléctrica absorbida.

Para la determinación de la eficiencia energética de los bombeos existentes en una EDAR se debe calcular en primer lugar la eficiencia energética de cada uno de los bombeos, aplicando la siguiente ecuación:

$$EEB_k = \frac{N_s}{N_a} \quad (10)$$

Donde:

EEB_k : eficiencia energética del bombeo k, en tanto por uno.

N_a : potencia absorbida por el bombeo k registrada durante el periodo de medida, en kW.

N_s : potencia hidráulica media suministrada por el bombeo k durante el periodo de medida, en kW.

La potencia hidráulica media suministrada por el bombeo k durante el periodo de medida, en kW, se obtiene a partir de la ecuación:

$$N_s = \frac{\rho * g * Q_k * H_k}{1000} = g * Q_k * H_k \quad (11)$$

Donde:

ρ : densidad del agua, en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

g : aceleración de la gravedad, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Q_k : caudal medido suministrado por el bombeo k, en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

H_k : altura manométrica suministrada por el bombeo k, y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$H_k = z_i + h_i + z_a + h_a = P_s - P_e \quad (12)$$

Donde:

z_i : altura geométrica de la impulsión medida como la diferencia de cota entre el final de la impulsión y el eje de la bomba, en m.

h_i : pérdida de carga total de la tubería de impulsión, en m.

z_a : altura geométrica de la aspiración medida como la diferencia de cota entre el nivel de la lámina de aspiración y el eje de la bomba, en m.

h_a : pérdida de carga total de la tubería de aspiración, en m.

P_s : presión a la salida del bombeo medida a la altura del eje de la bomba, en m.

P_e : presión a la entrada del bombeo medida a la altura del eje de la bomba, en m.

La potencia absorbida se debe medir utilizando un analizador de redes eléctricas, justo a la salida del transformador que alimenta la estación de bombeo, después del seccionador de baja tensión.

Una vez conocida la eficiencia energética de cada uno de los k bombeos existentes en la EDAR, se debe calcular la eficiencia energética general de cada sector hidráulico independiente, en caso de que los haya, y de toda la instalación, para lo que se pondera la eficiencia de cada bombeo en función del consumo energético anual.

Por tanto, la eficiencia energética general de todos los bombeos se obtendrá a partir de la siguiente expresión:

$$EEB = \frac{1}{\sum kWh_k} * \sum kWh_k * EEB_k \quad (13)$$

Donde:

EEB : eficiencia energética de todos los bombeos del sector hidráulico o de toda la instalación, en tanto por uno.

kWh_T : energía anual consumida por todos los bombeos del sector hidráulico o de toda la instalación, en kWh.

kWh_k : energía anual consumida por el bombeo k , en kWh.

EEB_k : eficiencia energética del bombeo k expresada en tanto por uno.

Cuando se calcula la eficiencia energética de todos los bombeos de un sector hidráulico o de la instalación completa, mediante un análisis de potencias, no se puede aplicar el sumatorio de las potencias suministradas y absorbidas, ya que en ese caso se obtendría la media aritmética de la eficiencia de los bombeos, y no sería representativo de la eficiencia media real de todos ellos, la influencia de un bombeo de poca utilización y escasa potencia, tendría el mismo peso en la eficiencia de todos ellos que la de un bombeo de gran utilización y elevada potencia. Por ello, se debe obtener la eficiencia de

todos ellos como una media ponderada de las potencias de cada uno, en función de la energía que consumen, como se muestra en la ecuación anterior.

- Calificación energética

La eficiencia energética de los bombes (EEB) se califica como eficiencia tipo A (Excelente) hasta eficiencia tipo E (No aceptable), según los valores mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4. Calificación de la eficiencia energética de los bombes (EEAE, 2015).

CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
A	EFICIENCIA EXCELENTE	EEB > 65%
B	EFICIENCIA BUENA	$60\% \leq \text{EEB} \leq 65\%$
C	EFICIENCIA NORMAL	$50\% \leq \text{EEB} \leq 60\%$
D	EFICIENCIA ACEPTABLE	$45\% \leq \text{EEB} \leq 50\%$
E	EFICIENCIA NO ACEPTABLE	EEB < 45%

4.4 INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN EL ARRANQUE DE MOTORES

Hasta hace relativamente poco tiempo (en algunas instalaciones se sigue poniendo en práctica a día de hoy) para evitar las intensidades tan elevadas que se producen en la puesta en marcha de los motores que mecánicamente hablando resultan perjudiciales para el propio motor se suele limitar ésta mediante el uso de autotransformadores, el arranque estrella-triángulo o la eliminación de resistencia en rotor y estator. Para gestionar esto de manera más eficiente se usan los arrancadores estáticos cuya función es alcanzar la velocidad de sincronismo con un alto par de arranque y con un pico de corriente ínfimo. Con esto se ayuda a que se limite el shock mecánico que se produce en las máquinas, a reducir los transitorios que pueden afectar a otros equipos conectados a la red eléctrica y disminuir los problemas con las protecciones que pueden surgir en el arranque.

El método de funcionamiento de los arrancadores estáticos se basa en la aplicación de la tensión de forma progresiva, esto es, mediante rampas de tensión cuya duración se debe ajustar de manera que la intensidad de arranque no supere un determinado límite. Conforme la intensidad se reduce al aumentar las revoluciones, la rampa continúa hasta que se alcanza el 100% de la tensión nominal. La parada del motor también se realiza generando una rampa de deceleración, reduciendo la tensión progresivamente hasta que el par motor sea menor que el par resistente.



Figura 25. Ejemplo de arrancadores estáticos (Abadía et al., 2008).

Entre las ventajas de este tipo de arrancadores electrónicos destaca la suavidad en el arranque con aceleración programable que minimiza los efectos producidos por los golpes y las vibraciones. Además mejora el rendimiento de los motores y son muy útiles en electrobombas al permitir controlar el golpe de ariete. No obstante, aunque el precio es bastante asequible siempre resulta mucho más barato un arranque estrella-triángulo y según para que aplicaciones puede resultar más que suficiente.

En la actualidad los arrancadores se están viendo eclipsados por los variadores de velocidad. Éstos se basan en un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de una máquina, especialmente de motores.

Consta como ventajas la consecución de operaciones más suaves, control de la aceleración y del par motor, posibilidad de variar las velocidades de operación para cada fase del proceso, permite operaciones lentas para fines de ajuste o prueba, entre otras. En cambio, presentan algunos inconvenientes que se pueden llegar a evitar mediante un diseño correcto y un uso adecuado del mismo. El más importante es la generación de armónicos (alteraciones en la red eléctrica) y para evitar que se inyecten a ella, los variadores deben estar dotados de filtros. La mayoría de los presentes en el mercado

vienen con su filtro de fábrica, en caso de que esto no fuera así existe la necesidad de proceder a la instalación de filtros para evitar que los armónicos se propaguen a la red. Los variadores de velocidad se suelen aplicar a aquellas máquinas con cargas de velocidad variable pues son las más susceptibles de permitir un mayor ahorro de energía. Se hace referencia a las cargas de potencia cúbica (bombas, ventiladores y compresores), que son las más frecuentes en la EDAR. En estas cargas, al aumentar la velocidad aumentan cúbicamente los rozamientos dentro de las tuberías y/o los conductores por donde debe circular el fluido a mover. Reducir la velocidad en estas cargas da lugar a un ahorro de energía. Por lo tanto, es preferible funcionar con una velocidad reducida durante más tiempo (por ejemplo, para llenar un depósito) que a más velocidad durante un tiempo reducido y luego tener parada la máquina.

Los variadores de velocidad más usuales en plantas de tratamiento de aguas son aquellos que se utilizan para motores de corriente alterna. Este tipo de variadores se conoce por el nombre de variadores de frecuencia. Mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación se puede controlar la velocidad tanto en motores síncronos como en motores de inducción, ya sean asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado.

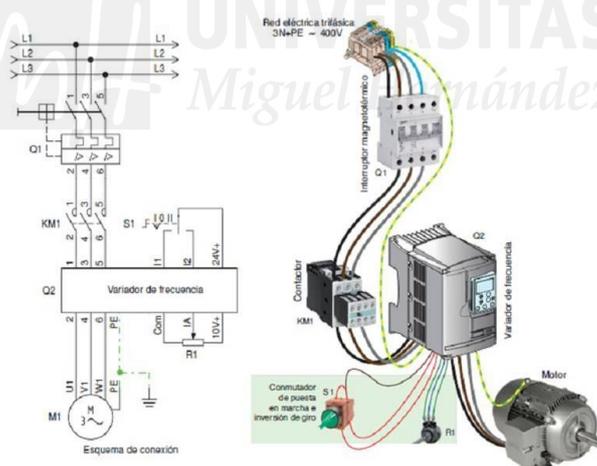


Figura 26. Ejemplo de conexión de un variador de frecuencia.

El motor accionado mediante variador ajusta la velocidad de rotación del motor a las sollicitaciones de energía mecánica necesaria en cada momento de trabajo. Por otra parte, evita el desgaste del sistema con un arranque suave a baja intensidad de corriente, lo que contribuye a prolongar la vida útil del motor. Y también el convertidor de frecuencia mejora el factor de potencia, por lo que se disminuyen las necesidades de baterías de condensadores para la compensación de la energía reactiva.

En caso de contar con un motor síncrono, se debe hacer uso de la siguiente expresión para la determinación de la velocidad:

$$N_s = \frac{120 * f}{P} \quad (14)$$

Donde:

N_s : velocidad síncrona (rpm)

f : frecuencia de alimentación (Hz)

P : número de polos.

En caso de tratarse de un motor de inducción la expresión a utilizar es la siguiente:

$$N_m = \frac{120 * f * (1 - s)}{P} \quad (15)$$

Donde:

N_m : velocidad mecánica (rpm)

f : frecuencia de alimentación (Hz)

s : deslizamiento (adimensional)

P : número de polos.

Se observa pues en ambas expresiones que la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de giro de éste, y en caso de disminuir el valor de la frecuencia disminuirá también la velocidad del eje. El rendimiento de este tipo de variadores es variable en función de la frecuencia de salida resultante. Puede tener valores que oscilan entre 0,95 y 0,97 (EEAE, 2015).

Una característica significativa de estos variadores es que mantienen la razón Voltaje/Frecuencia (V/Hz) constante entre unos valores mínimo y máximo de la frecuencia de operación, con la objetivo de evitar la saturación magnética del núcleo del motor. El hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

De esta forma, el variador permite a las máquinas conducidas por los motores eléctricos producir la misma salida que obtendrían utilizando otros métodos de regulación, pero consumiendo menos potencia de entrada.

Consecuentemente, el ahorro de energía que se obtiene es importante, entre un 15% y un 20%, y cada vez son más los usuarios que apuestan por este método de control. Con la implementación de esta medida de ahorro se obtienen periodos de retorno de entre 2 y 5 años dependiendo del motor en el que se instalara (EEAE, 2015). Cuanto mayor es la potencia, menor es el tiempo de retorno, por lo que se recomienda realizar esta medida empezando por los motores de mayor potencia.

Las mejores oportunidades de ahorro se consiguen en las máquinas que operan a carga parcial durante grandes periodos de tiempo. El uso de esta tecnología aporta otros beneficios adicionales, como son la mejora de la calidad del producto y fiabilidad del sistema, o la prolongación de la vida de los equipos.

Para definir el equipo más adecuado para resolver una aplicación de variación de velocidad, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos: tipo de carga, tipo de motor, rango de funcionamiento con un análisis de la velocidad máxima y mínima para verificar la necesidad de refrigeración por ventilación forzada del motor, par en el arranque, aplicación multimotor, condiciones ambientales, consideraciones de la red y de la aplicación, etc.

Un ejemplo de aplicación en una EDAR es la instalación de variadores de velocidad en las bombas de cabecera donde se puede reducir la potencia absorbida por la misma en los períodos de menor demanda de caudal. Se trata de una manera más eficiente de regular el caudal en comparación con aquél mediante estrangulamiento de la válvula. Además de los beneficios citados anteriormente cabe destacar el menor desgaste ya que los esfuerzos sobre los rodets disminuyen proporcionalmente, concretamente al cuadrado de la velocidad. Se reducen los ruidos y vibraciones siempre que el punto de funcionamiento sea el óptimo y se mantenga dentro de un rango de operación establecido. El variador debe ajustarse a las características del motor que accione la bomba ya que, por el contrario, puede correrse el riesgo de provocar un fallo prematuro de la instalación.

De esta manera se consigue un ahorro energético bastante importante, que se puede situar entre un 10% y un 20% del consumo, dependiendo del diseño y del tipo de

bomba, así como del funcionamiento de los equipos. La inversión es reducida y el período de retorno se sitúa alrededor de los tres años.

En la EDAR La Cartuja (Zaragoza) se está dotando de variadores de frecuencia a diferentes elementos, tales como las bombas de entrada, el bombeo de las aguas residuales de la margen izquierda del Ebro, las torres de refrigeración, el ventilador de fluidificación del horno de incineración y las bombas del circuito de refrigeración, para ajustar la potencia, y por lo tanto el consumo eléctrico, a los caudales reales del proceso. El ahorro de energía calculado es de $885.000 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$ (iAgua, 2015).

En la EDAR La Hoya (Murcia) se procedió a la instalación de un variador de frecuencia en la soplante y en uno de los grupos de presión con lo que se redujo el consumo energético en $210.239 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$ (un 27%) y en $3.412 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$ (un 19%) respectivamente. El periodo de retorno de la inversión en el primer caso es de 2 años mientras que en el segundo es de 7 años (González y Moreno, 2009).

4.5 MEJORAS EN EL FACTOR DE POTENCIA DE LOS EQUIPOS

Previamente a la definición de las diferentes potencias que entran en juego en un suministro eléctrico se va a representar gráficamente dichas magnitudes para que sea más fácil la comprensión de las mismas. Una forma gráfica de representarlas es mediante el triángulo de potencias donde gracias a la trigonometría se obtendrán las diferentes expresiones para su cálculo.

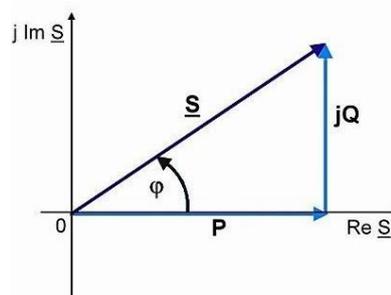


Figura 27. Triángulo de potencias.

Mientras que en el eje de abscisas queda representada la potencia activa, P , medida en W , en el eje de ordenadas se representa la potencia reactiva, jQ , medida en Var . Por trigonometría se deduce que la potencia aparente, S , es la suma vectorial de la dos potencias anteriores y se mide en VA .

Ahora se procede a definir las para apreciar la diferencia. La potencia activa es la capacidad que tiene la máquina de transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía, ya sea lumínica, calorífica o mecánica. Para poder hacer el cálculo de la misma hay que hacer uso de la siguiente expresión:

$$P(W) = V(V) * I(A) * \cos \varphi \quad (16)$$

Donde:

P: potencia activa en vatios, W.

V: tensión en voltios, V.

I: intensidad en amperios, A.

Cuando esta fórmula se aplica en un sistema monofásico, las magnitudes de potencia activa son elevadas por lo que se utiliza el kW.

En cuanto a la potencia reactiva, no es una potencia consumida por la instalación, es decir, no va a producir trabajo útil sino que su función es crear campos magnéticos en los devanados o bobinas de los motores. Para la creación de estos campos magnéticos, estos receptores de tipo inductivo toman la energía de la red y a su vez la devuelven, de ahí el concepto de que no produzcan trabajo útil y es debido a la resultante que es nula. Todo ello produce sobrecargas y caídas de tensión mayores en las líneas de distribución eléctrica que es penalizado por las compañías eléctricas. La expresión para la obtención de la potencia reactiva es la siguiente:

$$Q(VAr) = V(V) * I(A) * \sin \varphi \quad (17)$$

Donde:

Q: potencia reactiva en voltiamperios reactivos, VAr.

V: tensión en voltios, V.

I: intensidad en amperios, A.

Cuando esta fórmula se aplica en un sistema monofásico, las magnitudes de potencia reactiva son elevadas por lo que se utiliza el kVAr.

Finalmente, la potencia aparente es la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva y su fórmula es la siguiente:

$$S(VA) = V(V) * I(A) \quad (18)$$

Donde:

S: potencia aparente en voltiamperios, VA.

V: tensión en voltios, V.

I: intensidad en amperios, A.

De igual manera que en las potencias anteriores si se trata de un sistema monofásico, las magnitudes de potencia aparente son elevadas por lo que se utiliza el kVA.

A igualdad de tensión, la intensidad del circuito aumenta a medida que aumenta la potencia aparente, y por consecuencia, el consumo.

El factor de potencia, φ , se define como la relación existente entre la potencia activa (kW) y la potencia aparente (kVA) e indica la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para la producción de trabajo útil.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (19)$$

Cuanto menor sea la componente de potencia reactiva (ver triángulo de potencias), menor será el ángulo φ , y por consiguiente, la potencia aparente tenderá a igualarse con la potencia activa, es decir, que la potencia deberá producir trabajo útil, y eliminar al máximo posible la componente de energía reactiva.

Un factor de potencia bajo, como el producido por las cargas inductivas, por ejemplo en los motores de inducción, supone pérdidas en los conductores, grandes caídas de tensión, incrementos de potencia en las instalaciones y transformadores y reducción considerable de su vida útil y todo ello debido a la mayor intensidad de corriente. A lo anterior también hay que añadir el sobrecoste de la energía debido a la penalización por energía reactiva en la facturación eléctrica ya que si el factor de potencia es inferior a 0,9 se aplica un recargo mientras que si es superior supone una bonificación. En caso de encontrarse dicha magnitud entre ambos valores no repercute en la factura eléctrica.

Una forma de conseguir que el factor de potencia supere los 0,9 para que al menos no nos suponga un sobrecoste en facturación es mediante la instalación de condensadores fijos o mediante una batería de condensadores que realice una regulación automática del factor de potencia compensando así la energía reactiva consumida por los motores. Nótese que la instalación no puede alcanzar en ningún momento la condición capacitiva (ITC-BT-43, 2002).

En el caso de condensadores fijos, éstos pueden ser de accionamiento manual, semiautomático (por medio de un contactor) o directo, conectado a los bornes de un receptor.

- Condensadores fijos directos o manuales

Para instalaciones que tengan un consumo de energía reactiva constante, para compensación de transformadores de MT/BT y para compensación de motores (puede presentar problemas de autoexcitación).

- Condensadores fijos semidirectos (conjunto de condensador y contactor)

Para compensación de motores (evita el problema de la autoexcitación) y para instalaciones que puedan estar tiempo sin carga y cuando se conecta ésta es constante (por ejemplo: alumbrado público).

- Equipos de regulación automática de energía reactiva (baterías automáticas)

Para compensar la totalidad de una instalación, o partes de la misma que no funcione simultáneamente, se deberá realizar una compensación automática. Un equipo de compensación automático debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia de reactiva de la instalación para conseguir mantener el $\cos \phi$ objetivo de la instalación.

El funcionamiento de una batería de condensadores es el siguiente: almacena el flujo de energía reactiva, creando una componente “negativa” en el eje de abscisas del triángulo de potencias, y por lo tanto, se reduce el valor de la componente reactiva, aproximando el factor de potencia a la unidad.



Figura 28. Ejemplo del cuadro de una batería de condensadores (Tessai, 2011).

Las características de la instalación a optimizar son las que influyen en la determinación del número y tipo de baterías a utilizar. Mientras que en un suministro de baja tensión se colocarán las baterías de condensadores en paralelo a la carga, en un suministro de alta tensión hay, además, que instalar un condensador fijo para la compensación del transformador.

Existen distintas formas de compensar la energía reactiva ya sea por bloques o individualizada, esta última requiere de condensadores de diversas capacidades por lo que supone un mayor coste. La amortización de estos equipos requiere de poco tiempo pues el ahorro en el complemento por energía reactiva es bastante significativo.

Al corregir el factor de potencia son varios los beneficios que se obtienen: se reduce el gasto en la factura eléctrica, se reducen las caídas de tensión y se protege la vida útil de las instalaciones. Asimismo, un factor de potencia alto supone una mayor eficiencia en el transporte de la energía.

Un ejemplo de aplicación en una EDAR es en aquellas partes de la instalación que cuenten con varias bombas que sufren variaciones de trabajo importantes debido al caudal. En estos equipos es recomendable el uso de bancos de baterías automáticos, así los condensadores se conectan o desconectan según la situación de marcha/paro de los motores.

En EDAR Martorell (Barcelona) la compensación de energía reactiva ha supuesto un ahorro económico de $8.227 \text{ €} \cdot \text{año}^{-1}$ (ACA, 2011).

4.6 ACTUALIZACIÓN Y/O MEJORA DE LA INSTALACIÓN

4.6.1 TELEGESTIÓN

Hasta ahora, en muchas depuradoras, el control de los procesos se efectúa través de un autómatas, PLC o controlador lógico programable gracias a un conjunto de consignas de funcionamiento de los diversos equipos electromecánicos. Dichas consignas programables son cualitativas del proceso de tratamiento de aguas de la EDAR, pero no consideran aspectos energéticos y de eficiencia energética. En muchas de ellas, no existe un sistema de medida y control de la electricidad consumida y otros parámetros energéticos complementarios.

Con la finalidad de adecuar el funcionamiento de una EDAR a parámetros de ahorro y eficiencia energética, se puede plantear el implementar una mejora consistente en la instalación de unos sistemas de telegestión energética. Estos sistemas contemplan la integración de datos con un conjunto de diferentes analizadores de redes eléctricas que permiten la obtención de información, en tiempo real, de los consumos y parámetros eléctricos, gestionando la energía de la mejor forma posible a los requerimientos de los procesos de depuración y con los siguientes objetivos específicos:

- Mejorar la gestión de la energía y de su eficiencia.
- Obtener un ahorro económico derivado de la correcta gestión energética.
- Reducir la discontinuidad del servicio de las instalaciones.
- Obtener un diagnóstico de la calidad del suministro eléctrico.
- Disponer de un mantenimiento preventivo de las líneas e instalaciones eléctricas.
- Imputar los costes eléctricos a los procesos productivos.
- Optimizar el cambio de tarifa contratada, desplazar cargas de consumo a los periodos más económicos, etc.

La aplicación comprende la instalación de una serie de analizadores de redes instalados en puntos estratégicos, además de centralitas de diferenciales, de un ordenador de control y de una red de comunicación en fibra óptica o de otro tipo.

Un ejemplo práctico de aplicación es en la EDAR de Martorell (Barcelona) donde con la implantación de un sistema de telegestión en el año 2011 se ha mejorado la gestión energética de la instalación y ha supuesto un ahorro económico total del 8,6% respecto del consumo inicial sin la implementación de la mejora que permitió recuperar la inversión en menos de un año.

Midiendo el consumo durante los 12 meses posteriores a la implantación de la mejora, período comprendido entre el mes de septiembre del año 2011 y el mes de agosto del año 2012, se ha observado una disminución del consumo de energía de la EDAR de Martorell (Barcelona) y Estación de Bombeo de $96.745 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$ con una reducción del ratio energético $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de agua tratada del 8,5%.

Un control puntual de los consumos energéticos de los equipos electromecánicos y la detección de las desviaciones de determinados parámetros eléctricos medidos (intensidad y tensión principalmente), permite adoptar un programa de mantenimiento

predictivo de detección prematura de averías, lo que permite reducir el número de posibles averías y alargar la vida útil de los equipos.

Con la implantación del sistema de telegestión en la EDAR de Martorell (Barcelona), se ha mejorado la gestión energética de la instalación y ha supuesto un ahorro económico de $18.869,12 \text{ €}\cdot\text{año}^{-1}$ que ha permitido recuperar la inversión en menos de un año (ACA, 2013).

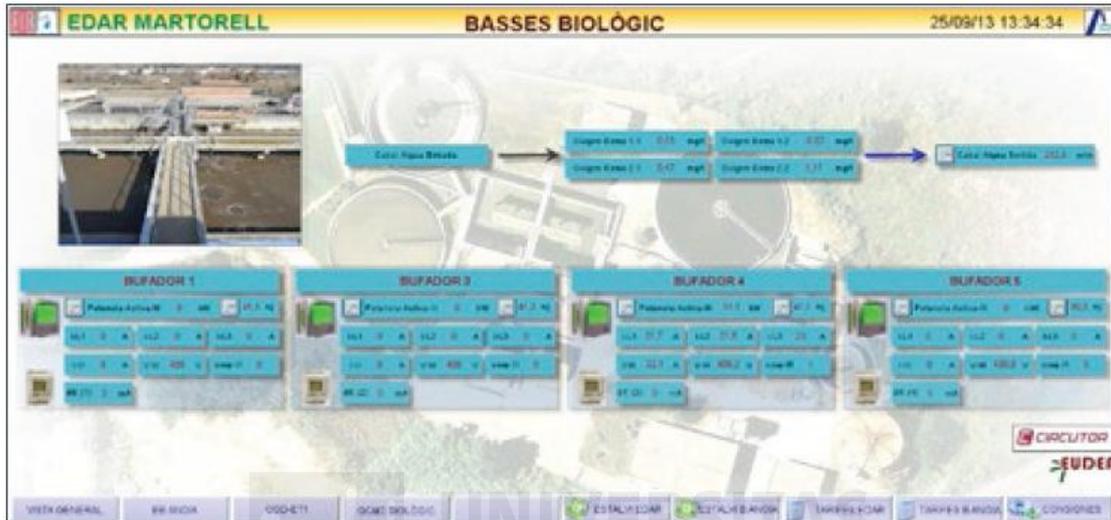


Figura 29. Vista general del software de adquisición, supervisión y control de energía en la EDAR de Martorell (Barcelona) (ACA, 2013).

Otro ejemplo de la implantación de la telegestión es en EDAR Murcia Este (Murcia) que repercutió en un ahorro de $42.240 \text{ €}\cdot\text{año}^{-1}$ (Rodríguez, 2013).

4.6.2 SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO PARA AIREACIÓN EN EL REACTOR BIOLÓGICO

La influencia de la implantación de un sistema de control en la aireación del reactor biológico de una EDAR es decisiva tanto en el aspecto de la calidad del efluente como en el aspecto energético ya que su principal función es el control de marcha/paro de los equipos de aireación siempre en las condiciones de funcionamiento óptimo y desde el punto de vista de ahorro energético.

Secuencialmente los sistemas de control han ido evolucionando desde los primeros que se basaban en temporizaciones de marcha y paro de los equipos, dando paso después al control por oxígeno seguido de control mediante redox, hasta la aparición de sondas de

amonio, nitratos y fósforo fiables y de coste asequible para las presentes exigencias de calidad. Gracias a ello se han implantado actualmente sistemas de gran complejidad y potencia que suponen una revolución en el sector del tratamiento de aguas.

Actualmente, algunas de las grandes estaciones depuradoras cuentan con sistemas de control automatizados mientras las pequeñas depuradoras debido a la poca carga entrante siguen maniobrando en sus reactores con temporizaciones de marcha/paro.

Existen diversos sistemas de control comerciales o de producción propia que se mencionan a continuación pero ha de tenerse en cuenta que el efecto que produce un sistema de control disminuyendo el ratio energético es difícil extrapolarlo a otra planta debido a las variaciones en caudal o carga contaminante, entre otros aspectos.

Aunque el coste de implantación de este tipo de medidas es elevado los ahorros de energía que se pueden llegar a obtener son muy altos.

PLATAFORMA ATL_EDAR

Se trata de un sistema de control informatizado desarrollado por Sisltech basado en el conocimiento que diagnostica en tiempo real el estado de funcionamiento de una Estación Depuradora de Aguas Residuales. Este sistema de control parte de la base de que se pueden instalar diferentes módulos de control conjuntamente: módulo de control de la aireación para optimizar la eliminación de nutrientes, módulo de control de la edad de fango, módulo de control del funcionamiento y mantenimiento de los equipos, etc. El módulo de ayuda a la toma de decisiones de la plataforma ATL_EDAR lleva a cabo la recogida, integración y proceso de los resultados de los módulos anteriores, y permite la generación y envío de informes sobre los procesos (Sisltech, 2012).

Como ejemplo, una de las instalaciones donde está implantado es en la EDAR de Caravaca (Murcia), que presenta una mayor estabilidad de carga de entrada, se ha conseguido mantener constante el ratio eléctrico entre 0,55-0,60 kWh·m⁻³, además de reducir el importe de las facturas eléctricas al desplazar un porcentaje del consumo del periodo punta a periodos de tarificación más económica (Simón et al., 2012).

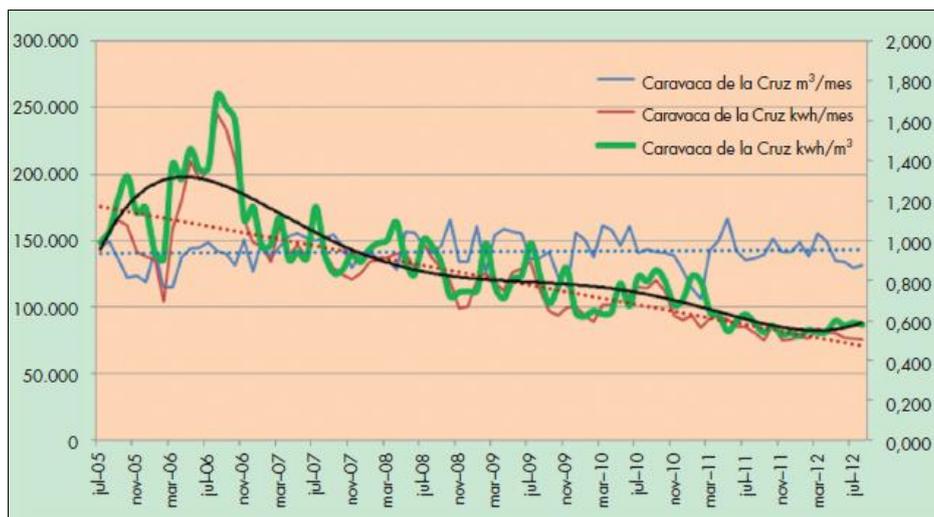


Figura 30. Gráficos de evolución del ratio eléctrico en EDAR Caravaca de la Cruz (Murcia) (Simón et al., 2012).

En EDAR Murcia Este (Murcia) se procedió a la instalación de un sistema de control avanzado de la aireación mediante control de aporte de oxígeno, por consignas combinadas de amonio y nitratos ATL_EDAR cuya inversión fue de 50.995 € y supone un ahorro energético de $186.572 \text{ kWh}\cdot\text{año}^{-1}$ y, por tanto, un ahorro económico de $15.190,88 \text{ €}\cdot\text{año}^{-1}$. El periodo de amortización quedó pues establecido en 3,3 años (Rodríguez, 2013).

SISTEMA NIPHO

Para el funcionamiento de este sistema se cuenta con sonda de pH, además de las sondas redox y de oxígeno, para el marcha/paro de la aireación. La sonda de pH mide hasta los mínimos cambios de pH que se producen en cada etapa de depuración alternada en el reactor, es decir, nitrificación, desnitrificación, liberación de fósforo y asimilación del mismo, y cuyo control nos interesa para la optimización de la eliminación de nutrientes. En la siguiente figura se observan las alternancias generadas en el sistema NIPHO de forma automática, en los parámetros de control: oxígeno disuelto en rojo, potencial redox en azul, y pH en biológico en amarillo.

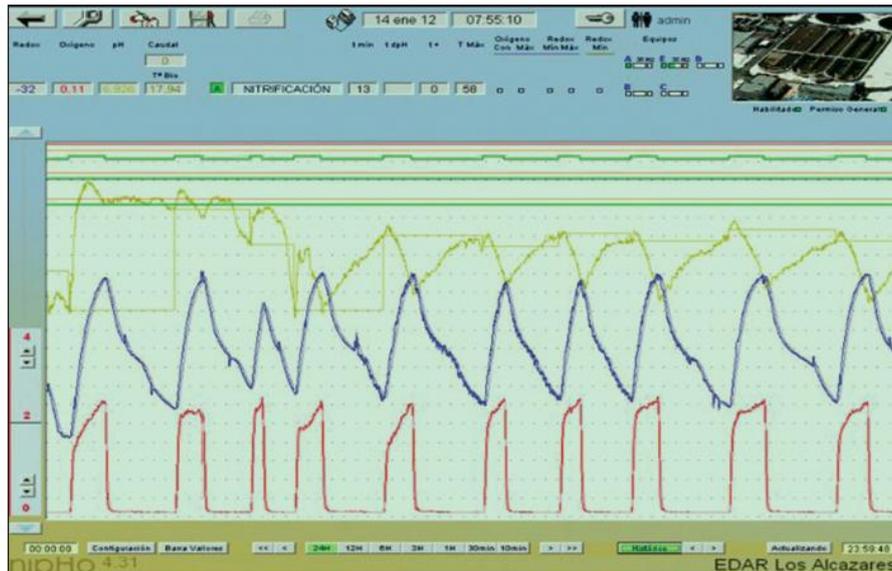


Figura 31. Gráfica de evolución de parámetros y ciclos del sistema NIPHO (Simón et al., 2012).

El comienzo de la aportación de aire lo fija un cambio establecido de pendiente del pH o en su defecto un valor redox, siempre después del periodo de desfosfatación, que como en el caso anterior, es un porcentaje del tiempo total de ciclos de nitrificación-desnitrificación. El PID ha de mantener una consigna de oxígeno durante el periodo de aireación actuando sobre el variador de la soplante.

El final de la aireación lo fija otro cambio de pendiente del pH o un valor determinado de oxígeno.

En el periodo de nitrificación el programa dispone de tiempos máximo y mínimo, valor redox máximo y mínimo, valor de oxígeno a mantener y valor máximo de oxígeno que para la aireación. En cuanto al periodo de desnitrificación dispone de tiempos máximo y mínimo, un valor mínimo del redox y un porcentaje de desfosfatación. Con todo ello, se logra un agua con mínimas cantidades de nutrientes.

Una de las instalaciones en que está funcionando este sistema es en EDAR Los Alcázares (Murcia). Esta planta vierte indirectamente al Mar Menor, calificado como zona sensible. En ella se dosifica también, sulfato de alúmina en el efluente para garantizar que los valores de fósforo no sobrepasen en ningún momento los límites de la autorización de vertido. Con esta situación, el funcionamiento del sistema NIPHO ha sido capaz de reducir la cantidad de reactivo necesario para precipitar el fósforo, además de lograr un ajuste en el ratio eléctrico.

Entre los beneficios obtenidos destacan el mantenimiento de un ratio eléctrico constante, el pasar de un ratio promedio de $0,59 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ sin NIPHO a $0,39 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ con sistema NIPHO, la reducción del consumo de sulfato de alúmina para la

precipitación del fósforo, pasando de consumos promedio de reactivo de 25.000 Kg·mes⁻¹ de producto comercial con riqueza del 8,25%, a consumos mensuales de 5.000 Kg de reactivo, reducción del 80% del consumo, lo que supone unos 30.000 €·año⁻¹ de ahorro (Simón et al., 2012).

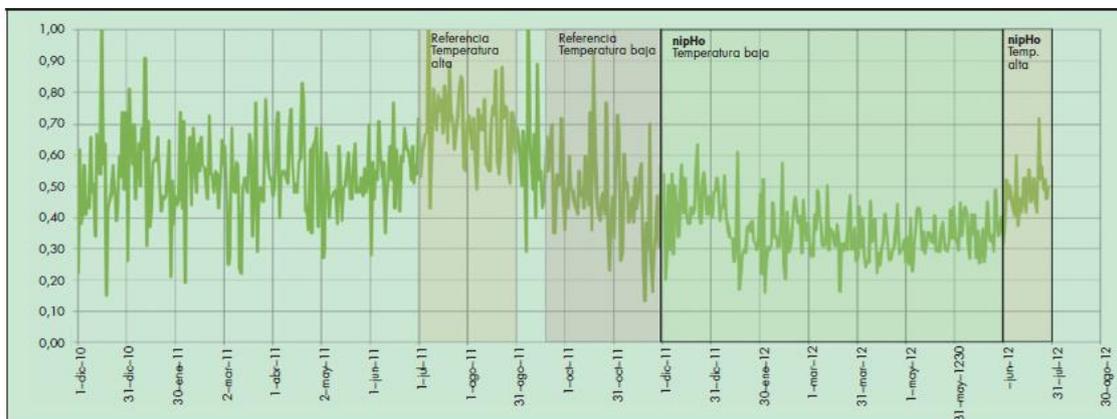


Figura 32. Gráfico evolución del ratio eléctrico (kWh·m⁻³) en la EDAR de Los Alcázares (Murcia), donde la parte final es ya con sistema NIPHO (Simón et al., 2012).

SISTEMA ACN+

Este sistema está dirigido preferentemente a aquellas plantas con eliminación de nutrientes que buscan el ahorro energético. Además presenta la posibilidad del desplazamiento del consumo a periodos tarifarios más baratos. Se deja constancia en el sistema de los periodos de tarificación eléctrica y en ellos, se establecen unos niveles de N-NH₄ para controlar la aireación. Se fijan unos niveles máximo y mínimo y con ellos un umbral, este último controlará que no haya exceso de aireación, de manera que una vez se sobrepase el umbral el sistema calcula la pendiente de la curva redox, cuando la tangente es cero, o sea, la curva es plana, esto identifica que la nitrificación ha finalizado, por lo que a partir de ahí todo el aire es en exceso. Gracias a esta detección rápida y segura del cambio de pendiente este sistema ofrece una gran estabilidad.

Tabla 5. Consignas de N-NH₄ para cada periodo de tarifa eléctrica (Simón et al., 2012).

Control basado en NH ₄			
Tarifa	NH ₄ Max	NH ₄ Min	NH ₄ Umbral
1	6,75	3,50	3,75
2	6	2,75	3,00
3	5,5	2,25	2,50
4	6,75	2,75	3,75
5	6	2,00	3,00
6	5,5	2,00	2,50
2	6	2,75	3

En cuanto al mantenimiento de las sondas de amonio y redox, ya sea limpieza, calibración y estado de las mismas, el propio programa controla y emite alarmas y avisos.

El conjunto del sistema ACN+ y la medición redox y amonio en continuo tiene sus ventajas como la fijación de los ciclos de aireación para garantizar la calidad del agua, la modificación de los mismos y de las consignas de aireación en función del precio de la energía, el ajuste de la aportación de oxígeno, el aprovechamiento máximo de los nitratos como fuente de oxígeno molecular, etc.

En 2012 fue instalado en la EDAR de Jumilla (Murcia) donde se consiguió una reducción de la facturación de energía en torno al 15% (Simón et al., 2012).



Figura 33. Gráfica de evolución de parámetros y ciclos del Sistema ACN+ (Simón et al., 2012).

SISTEMA ADEX

Las siglas ADEX, en inglés, provienen del nombre Control Adaptativo Predictivo Experto. Se trata de un método de control mejorado en comparación con un sistema convencional con control por PID que facilita el ajuste de diversos parámetros de control, oxígeno disuelto, redox, presiones, entre otros, proporcionando valores más cercanos al valor de consigna. El controlador ADEX dispone de un mecanismo de adaptación que identifica en tiempo real la dinámica del proceso y auto-ajusta sus parámetros cuando las condiciones de operación o la dinámica del proceso varían, evitando que el rendimiento de control se deteriore; predice, guía y estabiliza en la

forma deseada la evolución de las variables del proceso, y personaliza su configuración para cada dominio de operación del mismo con la finalidad de alcanzar el rendimiento óptimo. Con ello se evitan los excesos de aireación ya que a mayor ajuste de los parámetros la optimización será más efectiva y se consigue reducir el consumo energético entre 15% y 23% (ADEXCOP, 2015). En este sistema las consignas las fija el operador basándose en su experiencia y adaptándose en cada momento a las condiciones variables de la EDAR por lo que el trabajador debe tener un conocimiento absoluto del sistema.

Este sistema se puso en funcionamiento temporalmente en EDAR Ceutí (Murcia) para la realización de un estudio donde se obtuvieron unos resultados sobre el control de la aireación fiables y estables, pues el objetivo principal era la estabilización del reactor debido a los episodios de vertidos incontrolados en la zona (Simón et al., 2012).

El sistema de control de la aireación implementado en EDAR Prat (Barcelona) ha permitido reducir en un 35% el consumo energético relacionado con el aporte de aire al sistema biológico, manteniendo los parámetros de calidad, reducir en un 33% el ratio de consumo por m³ de agua tratada (de 0,133 a 0,09 kWh·m⁻³) en un escenario de disminución de un 3,7% el caudal global de tratamiento, entre otras (Aguiló et al., 2013).

SISTEMA DE CONTROL POR LÓGICA DIFUSA O FUZZY

Con este sistema se tienen dos niveles de control, uno supervisor y otro de proceso. El nivel de control de proceso tiene normas independientes de control tanto para las variables del proceso en sí, como el oxígeno disuelto y la presión de descarga de las soplantes. En cuanto al nivel de control supervisor, su función es establecer la señal óptima de consigna de presión en las soplantes según las necesidades instantáneas de oxígeno, de forma que las válvulas se mantengan en todo momento en modo de máximo paso de flujo, lo que se conoce como estrategia most open valve (MOV), así la presión a mantener será la mínima posible, consiguiendo pues el ahorro en consumo energético.

El funcionamiento de este sistema es el siguiente. Se controla la apertura de la válvula de regulación de caudal de aire que llega a los difusores en relación con la concentración de oxígeno disuelto existente en el reactor biológico. El dispositivo encargado de la presión modificará la velocidad de giro del motor de la soplante en función de la presión requerida. Con ello se consigue evitar excesos o defectos de oxígeno según el nivel de carga.

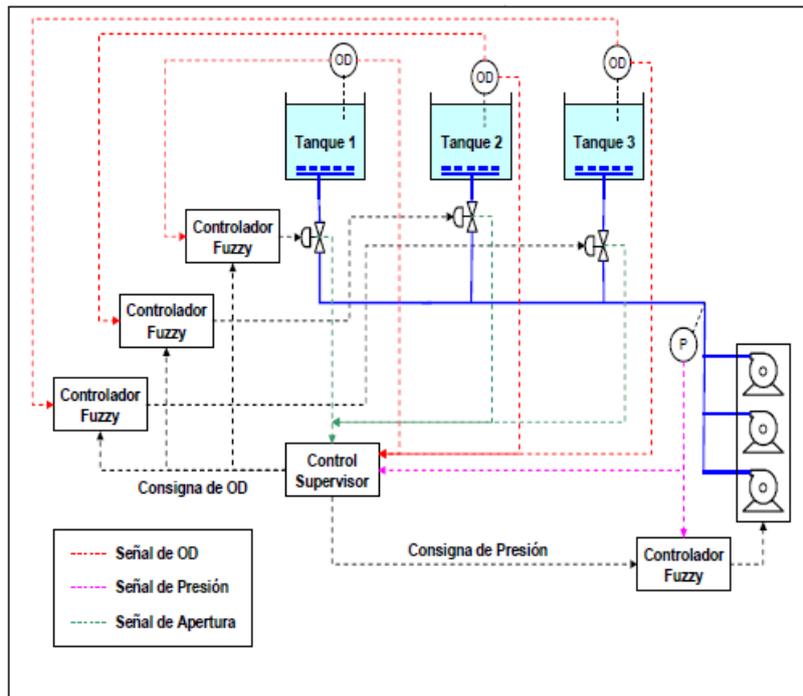


Figura 34. Esquema ejemplo de funcionamiento de un sistema de aireación mediante lógica difusa o fuzzy (Empresa General Valenciana del Agua SA, EGEVASA, 2015).

Algunos de los beneficios de este sistema son la estabilización del proceso, el ajuste continuo tanto de válvulas como de las soplantes lo que permite minimizar los requerimientos de aire, establecimiento del control de oxígeno para cada sección de la aireación de manera que sólo trabaje un grupo de soplantes, menor producción de fango, entre otros. Resulta pues interesante su aplicación en plantas con tratamientos diseñados en base a flujo pistón, con zonas de tratamiento claramente diferenciadas.

Un ejemplo de aplicación es en la EDAR Molina de Segura (Murcia) en el año 2012 donde se consiguió el ajuste de la aireación en función de la carga, pues es una zona de continuos vertidos industriales lo que influye en constantes modificaciones de carga. Con ello se estabilizó el proceso de tratamiento biológico y se lograron unos resultados de eliminación de nutrientes satisfactorios (Simón et al., 2012).

4.6.3 ADECUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS A LA DEMANDA REAL DEL SISTEMA

En el caso de algunas de las EDARs, las instalaciones están sobredimensionadas y por consiguiente, los equipos implantados. Quizá porque se construyeron en un momento en que las previsiones de población eran muy superiores a las que se tienen actualmente o

por otros motivos, de manera que la maquinaria implementada como por ejemplo aquellos equipos que trasiegan el agua residual o los equipos de aireación, trabajan con un caudal real inferior al de diseño. Una solución asociada a la optimización de las plantas de tratamiento con equipos sobredimensionados, aunque difícil de conseguir, sería la laminación de caudales ya que con ello se podría alcanzar un buen funcionamiento de los distintos procesos de la EDAR (pretratamiento, aireación, decantación, desinfección,...)

En la siguiente figura se representa, a modo de ejemplo, el rendimiento de dos bombas de agua bruta de una EDAR, la instalada inicialmente cuya potencia es de 35 kW y el equipo montado a posteriori con una potencia menor, de 13,5 kW (Simón et al., 2012).

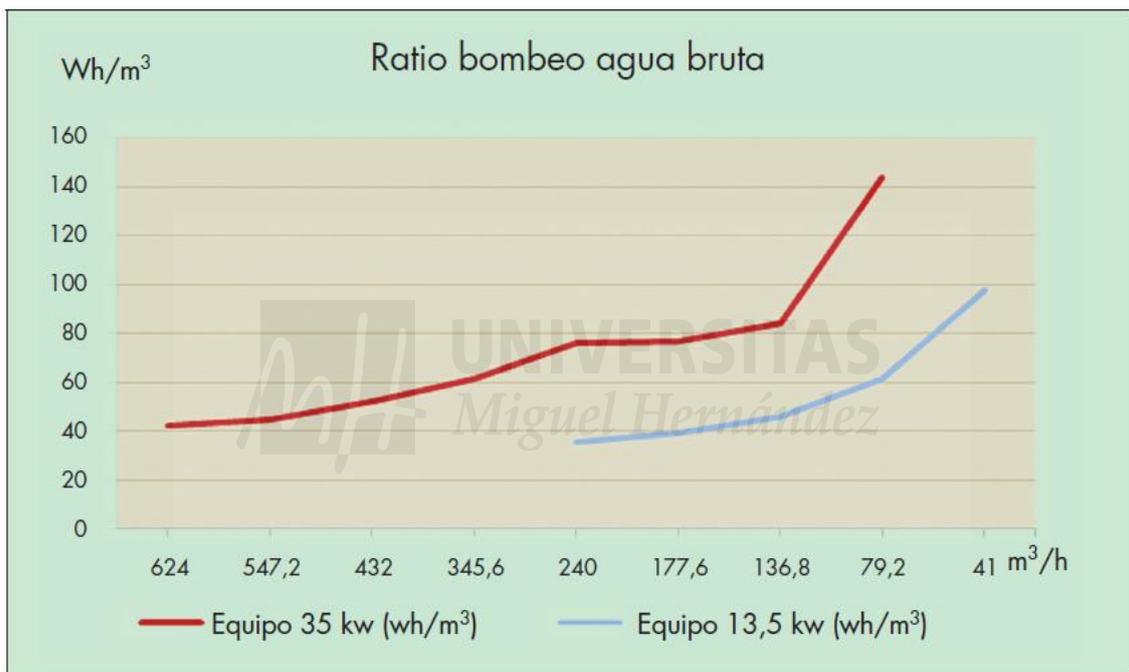


Figura 35. Rendimiento de dos bombas en función del caudal impulsado (Simón et al., 2012).

Se observa pues la diferencia de rendimiento entre ambos para el rango de caudal seleccionado por la explotación (200-240 m³·h⁻¹) para laminar el caudal y optimizar así los procesos posteriores. Esto hace que la inversión en el nuevo equipo de potencia inferior sea amortizable muy rápidamente (Simón et al., 2012).

Una vez contemplado lo anterior, habría que plantearse el rediseño de las instalaciones, en este ejemplo los grupos de bombeo con equipos de potencia escalonada para adaptarse sin problema a los caudales punta esperados mientras que a su vez se consigue optimizar diariamente el consumo energético ya que se operan con equipos de potencia menor y que trabajan en su punto de funcionamiento óptimo.

4.6.4 MODULARIDAD DE LA INSTALACIÓN

Es beneficioso que la instalación disponga de diversos equipos de menor potencia para así poder adaptarse a la variabilidad de la carga de entrada aunque suponga un mayor coste a priori, antes que contar con un único equipo cuya potencia sea mayor. Este sobrecoste se verá amortizado rápidamente durante la fase de explotación de la EDAR.

Un ejemplo de aplicación es en el reactor biológico, donde lo más conveniente es que existan varias líneas de tratamiento, llegando a incluir alguna de tamaño inferior para adecuar el uso de las mismas y sus correspondientes equipos electromecánicos según las características de la carga entrante.

Otra aplicación importante aunque no sea uno de los procesos de mayor consumo en la planta de tratamiento es el proceso de desodorización donde lo más ventajoso es disponer de varios equipos de menor potencia instalados en cada uno de los edificios (pretratamiento, deshidratación, espesador de fangos y tolva de almacenamiento). Así se pueden conectar de manera independiente según la demanda del proceso.

En EDAR Gijón Este (Gijón) los actuales decantadores lamelares permiten obtener los rendimientos deseados, conseguir, gracias a su compacidad, una menor ocupación de terreno y reducir, gracias a la modularidad, el consumo energético (Degremont, 2012).

4.6.5 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE EN EL REACTOR BIOLÓGICO

El proceso de aportación de oxígeno, como se ha desarrollado anteriormente, representa una gran parte del consumo de energía en las plantas de aguas residuales. El oxígeno se requiere en etapas como la preaireación, homogeneización, tratamiento biológico, desnitrificación, postaireación y tratamiento aeróbico de fangos. Una medida para ahorrar energía sería, por ejemplo, mediante el cambio de los equipos de aportación y distribución de oxígeno.

En la siguiente tabla se presentan los consumos específicos de energía en $\text{kWh} \cdot \text{kg}_{\text{DBO5}}^{-1}$ para distintas tipologías con respecto a la tecnología en depuración de aguas.

Tabla 6. Consumos específico estándar de diferentes tecnologías de depuración de aguas residuales (Velázquez, Bueno y Martel, 2006).

TECNOLOGÍA	ENERGÍA kWh/KgDBO ₅
Aireación prolongada	2 – 4
Fangos activados convencionales	1 – 3
Lagunas aireadas	0,5 – 1
Filtros percoladores de alta carga	0,2 – 0,3
CBR	0,06 – 0,1
Filtros percoladores de baja carga	0 – 0,1
Lagunaje	0 – 0,05

Entre los equipos cuya función es la aportación de oxígeno al agua residual existen dos tipos muy representativos: los de difusión de aire y los de aireación mecánica por agitación, agitadores. El modo de funcionamiento de los difusores se basa en la distribución del aire mediante inyección del mismo bajo presión por la parte inferior de la superficie libre de fluido. Los medios para su aplicación son porosos siendo energéticamente más eficientes los de burbuja fina (de 2 a 5 mm) que los de burbuja gruesa (> 10 mm).



Figura 36. Detalle de un disco difusor.

Una manera sencilla de medir el rendimiento de los difusores y así minimizar el caudal de aire a aportar a un proceso biológico manteniendo la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos es mediante el valor de SOTE (%) que es la cantidad de oxígeno transferido dividido por la cantidad de oxígeno en el aire. Este valor depende primordialmente del caudal de aire alimentado a cada difusor ($\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) de manera que conforme aumenta éste, disminuye la eficacia de transferencia (burbuja más gruesa y mayor pérdida de carga). Interesa pues disponer de un número elevado de difusores para operar en condiciones entre 1,5 y 2 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ por difusor (Simón et al., 2012).

Los agitadores por su parte pueden estar posicionados vertical y horizontalmente, y los primeros, a su vez, pueden estar sumergidos o en la superficie.



Figura 37. Ejemplo de un agitador.

En la actualidad se está procediendo a implantar sistemas de agitación mixtos, esto es, combinación de sistemas de difusión de aire con una agitación mecánica gracias a hélices sumergidas. Un beneficio importante de estos sistemas es que la aportación y transferencia de oxígeno es máxima debido a las pequeñas burbujas y a la distribución óptima de dichas burbujas. El ahorro energético se puede estimar entre un 10% y un 40%. Por contra, la implantación de estos equipos supone una elevada inversión además de complejidad, los costes de explotación son elevados dadas las limpiezas frecuentes a realizar.



Figura 38. Ejemplo de un agitador-aireador.

En la EDAR Murcia Este (Murcia) se sustituyeron dos agitadores con mal rendimiento por otros dos equipos de alta eficiencia. Supuso una inversión de 25.000 € con un ahorro reportado de 147.138 €·año⁻¹ y con ello un ahorro económico de 11.980,12 €·año⁻¹. Su periodo de amortización es de 2,1 años (Rodríguez, 2013).

4.7 MEJORAS EN ILUMINACIÓN

El Documento Básico DB HE3 “Eficiencia energética en las instalaciones de iluminación” establece los requisitos de iluminación desde el punto de vista de la eficiencia energética.

Los edificios deben disponer de una iluminación adecuada en función de las necesidades de los usuarios y las instalaciones de iluminación deben ser energéticamente eficientes. Entre algunas de las medidas que se desarrollarán a posteriori se encuentran el contar con un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, además de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural en las zonas que reúnan una determinadas condiciones, entre otras.

Las instalaciones de iluminación tienen distintos objetivos en función de si se trata de la iluminación del interior de los edificios o si se trata de iluminación de viales o zonas al aire libre y a la vez del uso que se da a la zona o espacio iluminado.

En cualquier caso las instalaciones de iluminación deben proporcionar un entorno visual adecuado, según el uso o actividad del espacio a iluminar. Pero se puede proyectar un sistema de iluminación adecuado de varias formas y de forma específica con distintos equipos, con mayor o menor potencia, que se traduce en un mayor o menor consumo de energía.

En industria, la iluminación es una instalación importante. En nuestro caso concreto de plantas de tratamiento de aguas residuales se trata de instalaciones multisectoriales debido a la gran repercusión de los consumos.

Un sistema de alumbrado está constituido por los siguientes elementos: luminarias, lámparas y equipos auxiliares, soportes, elementos de instalación y protección y finalmente, cuadro de mandos y protecciones.

Los factores que influyen en el consumo de iluminación son los siguientes:

- Potencia instalada.
- Horas de funcionamiento.
- Nivel de iluminación deseado.
- Rendimiento de las lámparas.
- Eficiencia de las luminarias.

- Dispositivos de regulación y control.

Para considerar eficiente el sistema de iluminación desde el punto de vista energético este debe cumplir una serie de objetivos como son mayor eficiencia energética, reducción de emisiones de CO₂ y reducción del resplandor luminoso.

Entre las medidas para la mejora de la eficiencia energética en iluminación figuran las siguientes:

- Aprovechamiento de la iluminación natural.
- Adaptación del nivel de iluminación.
- Sustitución de lámparas y luminarias.
- Sustitución de reactancias electromagnéticas por balastos electrónicos en lámparas fluorescentes.
- Control, gestión y mantenimiento.

En la EDAR La Cartuja (Zaragoza) la instalación de nuevos equipos de iluminación pretende conseguir que, en cada momento, sólo se cuente con iluminación en las zonas de la planta que lo precisen. De esta manera, se ha procedido a la instalación de temporizadores y a la sectorización de la planta, de manera que se ahorre el 50% de la energía que se gasta en iluminación, lo que representa 465.000 kWh·año⁻¹ (iAgua, 2015).

Otro ejemplo de aplicación es en la EDAR La Hoya (Murcia) donde la instalación de un interruptor astronómico supuso un ahorro energético de 5.968 kWh·año⁻¹ que supone un 15% y cuyo periodo de amortización se estableció en 6 meses (González y Moreno, 2009).

En los siguientes apartados se procede a desarrollar cada una de las medidas correctoras expuestas anteriormente para la mejora de la eficiencia energética.

4.7.1 APROVECHAMIENTO DE LA ILUMINACIÓN NATURAL

Si se tiene en cuenta en el momento de diseño de la instalación resulta una de las más sencillas de aplicar. Un ejemplo sería la orientación al norte de naves industriales con el fin de aprovechar más luz natural. Con este fin se suelen diseñar las cubiertas en diente de sierra.

En nuestro caso que la instalación ya está construida podría resultar rentable el evaluar la opción de instalar ventanales, claraboyas o lucernarios pues algunos de los edificios.

4.7.2 ADAPTACIÓN DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN

Una medida importante que se puede llevar a cabo antes, durante y tras la construcción del edificio es el ajuste del nivel luminoso a las necesidades reales de cada zona.

Para ello hay que hacer una identificación de las necesidades de cada zona y adecuación del nivel de iluminación mediante sustitución y eliminación de lámparas.

Esta adaptación se puede seguir adecuadamente en el RD 486/1997 “Disponibilidades mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo”. En este RD se indican las necesidades mínimas de iluminación dependiendo de la exigencia visual del local. La norma 12464-1:2012 también hace referencia a la iluminación de los lugares de trabajo.

4.7.3 SUSTITUCIÓN DE LÁMPARAS Y LUMINARIAS

En la siguiente figura se muestra una comparativa entre las diferentes lámparas de uso industrial.

Tabla 7. Comparativa entre lámparas de uso industrial (EEAE, 2015).

Tipo de lámpara	Potencia (W)	Eficiencia luminosa global (lm/W)	Vida útil (horas)	Tiempo de encendido (min.)
Vapor de sodio alta presión	35 - 1.000	42 - 124	8.000 - 12.000	5 - 10
Vapor de mercurio alta presión	50 - 2.000	32 - 60	8.000	4 - 5
Fluorescentes (balasto convencional)	18 - 58	40 - 79	7.500	Casi instantáneo
Fluorescentes (balasto electrónico)	16 - 50	78 - 94	10.000	Instantáneo
Halogenuros metálicos	70 - 3.500	56 - 100	2.000 - 5.000	3 - 10

A continuación se establecen una serie de recomendaciones generales:

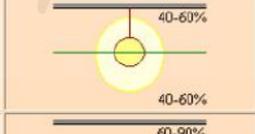
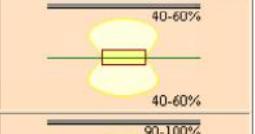
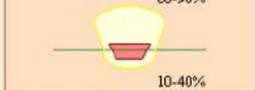
- Las lámparas de vapor de sodio destacan por su alto rendimiento y larga vida útil con respecto a las demás. Se instalarán en edificaciones con techos altos siempre que no se exija una reproducción cromática elevada.
- Generalmente se suelen sustituir lámparas de vapor de mercurio de alta presión por vapor de sodio de alta presión, pues son mucho más eficientes.

- Al abordar la sustitución, además de los criterios energéticos hay que tener en cuenta otros aspectos (p. ej. características mecánicas de las luminarias adecuadas para albergar la nueva lámpara).
- Las lámparas fluorescentes encuentran su aplicación en edificios de altura media ($3 < h < 6$).
- Los halogenuros metálicos tienen elevado coste pero muy buena reproducción cromática. No se suele hacer uso de ellos en el sector industrial.

Como queda patente cada lámpara tiene su ámbito de aplicación y además de los criterios energéticos se han de tener en cuenta los costes, la reproducción cromática, etc. Los criterios a tener en cuenta a la hora de escoger una lámpara son los siguientes: coste, índice de reproducción cromática, vida útil, grado de emisión de calor, tiempo de estabilización del flujo luminoso, dimensiones y facilidad de la instalación.

También hay que considerar en la sustitución de luminarias el elemento donde va alojada la lámpara. La función de este elemento es distribuir la luz y evitar deslumbres.

Tabla 8. Diferentes elementos de alojamiento de una lámpara (EEAE, 2015).

Directa		Semi-directa	
General difusa		Directa-indirecta	
Semi-directa		Indirecta	

4.7.4 SUSTITUCIÓN DE REACTANCIAS ELECTROMAGNÉTICAS POR BALASTOS ELECTRÓNICOS EN LÁMPARAS FLUORESCENTES

Las lámparas fluorescentes son las más utilizadas para las zonas con necesidad de buena calidad de luz y pocos encendidos (zonas de oficinas).

Es necesario un equipo auxiliar para regular la intensidad de paso. Este equipo auxiliar puede ser de dos tipos. Por un lado una reactancia o balasto convencional (electromagnética). Al ser espiras arrolladas sobre un núcleo producen pérdidas térmicas elevadas. Otro tipo son las reactancias electrónicas. Poseen un sistema de

alimentación a alta frecuencia. Tienen un consumo energético menor debido a la ausencia de inducción.

La idea de esta mejora es la sustitución de los primeros dispositivos por los segundos.

Entre las ventajas de este cambio se tiene que:

- Aumenta un 20-25% la eficiencia del conjunto de la lámpara con los equipos auxiliares.
- Se consigue un mayor número de encendidos y un mejor factor de conservación de las lámparas.
- El encendido es prácticamente instantáneo.
- Hay una menor tensión de encendido.
- El factor de potencia es próximo a la unidad.
- El flujo luminoso tiene una fácil regulación.
- Se elimina el efecto estroboscópico.

4.7.5 CONTROL, GESTIÓN Y MANTENIMIENTO

Para tener una iluminación de calidad el sistema ha de funcionar cuando es necesario y durante el tiempo que es preciso.

Para poder establecer una iluminación de calidad es necesario disponer de un sistema de gestión completo. Este sistema ha de disponer de diferentes tipos de dispositivos:

- Sistemas de control de tiempo: control de encendido según horario (interruptores horarios).
- Sistemas de control de la ocupación: incluye detectores de presencia (pasillos y zonas de servicios).
- Sistemas de aprovechamiento de luz diurna: Fococélulas (encendido en función del nivel de iluminación).
- Sistemas de gestión de la iluminación: Interruptores sectoriales.

4.8 PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE EQUIPOS E INSTALACIONES

Debido al deterioro por desgastes mecánicos, fenómenos de oxidación, incrustaciones inorgánicas y/u orgánicas, etc... el rendimiento de cualquier equipo o elemento de una depuradora se reduce a lo largo de su ciclo de vida útil. Este capítulo plasma la

influencia tan determinante que tiene el mantenimiento de los equipos e instalaciones sobre el buen funcionamiento de los procesos de la EDAR, y sobre su capacidad de optimización energética.

Se puede determinar pues que el objetivo del mantenimiento periódico de equipos e instalaciones se lleva a cabo para asegurar y garantizar el buen funcionamiento de las instalaciones, preservar y mantener los equipos operativos y minimizar los tiempos de paradas y averías.

Entre los diversos mantenimientos existentes, destacan los siguientes de vital aplicación en las instalaciones de tratamiento de agua:

4.8.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO GENERAL

Cobra especial relevancia el mantenimiento preventivo en el reactor biológico, ya que como se ha hecho mención en otro capítulo en su gestión es donde se producen los consumos energéticos más significativos. Por ello es esencial que los equipos de suministro y los elementos de distribución de aire se encuentren perfectamente conservados. La mayor parte de los sistemas de aireación están compuestos por soplantes y difusores de membrana, siendo fundamental para este tipo de sistemas controlar adecuadamente la pérdida de carga de los difusores (ésta aumenta con el grado de ensuciamiento de los mismos) para que la pérdida de carga del sistema de aireación sea lo mínimo posible.

Tras lo expuesto, para la limpieza de los difusores de membrana se hará uso de un ácido débil y altamente biodegradable como es el ácido fórmico (5 g por difusor y aplicación), denominándose a este tipo de limpieza química “in situ”, se mide la variación de la presión en la línea, que es directamente proporcional al consumo específico de las soplantes si se considera un caudal de aire constante (Simón et al., 2009).

Valorando el efecto de la limpieza química “in situ” de los difusores sobre el consumo energético del sistema de aireación, ésta se presenta como una excelente alternativa a la limpieza mecánica de los mismos, también desde un punto de vista puramente operacional, dada su mayor sencillez y rapidez. En la siguiente figura se aprecia la reducción de potencia consumida en kW en cinco EDARs diferentes de la Región de Murcia tras la dosificación del ácido fórmico para la limpieza de los difusores.

Parámetro	EDAR 1	EDAR 2	EDAR 3	EDAR 4	EDAR 5
Perdida de carga Inicial, Bar	0,589	0,572	0,588	0,591	0,460
Perdida de carga Final, Bar	0,530	0,524	0,513	0,537	0,429
Reducción Pérdida de Carga, %	10,02	8,53	12,70	9,06	6,74
Consumo Inicial, kw	91,0	89,7	65,0	207,0	56,6
Consumo Final, kw	84,2	80,2	57,0	187,0	52,1
Reducción de consumo de Energía	7,47	10,59	12,31	9,66	7,95

Figura 39. Efecto de la dosificación de ácido fórmico sobre el proceso de aireación (Simón et al., 2012).

Asimismo, evaluando la evolución de las presiones obtenidas tras las limpiezas químicas “in situ” se puede determinar la vida útil de las membranas y estudiar el momento óptimo para proceder a su renovación, sopesando el coste de instalar nuevas membranas con el ahorro energético que se obtendría.

Otro ejemplo en este sentido sería la limpieza de las camisas de cuarzo de las lámparas de desinfección U.V. El sistema de limpieza automático (limpieza mecánica y química) que presentan algunos equipos de desinfección debe ser imprescindible en cualquier equipo de estas características ya que además de optimizarse la dosis U.V., se evitan los riesgos derivados de la manipulación de unos equipos extremadamente frágiles.

4.8.2 MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO PREVENTIVO

Se trata de todas aquellas operaciones que se realizan para el cuidado de los equipos electromecánicos y evitar así el número máximo de averías y paradas posibles, reduciendo el coste del mantenimiento correctivo y evitando que el tratamiento quede condicionado por las averías.

Entre las principales operaciones dentro del mantenimiento mecánico destacan la comprobación de ruidos y de estanqueidad, los cambios de aceite, engrases, revisión de sistemas de elevación y traslación, etc. En cuanto a las de índole eléctrico se tiene la comprobación consumos y tensiones, de aislamientos y protecciones, el apretado de conexiones y la revisión del estado de los cables.

Como ejemplo se muestra en la figura 42 una bomba de agua residual. Dicha bomba presenta una rápida pérdida de rendimiento (entre un 10–15%) debido a holguras y

desgastes inherentes a su funcionamiento y al fluido que tiene que trasegar (Simón et al, 2012). La actuación sobre los elementos de desgaste puede ayudar a recuperar el rendimiento hidráulico de la bomba y al mismo tiempo mantener su disponibilidad, evitando averías que dejen fuera de servicio equipos críticos. Cabría pensar que estas actuaciones suponen un desembolso económico de forma periódica, sin embargo, a largo plazo, el importe derivado de estas actuaciones y la menor eficiencia del equipo hacen interesante mantener un esfuerzo preventivo sobre los equipos de bombeo.

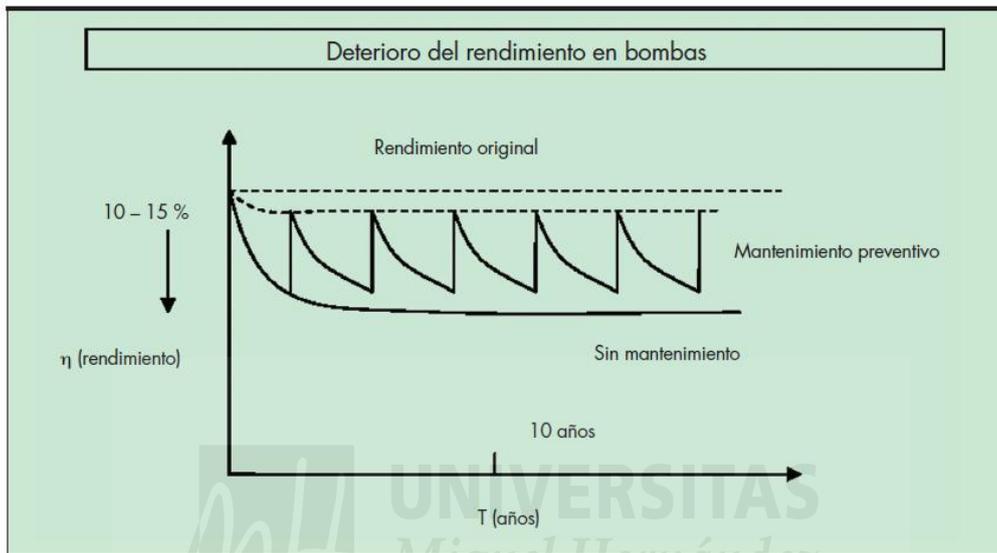


Figura 40. Efecto del mantenimiento preventivo sobre el rendimiento de los equipos aireación (Simón et al., 2012).

4.8.3 MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO PREDICTIVO

Su objetivo es el control del estado de funcionamiento de los equipos para predecir averías y proceder a la reparación rápida en el momento de fallo. Consiste en el control mediante técnicas concretas y aplicadas generalmente a una selección de equipos.

Las técnicas más habituales son el control de vibraciones, termografías y control de lubricantes.

En EDAR Martorell (Barcelona) se llevó a cabo un control puntual de los consumos energéticos de los equipos electromecánicos y la detección de las desviaciones de determinados parámetros eléctricos medidos (intensidad y tensión principalmente), lo que permitió adoptar un programa de mantenimiento predictivo de detección prematura de averías, y se consiguió así reducir el número de posibles averías y alargar la vida útil

de los equipos. Esta mejora supuso un ahorro económico para dicha EDAR de 1.617 €·año⁻¹ (ACA, 2011).

4.8.4 MANTENIMIENTO METROLÓGICO

Calibración y ajuste periódico de los equipos de medida en continuo e instrumentación de las instalaciones (sondas oxígeno, sondas red-ox, caudalímetros, contadores, etc.).

4.8.5 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Se trata de trabajos de mantenimiento que reparan el equipo cuando se detecta una anomalía o parada del mismo para volver a dejarlo en servicio.

Implica la apertura de una Orden de trabajo, y el desmontaje del equipo para la valoración del daño y sustitución de los elementos dañados.

4.8.6 MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO LEGAL O REGLAMENTARIO

Es el mantenimiento que se lleva a cabo para cumplir con la legislación vigente en materia de mantenimiento de equipos específicos y que se realizan por empresas especializadas y autorizadas para ello. Entre las medidas se encuentran la revisión y mantenimiento de los CT (Centros de Transformación), de las instalaciones de baja tensión, de los equipos de extinción de incendios y de los equipos a presión, del almacenamiento de productos químicos o del control de legionella.

4.8.7 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS ESPECIALES CONTRATADO

Dícese del mantenimiento que se lleva cabo en equipos que por su complejidad técnica requieren la intervención de empresas especializadas y contratadas para ello como son el fabricante o empresas autorizadas.

4.9 GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS

En cuanto a las principales Buenas Prácticas en las instalaciones de tratamiento de agua se consideran las siguientes:

RESIDUOS

Gestión adecuada de las materias gruesas (arenas, grasas, materia orgánica) por una empresa gestora.

Reutilización de lodos en sector agrícola o para la producción de biogás.

Reutilización de lodos para el uso urbano: riego de zonas verdes, baldeo de calles, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos.

Reutilización de lodos para el uso industrial: aguas de proceso y limpieza excepto en industrial alimentaria.

Reutilización de lodos para el uso ambiental: recarga de acuíferos por inyección directa y percolación, riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público, selvicultura, mantenimiento de humedales, caudales ambientales.

Instalación de silos para fangos deshidratados.

EMISIONES, OLORES Y RUIDO

Implantar un sistema de control y medición de olores.

Control del funcionamiento de máquinas.

Controles de emisión de los componentes orgánicos.

Sistemas de modelación de dispersión de olores.

Revisiones periódicas del estado de los equipos y maquinarias de la EDAR.

Vigilancia del cumplimiento de la normativa de emisiones sonoras en maquinaria.

AGUA

Análisis y control de agua en proceso y control de agua de vertido al cauce, análisis de parámetros de DBO₅, DQO y pH entre otros (según el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28

de diciembre, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas).

Análisis y control de vertido al cauce, realizado por una entidad colaboradora de la Administración.

Análisis y control de lodos, por una empresa autorizada por la Consejería de Medio Ambiente para las actividades de valorización y eliminación de residuos.

Control y mantenimiento de las instalaciones para prevenir las pérdidas del agua sin depurar.

Aplicación de nuevas tecnologías para las estaciones de control de calidad del agua.

Mejorar el rendimiento de toda la planta depuradora y de cada una de sus etapas.

Mejorar los tiempos de respuesta ante situaciones imprevistas en la EDAR.

SUELOS

Asfaltado de la zona de almacenamiento de residuos peligrosos y materias primas.

Prevención de derrames accidentales de las aguas a depurar.

Control de la calidad de los lodos antes de depositarlos en el suelo.

Almacenamiento adecuado de lodos.

4.10 OTRAS MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

4.10.1 AUTOMATIZACIÓN DE LA DESODORIZACIÓN

Un efecto ambiental producido en una EDAR es la emisión de gases provenientes de las fases anaerobias que aparecen a lo largo del proceso de depuración. Estas emisiones tienen lugar principalmente en el desbaste, pretratamiento, en el reactor biológico y en el tratamiento de fangos. Algunos de estos gases pueden generar malos olores debido a las reacciones propias del proceso de depuración. Los compuestos principales que provocan estos olores son los compuestos orgánicos volátiles (COV's), compuestos nitrogenados y el sulfuro de hidrógeno. Los compuestos más preocupantes desde este punto de vista son los nitrogenados y el sulfuro de hidrógeno, ya que los COV's producen olores que desaparecen de forma rápida con la distancia al foco emisor. Los

olores ligados al propio proceso de depuración se producen de forma continuada, mientras que los producidos por la descomposición de materia orgánica de los residuos sólidos y fangos se suele producir de forma discontinua y debido a la acumulación durante un cierto tiempo de residuos previamente a su recogida.

Existen diversos procesos para la eliminación de olores pero fundamentalmente se utilizan tres sistemas que se seleccionan en función de los requerimientos particulares de cada aplicación (caudal, carga contaminante, eficacia, etc.). Éstos son por vía química, por filtro de carbón activo o por biofiltración.

El sistema por vía química es el más habitual en la desodorización del aire para plantas con caudales elevados y con requerimientos de rendimientos altos. Se basa en procesos de dilución, neutralización y oxidación química, con el fin de transferir los compuestos olorosos a una fase líquida. Se hacen uso de reactivos selectivos en varias etapas: ácida, básica y oxidante.

El sistema por filtro de carbón activo se utiliza generalmente en zonas concretas (pozos de bombeo, espesadores,...) y en pequeñas depuradoras. La adsorción de los gases se realiza a través de uno o varios lechos de carbón activo. Admiten caudales de hasta $40.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y son especialmente utilizados en la eliminación de H_2S con eficacia de hasta el 99,5% (ECOTEC, 2015).

La biofiltración es un proceso de oxidación biológica capaz de eliminar los olores y COV's con una elevada eficacia.

En la actualidad algunas grandes plantas de depuración cuentan con sistemas automatizados de desodorización para la eliminación de los olores y COV's. Con dicha instalación automatizada por secciones se puede asignar consignas diferentes para cada proceso consiguiendo así un ahorro energético. Gracias a ello se puede proceder al tratamiento de altas cargas de contaminantes con costes de operación bajos y con un retorno de la inversión a corto plazo.

Un ejemplo es en la EDAR La Cartuja (Zaragoza) donde se ha procedido este año 2015 a una mejora de la ventilación y desodorización mediante la instalación de sensores de partículas malolientes que permiten modular el tratamiento, activándose si la contaminación alcanza el valor máximo consigna establecido y graduándose cuando disminuye su presencia, con lo que se logra un ahorro de $1.200.000 \text{ kWh} \cdot \text{año}^{-1}$ (iAgua, 2015).

4.10.2 SINERGIA DE COSUSTRATOS

Se conoce como codigestión a la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de origen diferente. La finalidad es optimizar la producción de biogás en la EDAR mediante la producción gracias a la sinergia entre distintos cosustratos consiguiendo una mayor producción que la que tendrían ambos individualmente.

Adicionalmente, se buscarán cosustratos que, además de complementar las deficiencias en cuanto a digestión de los lodos de la EDAR (biodegradación lenta y baja relación C/N), sean productos energéticamente altos, es decir, con un alto poder de metanización. Los cosustratos ideales para los lodos en depuración son los residuos industriales y agrarios, que contienen menor alcalinidad y un ratio C/N mayor (Astals y Mata, 2013). En la siguiente figura se aprecia el aumento de producción de gas de digestión según la utilización o no de sustrato.

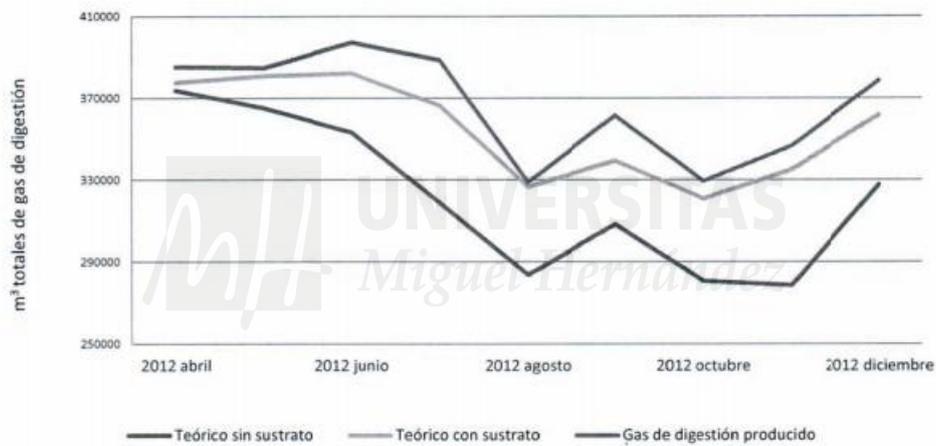


Figura 41. Producción de gas en los digestores anaerobios (Fernández y Estévez, 2012).

Cabe decir que antes de llevar a cabo ninguna acción de este tipo, debe haber disposición de un exceso de capacidad en los digestores, si no el proyecto es totalmente inviable.

Un ejemplo práctico de aplicación de cosustratos se llevó a cabo en la EDAR Copero (Sevilla) en 2012. En dicha EDAR se produjo ese año en cogeneración el 65% de la energía consumida y aproximadamente el 9,1% se debió al proceso de codigestión. En base a esto, se puede asumir que la codigestión ha generado en la EDAR en 2012 un ahorro de $0,021 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de agua tratada. A nivel de funcionamiento de esta EDAR se trataría de $870 \text{ MWh}\cdot\text{año}^{-1}$ o lo que es lo mismo, aproximadamente 87.000 € de ahorro anuales (Fernández y Estévez, 2012).

Otro ejemplo es en la EDAR Molina de Segura (Murcia) donde se han realizado aportes de cosustratos con un mayor potencial de metanización como melazas, gazpacho, zumo o crema de helado. En el caso concreto de aporte de melazas, se consiguió incrementar la producción de biogás desde $2.603 \text{ Nm}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ hasta $3.670 \text{ Nm}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ y la energía total producida pasó de $4.463 \text{ kWh} \cdot \text{día}^{-1}$ hasta $6.363 \text{ kWh} \cdot \text{día}^{-1}$, que supone un incremento muy significativo en la energía eléctrica obtenida en el proceso de digestión (Simón et al., 2012).

4.10.3 EDAD DE FANGO

La edad de fango es un parámetro de operación bastante interesante a la hora de optimizar el proceso de una EDAR. Dependiendo de la instalación, se operará a una edad de fango fija o variable. Esto es función del coste de la energía y de la gestión de fangos, es decir, mientras que el precio de la gestión de fango sea menor de $15\text{€} \cdot \text{t}^{-1}$ resultará adecuado operar con una edad de fango en función de la temperatura. Por el contrario, si se supera dicho valor lo más aconsejable será trabajar con una concentración de fangos fija con independencia de la temperatura.

Mediante la implementación de este control en la EDAR Molina de Segura (Murcia) se ha conseguido disminuir en un 23,53% la producción de fangos secundarios. Además se ha mejorado la decantabilidad del fango, se ha reducido la carga volumétrica específica de los decantadores secundarios (incremento del 64% del caudal admisible en los decantadores secundarios) y se ha reducido el ratio de polielectrolito catiónico utilizado (40% de reducción de costes de polielectrolito de espesado) (Marqués y Pradas, 2010).

4.10.4 CALORIFUGADO DE LOS DIGESTORES

En la digestión de fangos el contenido del digestor se calienta para llevar a cabo el proceso (condiciones mesofílicas, $33\text{-}37^\circ\text{C}$) y se mezcla completamente mediante diversos sistemas como pueden ser la recirculación del gas generado, mezcladores mecánicos, bombeo, etc.

Una parte importante del volumen de los digestores se encuentra a la intemperie provocando unas pérdidas térmicas significativas. Con el calorifugado de los digestores y las tuberías de calentamiento de fango, se evitan las pérdidas de calor y se mantiene la temperatura de los digestores estable a lo largo del año. Como se puede apreciar en la

siguiente figura la necesidad de energía para el calentamiento es menor si se cuenta con los digestores calorifugados.



Figura 42. Efecto del calorifugado de digestores (Torres y Martín, 2009).

En la EDAR Murcia Este (Murcia) para evitar estas pérdidas térmicas, en 2013 se calorifugaron las paredes de los 3 digestores de 26 metros de diámetro y 8,5 metros de altura mediante paneles de lana de roca de 80 mm de espesor y acabado con chapa de aluminio ondulada de 0,7 mm de espesor, sujeta a pernos de acero inoxidable fijados con tacos (CONAMA, 2014).



Figura 43. Digestores calorifugados en la EDAR Murcia Este (Murcia) (CONAMA, 2014).

4.10.5 USO DEL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE DE VEHÍCULOS

El biogás para su formación depende fundamentalmente de la composición del agua residual y de la estabilidad del proceso de digestión. Para poder hacer uso del biogás

como combustible previamente deberá realizarse una limpieza del mismo de manera que se obtenga una corriente de CH_4 y CO_2 .

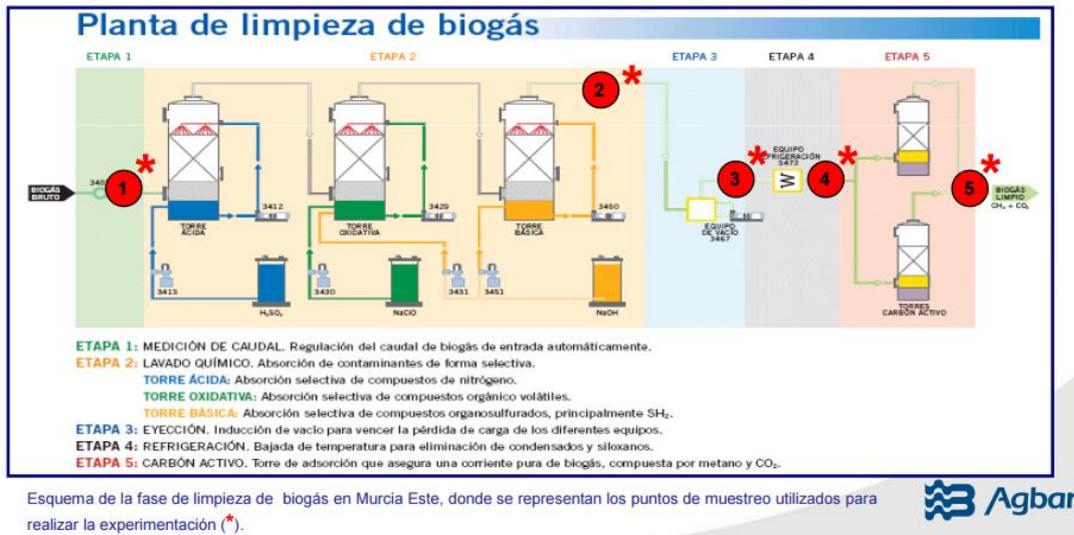


Figura 44. Esquema de limpieza del biogás (Martín y Moya, 2011).

El proceso de obtención de combustible para vehículos a través de biogás se ha denominado comercialmente AMEB. Entre sus ventajas figuran:

- La utilización de un residuo generado en estaciones depuradoras, concretamente biogás.
- Sustituye una fuente de energía fósil por una renovable.
- Evita las emisiones que contribuyen al efecto invernadero.
- Evita la producción de olores.
- No contiene plomo.
- Genera un combustible de precio similar a los combustibles fósiles: BIOEDAR.
- Reduce las emisiones de CO_2 .

A continuación se muestra una gráfica de la composición del biogás antes y después del proceso AMEB donde se observa que a su salida se incrementa notablemente el metano existente por lo que adecuando el vehículo a dichas características se puede utilizar el biogás como combustible como se puede apreciar en la figura 46.

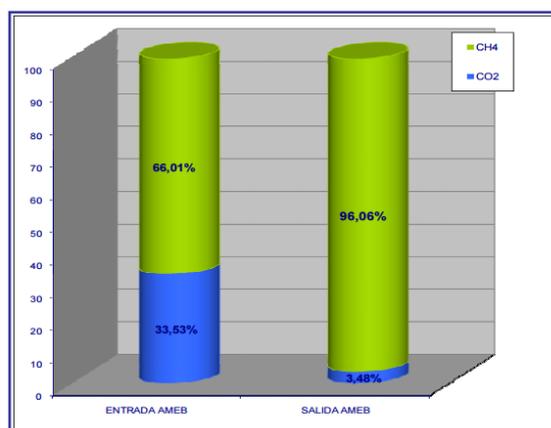


Figura 45. Representación de las cantidades de metano y dióxido de carbono en % (Martín y Moya, 2011).



Figura 46. Ejemplo de aplicación en EDAR Murcia Este (Murcia) (Martín y Moya, 2011).

4.10.6 CONCENTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE VARIAS POBLACIONES EN EDARS DE MAYOR TAMAÑO

Cuanta mayor diferencia exista entre el caudal tratado y el de diseño más ineficiente será la planta. Según un estudio realizado en la Comunidad Valenciana bajo el nombre de “Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas” las EDAR de gran tamaño, es decir aquellas cuyo número de habitantes equivalentes es superior a 100.000 consumen muy por debajo de la media como se puede apreciar en la figura 47, mientras que las EDAR de pequeño tamaño, es decir aquellas de menos de 2.000 he, que son la mayoría consumen hasta 6 veces más energía que la media.

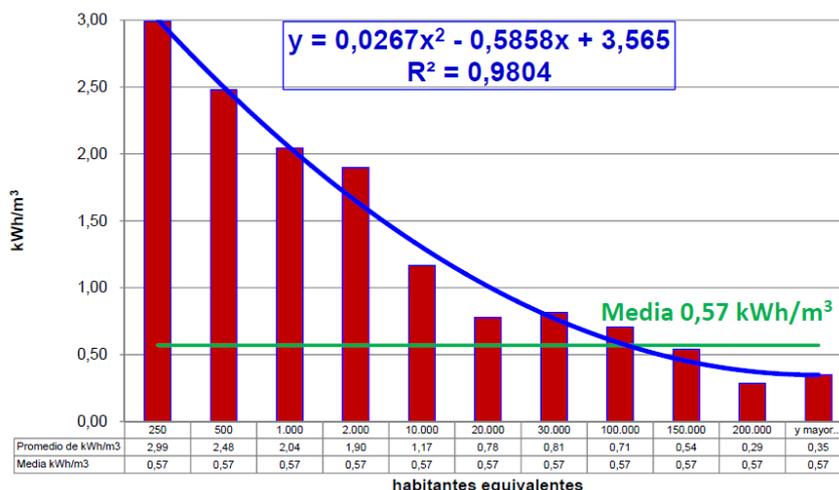


Figura 47. Consumo de energía en kWh·m⁻³ tratado (Albaladejo, 2014).

Una recomendación básica a la hora de diseño es que se debe tender a proyectar EDAR que traten más de 100.000 he para que sean energéticas eficientemente hablando, esto quiere decir que en la medida en que se pueda se deben concentrar los caudales de aguas residuales para optimizar el consumo energético por m³ tratado, por t de DBO₅ tratada, por t de SS tratada y por t total tratada (DBO₅, SS, N y P).

A partir de esas capacidades, el consumo energético disminuye debido a las sinergias que producen las economías de escala y a que aumentan considerablemente los medios para rentabilizar por ejemplo la implantación de sistemas de cogeneración reutilizando el biogás producido y el calor de los gases de escape de la combustión para aumentar el rendimiento de los digestores y el secado de los fangos.

Obviamente, además del ahorro energético en las grandes EDARs, se suman las sinergias en costes de empleados, de costes generales, de compra de productos, etc.

Otra recomendación sería la reconversión de depuradoras obsoletas e incluso de pequeñas depuradoras, es decir, aquellas de menos de 500 he, en estaciones de bombeo para trasvasar el agua residual hasta plantas de mayor capacidad y eficiencia. De este modo, la depuración mancomunada de varios municipios genera economías de escala y un menor coste para el contribuyente.

Por último, en caso de que lo anterior no sea posible, para EDARs de pequeño tamaño se deben utilizar otras metodologías ya que el consumo se puede elevar exponencialmente. Existen diferentes metodologías (oxidación total, macrofitas, tanques Imhoff, flujo pistón...) que deberían ser seleccionadas según las condiciones de contorno que se tengan en cada caso, aunque energéticamente no sean tan eficientes, ya

que pueden presentar otras ventajas como menor coste de operación y mantenimiento en dedicación de mano de obra, eliminación de fangos, uso de productos químicos, etc.

4.10.7 OTRAS MEDIDAS

Existen muchas otras medidas, aparte de las citadas anteriormente, cuya repercusión en el consumo energético puede resultar significativo. Ha de tenerse en cuenta que antes de implantar cualquier medida se debe realizar un estudio para ver la viabilidad de esta. Por ejemplo, otra medida a evaluar por cada instalación sería el envío de reboses de centrífuga y espesadores al biológico directamente, y no a cabecera de planta, como suele hacerse, con lo que se reduce la energía necesaria para bombear estos caudales que finalmente pasaran por el reactor biológico. Otra mejora podría ser trabajar con las centrífugas con la mayor carga posible de sólidos, siempre que no se empeore la sequedad final obtenida (hay plantas que trabajan con ratios de $\text{kWh} \cdot \text{KgMS}^{-1}$ de 0,003 y otras que llegan a 0,30). Sería también interesante priorizar el funcionamiento en modo automático sobre el modo manual. Además, se puede intentar concentrar lo máximo posible el fango en los decantadores llegando a valores inferiores al 50% de recirculación, aunque para esto es conveniente disponer de un medidor de altura de manto de fangos y vigilar que no se produzcan desnitrificaciones.

5. OPTIMIZACIÓN DE LA FACTURA ELÉCTRICA

Dado que en el punto anterior se han descrito aquellas medidas que suponen un ahorro energético y que con ello conllevan un ahorro económico se va a proceder ahora a describir aquellas medidas que aun no suponiendo un ahorro de energía, sí repercuten en un ahorro económico como respuesta de una gestión energética mejorada.

Dichas medidas radican en la adecuación del consumo de energía a las condiciones de las compañías suministradoras de energía eléctrica, de forma que la gestora de la instalación se pueda beneficiar de ciertas ventajas como son tarifas más económicas, consumo en horas valle donde la energía es considerablemente más económica, etc.

De esta manera disminuyen los importes energéticos que es una de las partes más significativas de los costes totales de producción.

Téngase en cuenta que los costes de la electricidad se pueden desglosar en costes fijos y variables. Los costes fijos corresponden a la potencia contratada, se facturan mensualmente y están regulados a través de las tarifas de acceso. Estos costes fijos no dependen del consumo, pero pueden variar en caso de instalar o variar los equipos de la EDAR, ya que se puede tener que ampliar o reducir la potencia contratada. Los costes variables son directamente atribuibles a la energía consumida en cada uno de los periodos horarios, e incluyen los costes de generación y las tarifas de acceso, y hay que contar con las posibles variaciones en su distribución, ya que el precio de la electricidad depende de la hora del día y del mes en que se consume.

En la siguiente figura se puede apreciar la distribución aproximada, a grosso modo, de los costes energéticos anuales distinguiendo entre los costes fijos y variables, donde también se pone en relieve el peso que cada uno de ellos tiene en los costes totales en electricidad para una EDAR, de manera que un 40% aproximadamente corresponde a los costes energéticos fijos y un 60% para los costes energéticos variables.

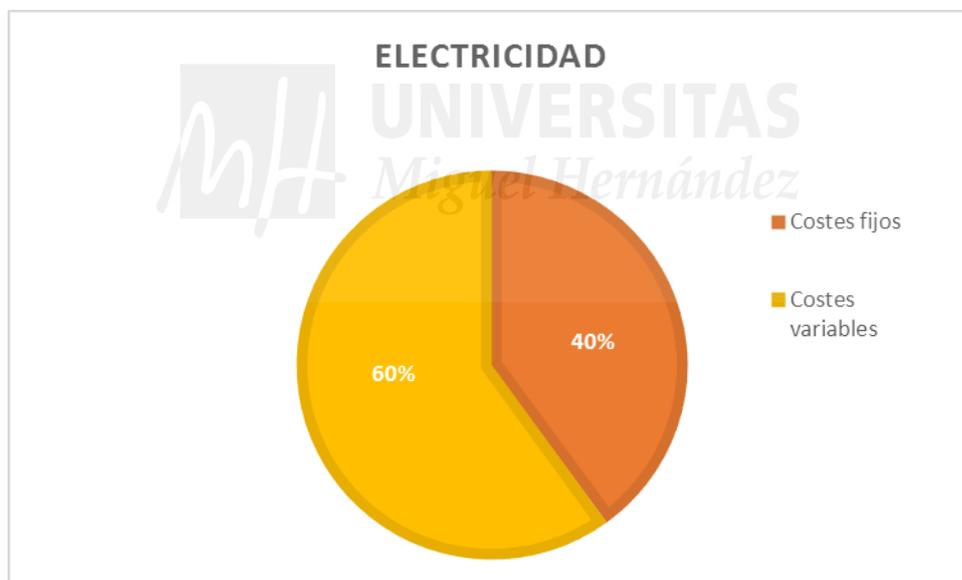


Figura 48. Distribución de los costes de la electricidad.

5.1 PLATAFORMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA

Para poder llevar a cabo una optimización energética real y ajustada de la factura eléctrica en una instalación depuradora hay que realizar los siguientes pasos:

- Realización de un estudio del histórico de consumos de energía. Esto conlleva un análisis de la carga diaria y semanal de consumo, un histórico de potencia

contratada y facturada y un histórico de energía reactiva. De esta forma se puede estimar si la tendencia es a superar la potencia contratada o si queda margen para una posible reducción.

- Monitorización de la potencia demandada. Monitorizando la instalación se puede saber cuándo se aproxima a la potencia máxima. Obteniendo datos para su posterior estudio y actuación en consecuencia.
- Automatización de la instalación. Una instalación de estas características tiene una cantidad considerable de equipos muy diversos y que además pueden estar operativos simultáneamente. Lógicamente, si varios de estos equipos se encuentran en funcionamiento al mismo tiempo la potencia demandada por la instalación es mayor, de forma que si se establecen prioridades mediante automatización se pueden conseguir que circuitos no esenciales se encuentren desconectados antes de que la instalación alcance una determinada potencia. Se consigue así un nivel de potencia máxima contratada menor y tener la seguridad de que no se producirán penalizaciones por exceso de potencia máxima.

Los pasos anteriores se realizan, en su mayoría, de forma automática mediante una plataforma de gestión energética. Se entiende por gestión energética la medida y el seguimiento de una forma continua del consumo de energía útil, de la compra de energía final eléctrica, de los costes energéticos y de los indicadores de rendimiento y eficiencia energética de la EDAR, de los procesos y de los equipos que conforman la misma.

Una plataforma de gestión energética está constituida por diferentes módulos que presentan la opción de monitorizar los consumos por procesos de forma general e integrarlos por líneas o tratamientos. Adicionalmente, tiene la opción de estar en conexión con sistemas de control, con los que se integra para efectuar actuaciones de regulación y optimización energética.

La finalidad de instaurar este sistema es disponer de un instrumento que permita ver, analizar y controlar los consumos energéticos. Información, análisis y control actúan de forma integrada para reducir el gasto.

Con la información gestionada por el sistema se generan, por un lado, curvas características de los consumos energéticos de los procesos, detectándose dónde y cuándo se producen y su interrelación. Por otro lado, se obtiene un mapa energético, que ofrece distintas perspectivas, como pueden ser los consumos o generación por equipos, líneas o subprocesos.

Una vez compiladas las medidas de los equipos, se puede llevar a cabo el análisis de los consumos energéticos y establecer condiciones de funcionamiento o generar alarmas asociadas a anomalías.

Para poder efectuarse esta solución, es necesario tener en cuenta la situación instantánea de las demandas eléctrica y térmica, los consumos de procesos, el periodo y los precios de las tarifas eléctricas, etc. Además, se deben conocer y tener en cuenta las previsiones de la demanda de energía térmica, eléctrica y de proceso.

Mediante el análisis de estos parámetros en cada instante se puede tomar la decisión sobre la actuación a acometer, cuándo realizar la puesta en marcha de la cogeneración u otras energías y el régimen de funcionamiento de las mismas, maximizando su potencial o implantando restricciones para no generar excedentes y evitar posibles penalizaciones u otras posibles actuaciones.

Por último, es conveniente generar las interrelaciones heurísticas que modelan el comportamiento energético de la instalación a partir de los sistemas SCADA y la plataforma de gestión energética para actuar sobre los consumos y generación, y disponer de un módulo de ayuda a la decisión.

Definido el concepto de gestión energética se deduce que para grandes instalaciones se ha de disponer de un sistema informático que registre los parámetros del suministro eléctrico en cada infraestructura: las condiciones de las tarifas, el coste del consumo energético, la demandas de energía activa y reactiva y las potencias necesarias en cada periodo. Este sistema de telecontrol en remoto permite controlar la facturación de cada punto suministrado a través de un módem de comunicaciones. Por otra parte, también debe estar permitido el registro manual para incidencias o para aquellos suministros no provistos de módem.

En función de los diferentes grados de gestión energética que se lleven a cabo en la EDAR se podrán obtener ahorros energéticos y económicos más o menos significativos y promocionar por tanto en la misma:

- Políticas energéticas y un mayor grado de implicación de la dirección.
- Sistemas de control energético que permitan conocer los consumos energéticos de las diferentes energías de los procesos de la EDAR o de servicios para los edificios de la misma.
- Recursos de personal y económicos dedicados a la gestión energética en la EDAR.
- Sistemas de gestión energética que permitan proponer objetivos y hacer un seguimiento de estos sistemas mediante la concienciación del personal de la EDAR y de su grado de implicación.

5.2 AJUSTE DE LA TARIFA CONTRATADA

Como consecuencia de la progresiva liberalización del mercado eléctrico, la contratación de la energía especialmente en alta tensión ha experimentado una importante transformación en los últimos años.

Desde el 1 de julio de 2009 los consumidores de energía eléctrica con suministros en alta tensión (tensiones superiores a 1.000 V), solo podrán contratar el suministro eléctrico en la modalidad de libre mercado, es decir, a un precio anual pactado con las empresas comercializadoras. El citado precio del suministro se compone de un precio regulado o tarifa de acceso, que se refiere al uso de la red, y un precio libre, que se refiere al valor de la energía que se consume. En esta modalidad de consumo se contratan dos tipos de servicios:

- El uso de las redes del distribuidor al que está conectado el punto de suministro, por el que se paga la tarifa de acceso, precio regulado establecido periódicamente por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (MICYT).
- La energía eléctrica que se adquiere al comercializador de acuerdo con el precio libremente pactado.

A pesar de la liberalización del sistema eléctrico español, el Gobierno ha tenido que ir subiendo el precio final pagado por los usuarios, mediante la revisión continuada de las tarifas de acceso reguladas, con el fin de garantizar la sostenibilidad económico financiera del sistema eléctrico.

Dentro de los costes de operación y mantenimiento de las plantas depuradoras, el coste de la energía es el mayor de todos, y ya en 2012 suponía más del 40% del total de los costes de explotación como se puede apreciar en la siguiente figura.

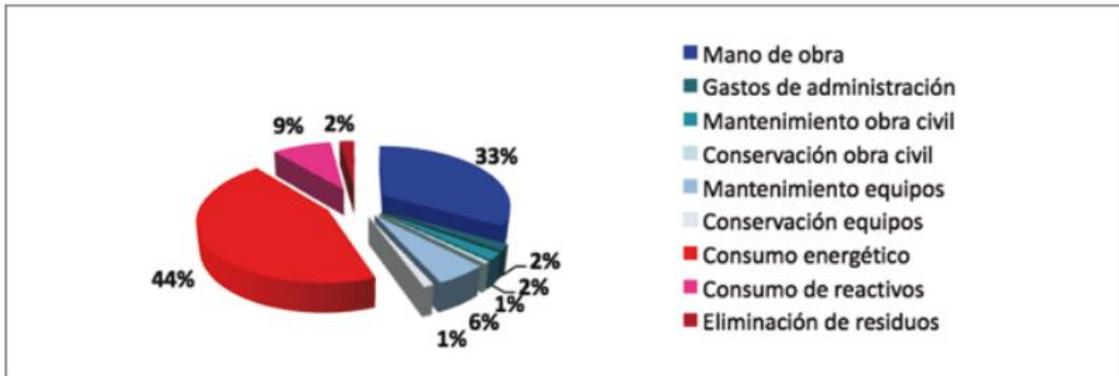


Figura 49. Distribución porcentual de los costes de explotación de una EDAR en el año 2012 (TecnoAqua, 2015).

El consumo de energía en una EDAR varía según el tamaño de la misma, la carga contaminante de entrada, el tipo de tratamiento y la tecnología utilizada, por lo que el coste energético variará de una a otra. Con todo, la energía consumida en una EDAR es, principalmente, eléctrica, salvo en instalaciones grandes con cogeneración o apoyo mediante energías renovables, y se utiliza principalmente para:

- Bombas de líquidos.
- Bombas de fangos.
- Soplantes y aireadores.
- Calentamiento de digestores.
- Deshidratación de fangos por centrífugas o filtros banda y prensa.
- Desinfección por ultravioleta.
- Sistemas de desodorización.

La programación de la operación de la planta suele realizarse en función de la curva de demanda horaria de caudal y carga contaminante -muy similar en poblaciones de tamaño e industrialización semejantes-, de las posibilidades de laminación de dicha curva por la capacidad de almacenamiento y de los costes de los distintos periodos horarios de las tarifas eléctricas.

Para alta tensión se establecen 2 tarifas: tarifa 3.1A, de tres períodos, y tarifas generales para alta tensión (Tarifas 6), de seis periodos. Los periodos eléctricos dependen de la

zona geográfica, del tipo de día y de la hora del día. Por tanto, es conveniente analizar la distribución de compras de energía eléctrica para la EDAR por periodos y evaluar si la distribución horaria y la tarifa de acceso aplicada es la más adecuada.

La complejidad de estas tarifas eléctricas (con hasta 6 precios fijos y 6 variables que pueden ser revisados trimestralmente) y la variabilidad horaria del caudal tratado por las EDAR, hace muy difícil, pero necesario, evaluar el efecto real de las subidas tarifarias en el coste de operación.

En los tres últimos años las revisiones de las tarifas eléctricas han supuesto unos incrementos de los costes eléctricos del 64,5% en la tarifa 3.1.A y del 79,1% en la tarifa 6.1. Esto supone que el coste de la energía eléctrica, que ya era el de mayor importancia, haya pasado de un 44% de los costes totales de explotación a más de un 56% (TecnoAqua, 2015).

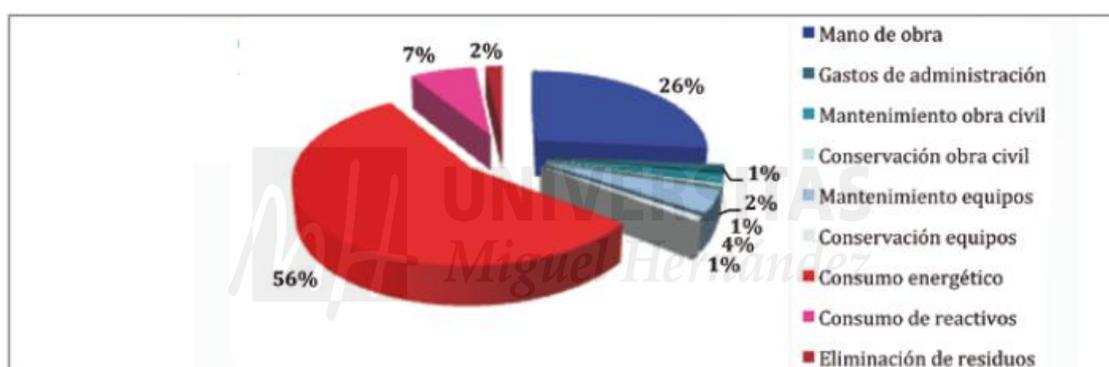


Figura 50. Distribución porcentual actual de los costes de explotación de una EDAR. (TecnoAqua, 2015).

Para conseguir una optimización en la tarifa se debe recurrir a las curvas de demanda horaria de caudal y también tener en cuenta la posibilidad de discriminaciones horarias en las tarifas eléctricas.

CURVAS DE DEMANDA HORARIA DE CAUDAL

Cada EDAR tiene sus propias curvas de demanda de caudal y de carga contaminante, aunque en caso de nula disponibilidad de medios se puede asumir que en condiciones de entorno semejantes el comportamiento de unas y otras será análogo para así poder llevar a cabo el estudio de optimización de tarifa.

Para evitar que el uso de datos medios enmascare los problemas de las puntas de demanda que realmente determinan el diseño de las plantas depuradoras y su operación,

se han de utilizar curvas de demanda para los siguientes tipos de situaciones periódicas y estacionales:

- Verano.
- Invierno.
- Anual.
- Fin de semana y festivo.

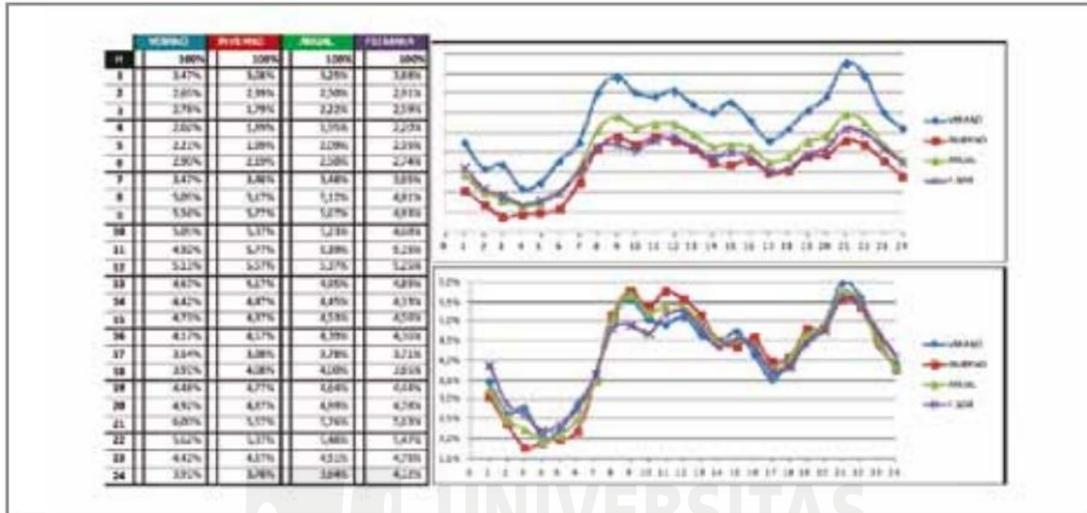


Figura 51. Ejemplo de curvas de demanda horaria de caudal (Albaladejo y Trapote, 2013).

DISCRIMINACIONES HORARIAS EN TARIFAS ELÉCTRICAS

Aunque el mercado energético en España está liberalizado y los precios, en cuantía y forma, se pactan entre comercializador y usuario, los costes que soporta el comercializador tienen una parte regulada y otra libre, cuya composición es la siguiente:

- Regulada: peajes o tarifas de acceso.
- Libre: costes propios del comercializador:
 - Compra de energía en mercado diario OMEL.
 - Servicios complementarios y restricciones (REE).
 - Pago por capacidad.
 - Pérdidas de energía.
 - Margen de beneficio del comercializador.

Como los contratos entre el usuario y el comercializador se realizan por periodos anuales, y en el precio pactado se fija la parte del precio correspondiente al

comercializador, solo es susceptible de variaciones la parte regulada, o peajes de acceso. Estos peajes de acceso los fija el Gobierno trimestralmente, utilizando una estructura tarifaria según potencias contratadas y discriminaciones horarias. La mayoría de las EDAR están sujetas a los siguientes peajes o tarifas de acceso, con los siguientes husos horarios (ordenados de mayor a menor precio fijo y variable):

- Tarifa 3.1 (baja tensión: $V < 1.000$ voltios y potencia contratada ≤ 50 kW): tres tipos horarios.

		DISCRIMINACIÓN HORARIA TARIFA 3.1A												CAVO ENERGÍAS	
3.1A	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	3.1A		
00h - 01h	PERIODO P3 VALLE												00h - 01h		
01h - 02h													01h - 02h		
02h - 03h													02h - 03h		
03h - 04h													03h - 04h		
04h - 05h													04h - 05h		
05h - 06h													05h - 06h		
06h - 07h													06h - 07h		
07h - 08h													07h - 08h		
08h - 09h													08h - 09h		
09h - 10h													09h - 10h		
10h - 11h													10h - 11h		
11h - 12h													11h - 12h		
12h - 13h													12h - 13h		
13h - 14h													13h - 14h		
14h - 15h													14h - 15h		
15h - 16h													15h - 16h		
16h - 17h													16h - 17h		
17h - 18h													17h - 18h		
18h - 19h													18h - 19h		
19h - 20h													19h - 20h		
20h - 21h													20h - 21h		
21h - 22h													21h - 22h		
22h - 23h													22h - 23h		
23h - 24h													23h - 24h		
		Invierno													
		Verano													
		Invierno													
*Los cambios de horario de Invierno a Verano y viceversa coincidirán con la fecha del cambio oficial de hora.															
3.1A	Sábados, Domingos y Festivos Nacionales												3.1A		
00h-18h	PERIODO P3 VALLE												00h-18h		
18h-24h	PERIODO P2 LLANO												18h-24h		

Figura 52. Discriminación horaria tipo 3.1 A para 2015 (Cavo Energías, 2015).

- Tarifa 6.1 (media Tensión: 1.000 voltios $< V < 36.000$ voltios y potencia contratada ≥ 50 kW): seis tipos horarios.

		DISCRIMINACIÓN HORARIA TARIFA 6.1												CAVO ENERGÍAS		
6.1	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio 1-15	Junio 16-30	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	6.1		
00h - 01h	PERIODO 6												00h - 01h			
01h - 02h													01h - 02h			
02h - 03h													02h - 03h			
03h - 04h													03h - 04h			
04h - 05h													04h - 05h			
05h - 06h													05h - 06h			
06h - 07h													06h - 07h			
07h - 08h													07h - 08h			
08h - 09h													08h - 09h			
09h - 10h													09h - 10h			
10h - 11h													10h - 11h			
11h - 12h													11h - 12h			
12h - 13h													12h - 13h			
13h - 14h													13h - 14h			
14h - 15h													14h - 15h			
15h - 16h													15h - 16h			
16h - 17h													16h - 17h			
17h - 18h													17h - 18h			
18h - 19h													18h - 19h			
19h - 20h													19h - 20h			
20h - 21h													20h - 21h			
21h - 22h													21h - 22h			
22h - 23h													22h - 23h			
23h - 24h													23h - 24h			
		PERIODO 6														
		PERIODO 6														
Sábados, Domingos y Festivos Nacionales																
6.1	Sábados, Domingos y Festivos Nacionales												6.1			
00h-24h	PERIODO 6												00h-24h			

Figura 53. Discriminación horaria tipo 6.1 para 2015 (Cavo Energías, 2015).

Los términos de potencia y energía vigentes de la tarifa de tres períodos 3.1 A y de la tarifa de seis períodos 6.1 ($V < 36$ kV) son los que figuran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Términos de potencia y energía de las tarifas de acceso en AT 3.1 A y 6.1 vigentes desde el 1 de abril de 2012.

Tarifa	Período	Término de potencia €/kW año	Término de energía €/kWh
3.1A	P1	25,588674	0,043392
	P2	15,779848	0,038608
	P3	3,618499	0,023627
6.1	P1	17,683102	0,075697
	P2	8,849205	0,056532
	P3	6,476148	0,030124
	P4	6,476148	0,014992
	P5	6,476148	0,009682
	P6	2,954837	0,006062

Como conclusión decir que económicamente resulta más barato contratar la tarifa 6.1, pero se debe tener en cuenta que para usar esa tarifa hay que contratar una potencia igual o superior a 50 kW, y el centro de transformación debe tenerse en propiedad, lo que representa unos costes de amortización y de mantenimiento de unos 3.000 € anuales. Igualmente, incluso considerando ese coste adicional, sigue compensando contratar dicha tarifa frente a la de baja tensión para EDARs. No obstante, aunque el coste fijo mensual en la tarifa 6.1 es un 25% del total frente al de la tarifa 3.1 A, que es del 16%, la parte fija de la primera es ínfimamente superior en valor absoluto que la de la segunda, ya que esta última tiene una parte variable muy elevada. Por todo ello, es mucho mejor contratar la tarifa 6.1 cuando haya incertidumbre del consumo o fuertes desviaciones sobre el consumo medio.

En EDAR Martorell (Barcelona) adecuar la tarifa ha supuesto un ahorro económico de $6.320 \text{ €} \cdot \text{año}^{-1}$ (ACA, 2011).

5.3 AJUSTE DE LA POTENCIA CONTRATADA

En alta tensión hay que tener claros tres conceptos que se recogen en la facturación eléctrica y son: término de potencia, término de energía activa y término de energía reactiva.

- Término de Potencia: Para cada uno de los períodos tarifarios aplicables a las tarifas, se contrata una potencia, aplicable durante todo el año. El término de

facturación de potencia es el sumatorio resultante de multiplicar la potencia a facturar en cada período tarifario por el término de potencia correspondiente, según la fórmula siguiente:

$$FP = \sum_{i=1}^{i=n} t_{pi} \cdot P_{fi} \quad (20)$$

Siendo:

P_{fi} : potencia a facturar en el período tarifario i , expresada en kW.

t_{pi} : precio anual del término de potencia del período tarifario i .

Se factura mensualmente la doceava parte del resultado de aplicar la fórmula anterior.

La potencia a facturar se determina en función de las potencias contratadas en cada período tarifario y, en su caso, dependiendo de cada tarifa, las potencias realmente demandadas en el mismo durante el período de facturación considerado.

El control de la potencia demandada se realiza mediante la instalación de los adecuados aparatos de control y medida según la modalidad de tarifa contratada. En las tarifas de alta tensión, tanto en la de tres como en las de seis períodos, las potencias contratadas en los diferentes períodos han de ser tales que la potencia contratada en un período tarifario (P_{n+1}) sea siempre mayor o igual que la potencia contratada en el período tarifario anterior (P_n).

En cuanto a la facturación, en las tarifas de seis períodos la potencia facturada en cada período horario es la contratada. Los excesos de potencia se penalizan según la siguiente ecuación:

$$F_{EP} (\text{€}) = \sum_{i=1}^{i=6} K_i \cdot 1,4064 \cdot A_{ei} \quad (21)$$

Donde F_{EP} es la facturación por exceso de potencia y K_i es un coeficiente que tomará los siguientes valores dependiendo del período tarifario i :

Tabla 10. Valores de K_i según el periodo tarifario.

Período	1	2	3	4	5	6
K_i	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

$$A_{ei} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (P_{dj} - P_{ci})^2} \quad (22)$$

Siendo:

P_{dj} : potencia demandada en cada uno de los cuartos de hora del período i en que se haya sobrepasado P_{ci} , en kW.

P_{ci} : potencia contratada en el período i considerado, en kW.

De esta manera, el exceso de potencia se paga tantas veces como períodos de 15 minutos en que los máxímetros hayan registrado una potencia superior a la contratada.

- Término de energía activa: El término de facturación de energía activa es el sumatorio resultante de multiplicar la energía consumida y medida por contador en cada período tarifario por el precio término de energía correspondiente, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$FE = \sum_{i=1}^{i=n} E_i \cdot t_{ei} \quad (23)$$

Siendo:

E_i : energía consumida en el período tarifario i , expresada en kWh.

t_{ei} : precio del término de energía del período tarifario i .

La energía activa se factura mensualmente, incluyendo la energía consumida en el mes correspondiente a cada período tarifario i .

- Término de energía reactiva: El término de facturación por energía reactiva es de aplicación a cualquier tarifa, para lo cual se debe disponer de un contador de energía reactiva permanentemente instalado. Este término se aplica sobre todos los períodos tarifarios, excepto en el período 3, para las tarifas 3.0A y 3.1A, y en el período 6, para las tarifas 6, siempre que el consumo de energía reactiva exceda el 33 por 100 del consumo de activa durante el período de facturación considerado ($\cos \varphi < 0,95$) y únicamente afecta a dichos excesos.

El precio a pagar por excesos de reactiva es función del valor del factor de potencia, aumentando al disminuir el mismo, y no existe, como anteriormente, la posibilidad de obtener bonificaciones.

Tabla 11. Precios de la energía reactiva vigentes.

$\cos \varphi$	€/kVArh
$0,80 \leq \cos \varphi < 0,95$	0,041554
$\cos \varphi < 0,80$	0,062332

El ajuste de potencia contratada es más efectivo en pequeñas depuradoras o en los bombeos ya que la potencia contratada suele ser muy elevada en relación a la potencia efectiva.

En EDAR Martorell (Barcelona) adecuar la potencia contratada ha supuesto un ahorro de 1.227 €·año⁻¹ (ACA, 2011).

En EDAR Murcia Este (Murcia) el ajuste de la potencia contratada supuso una inversión de 400 € y un ahorro económico de 9.469 €·año⁻¹ por lo que el período de amortización es de 0,5 años (Rodríguez, 2013).

5.4 CALIDAD DE SUMINISTRO

Según el Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica, la calidad del servicio vendrá determinada por la continuidad referente al número y duración de las interrupciones del suministro, la calidad relativa a las características de la onda de tensión y finalmente las consecuencias del incumplimiento de la calidad del servicio. A continuación se desarrolla cada uno de los apartados anteriores.

CONTINUIDAD DEL SUMINISTRO

La determinación de la continuidad del suministro, basada en las interrupciones del mismo, se fundamenta en dos parámetros:

- El tiempo de interrupción, que vendrá determinado por el tiempo transcurrido desde que la misma se inicia hasta que finaliza, medido en horas. El tiempo de

interrupción total será la suma de todos los tiempos de interrupción durante un año. Se suele fijar en tres horas y media al año.

- El número de interrupciones. El número de interrupciones total será la suma de todas las interrupciones habidas durante un año. Se suele fijar en siete interrupciones máximas anuales.

CALIDAD DEL SUMINISTRO

Hace referencia al conjunto de características de la onda de tensión. Para determinar la calidad se tomarán en cuenta, entre otros, las variaciones del valor eficaz de la tensión y de la frecuencia y las interrupciones del servicio y huecos de tensión de duración inferior a un minuto.

Para la determinación de los aspectos de calidad de la onda se seguirán los criterios establecidos en la Norma UNE-EN 50160 y las Instrucciones Técnicas Complementarias que se dicten por el Organismo competente, en el desarrollo del futuro Reglamento de Transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimiento de autorización de instalaciones de energía eléctrica, o aquel que reglamentariamente le sustituya.

Los límites máximos de variación de la tensión de alimentación serán de $\pm 7\%$ de la tensión de alimentación declarada. No obstante, si este límite fuera modificado por el Organismo competente en función de la evolución de la normativa en lo relativo a la normalización de tensiones, la empresa Comercializadora deberá comunicárselo anticipadamente al Consumidor, para que tome las medidas oportunas, teniendo en cuenta que cualquier modificación necesaria en la instalación del Consumidor, consecuencia de dicho cambio en la variación de la tensión de alimentación, correrá a cargo del Comercializador.

La frecuencia nominal de la tensión suministrada será de 50 Hz. Los límites máximos de variación de esta frecuencia serán los establecidos en la norma UNE-EN 50.160.

CONSECUENCIAS DEL INCUMPLIMIENTO DE LA CALIDAD DEL SERVICIO

El Comercializador se responsabiliza ante el Consumidor de los niveles de calidad individual definidos en los puntos anteriores, con independencia de las relaciones Comercializador-Distribuidor.

Normalmente el incumplimiento de los valores fijados en los puntos a) y b) anteriores, determinará la obligación del Comercializador de aplicar una liquidación anual, dentro del período de vigencia del contrato, con los siguientes abonos:

- Si el incumplimiento es por el número de horas de interrupción, con carácter anual se aplicará un abono anual al consumidor, en una cantidad equivalente al consumo de su potencia media anual facturada, por la diferencia entre el número de horas de interrupción del consumidor y el número de horas de interrupción fijado en el punto a) anterior, valorado en 5 veces el precio del kWh correspondiente a su tarifa de acceso contratada, con un tope máximo de un 1 % de su facturación eléctrica anual.
- Si el incumplimiento es por número de interrupciones, se aplicará un abono anual al consumidor, en una cantidad equivalente al consumo de su potencia media anual facturada por el número de horas de interrupción, valoradas al precio del kWh. correspondiente a su tarifa de acceso contratada, por la diferencia entre el número real de interrupciones menos el fijado en el punto a) anterior dividido por ocho, con un tope máximo del 1 % de su facturación eléctrica anual.

6. VALORACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Generalmente las propuestas de ahorro energético conllevan un coste de inversión, unos costes de mantenimiento y, la finalidad de la propuesta que es en la mayoría de los casos, un ahorro económico.

En el momento de llevar a cabo la valoración económica de las medidas propuestas como mejora de la eficiencia energética se ha de tener en cuenta los factores que intervienen y estimar así su rentabilidad.

Hay medidas cuya amortización de la inversión se hace efectiva en poco tiempo y que conllevan significativas mejoras en optimización y eficiencia y que, gracias a ellas, se consiguen ahorros de energía que a su vez se traducen en ahorros económicos. Entre este tipo de medidas figuran la actualización y mejora de equipos por modelos de alta eficiencia, uso de variadores de frecuencia, calorifugado de los digestores, etc.

También hay otras medidas correctoras que no requieren inversión y que suponen un ahorro energético, en su mayoría, lo que repercute en un ahorro económico. Algunas de estas propuestas pueden ser la regulación de la presión mediante las válvulas en las soplantes o aireadores del reactor biológico, hacer uso de los grupos de bombeo en su punto óptimo, ajustar la potencia facturada a la real demandada (este tipo de medida no disminuye el consumo energético pero si reduce los costes en facturación), etc.

La cuantificación económica de las mejoras es un punto importante para medir el ahorro. A continuación se citan los parámetros de cálculo más significativos a la hora de cuantificar el ahorro que supone una mejora. Estos parámetros definen la viabilidad económica y sirven como instrumento para comparar diferentes propuestas de mejora para una EDAR.

- Para tener conocimiento del ahorro económico que supone una medida ya implantada se opera con la siguiente fórmula:

$$\text{Ahorro Ec. (€·año}^{-1}\text{)} = \nabla W \text{ (kWh·año}^{-1}\text{)} * \text{Precio de la Energía (€·kWh}^{-1}\text{)} \quad (24)$$

Donde:

Ahorro Económico (Ahorro Ec.): ahorro en términos monetarios que supone una medida implantada. Su unidad es €·año⁻¹.

Ahorro Energético (∇W): diferencia entre el consumo energético anual antes de la mejora y el consumo energético anual tras la mejora. Su unidad es el kWh·año⁻¹.

Precio de la Energía: coste del término de energía según la tarifa que se tenga contratada durante ese año. Su unidad es el €·kWh⁻¹.

- El punto anterior supone el ahorro económico bruto pero hay que tener en cuenta si la medida implantada supone un aumento o disminución en los costes anuales de mantenimiento. Si es así, a este ahorro económico habría que restarle el incremento en los costes de mantenimiento en caso de que se produzca un incremento, o sumarle la disminución de costes de mantenimiento en caso de que éstos disminuyan. Todo ello queda reflejado en la siguiente fórmula:

$$\text{Ahorro Ec.' } (\text{€} \cdot \text{año}^{-1}) = \text{Ahorro Ec. } (\text{€} \cdot \text{año}^{-1}) \pm \Delta \text{ ó } \nabla \text{ costes de mantenimiento } (\text{€} \cdot \text{año}^{-1}) \quad (25)$$

Por tanto, éste es el ahorro económico anual real.

- Otro factor a tener en cuenta es la amortización de la inversión que se obtiene con la siguiente fórmula:

$$t_{\text{amort}} \text{ (años)} = \frac{I \text{ (€)}}{\text{Ahorro Ec.' } (\text{€} \cdot \text{año}^{-1})} \quad (26)$$

Donde:

Tiempo de amortización de la Inversión (t_{amort}): permite establecer el tiempo en que se recuperará el dinero invertido en la mejora. Su unidad es en años.

Inversión (I): dinero invertido en llevar a cabo dicha mejora. Su unidad es en euros, €.

Ahorro económico anual real (Ahorro Ec.): ahorro económico bruto pero teniendo en cuenta los costes de mantenimiento. Su unidad es en €·año⁻¹.

- Finalmente, se ha de calcular el rendimiento de la inversión al que se llega mediante la fórmula:

$$\text{RI } (\%) = \frac{I \text{ (€)} - \text{Ahorro Ec.' } (\text{€} \cdot \text{año}^{-1}) * V_u \text{ (años)}}{I \text{ (€)}} * 100 \quad (27)$$

Donde:

Rendimiento de la Inversión (RI): evalúa la eficiencia del gasto que supone la mejora. Se mide en %.

Inversión (I): dinero invertido en llevar a cabo dicha mejora. Su unidad es en euros, €.

Ahorro económico anual real (Ahorro Ec.): ahorro económico bruto pero teniendo en cuenta los costes de mantenimiento. Su unidad es en $\text{€} \cdot \text{año}^{-1}$.

Vida útil (V_u): tiempo estimado que estará operativa la mejora de manera eficiente. Su unidad es en años.

En caso de querer analizar alguna medida concreta con más profundidad existen otros parámetros financieros más complejos, que no se abarcan en este trabajo, como son el Valor Actualizado Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

Téngase en cuenta que la rentabilidad de las mejoras se mide según su inversión asociada, sin ayudas, ya que una mejora ha de ser rentable por sí misma y la subvención sólo se considera una ayuda para disminuir riesgos tecnológicos o para promover la implantación de tecnologías innovadoras. Así pues, en el análisis financiero no se tendrán en cuenta las subvenciones que se puedan conseguir de las administraciones públicas, pero sí se tendrá presente en la presentación del informe a los responsables de la EDAR.

En general, las mejoras que tienen una amortización de la inversión inferior a 4 años o que suponen una inversión baja suelen ser implantadas en la mayoría de centros. Una forma rápida de descartar económicamente una mejora es aquella cuya vida útil sea menor que el tiempo de amortización de la inversión pues la medida ya no estará operativa pero seguirá teniendo que amortizarse anualmente. No obstante, el factor económico no es el único ha tener en cuenta en la implantación de una mejora pues entran en juego otros como el bienestar social, impacto ambiental, mejora en parámetros de calidad, etc.

7. METODOLOGÍA PARA AUDITORÍA ENERGÉTICA

A lo largo de este trabajo se han perfilado una serie de medidas correctoras, preventivas, y también una guía de buenas prácticas y concienciación. La combinación inteligente de

estas medidas conduce finalmente a una respuesta más eficiente por parte de la instalación.

La auditoría energética se define como un procedimiento sistemático para conocer el perfil de los consumos energéticos en una instalación, y así identificar y valorar las posibilidades de ahorro energético desde el punto de vista técnico y económico. Estas valoraciones generalmente se tratan de mejoras en la calidad de los servicios prestados, mejoras en los equipos e instalaciones, mejoras económicas y también medioambientales.

Partiendo de esta idea, se pueden resumir los objetivos en lo siguiente:

- Conocimiento de la situación energética de la empresa determinando con la mayor exactitud posible los consumos reales de la planta. También ser conocedor de cómo se compra y utiliza la energía, dónde se usa y con qué eficacia.
- Obtención del balance energético global de los equipos e instalaciones en consumos de energía para su cuantificación.
- Identificación de las áreas a optimizar que ofrecen potencial de ahorro de energía.
- Determinación y evaluación económica de los volúmenes de ahorro alcanzables y medidas técnicas a aplicar para su logro.
- Análisis de las relaciones entre los costos y los beneficios de las propuestas de mejora para poder priorizar su implementación.
- Uso de la energía de forma racional, lo cual conducirá a ahorros de energía sin apenas inversión.
- Estudio de integración de instalaciones de energías alternativas, tales como las energías renovables.

7.1 PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DE UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA

La realización de una auditoría energética se lleva a cabo mediante la ejecución de una serie de etapas. A continuación se muestra un cronograma indicativo donde figuran los pasos a seguir para llevar a cabo una auditoría energética en una EDAR.

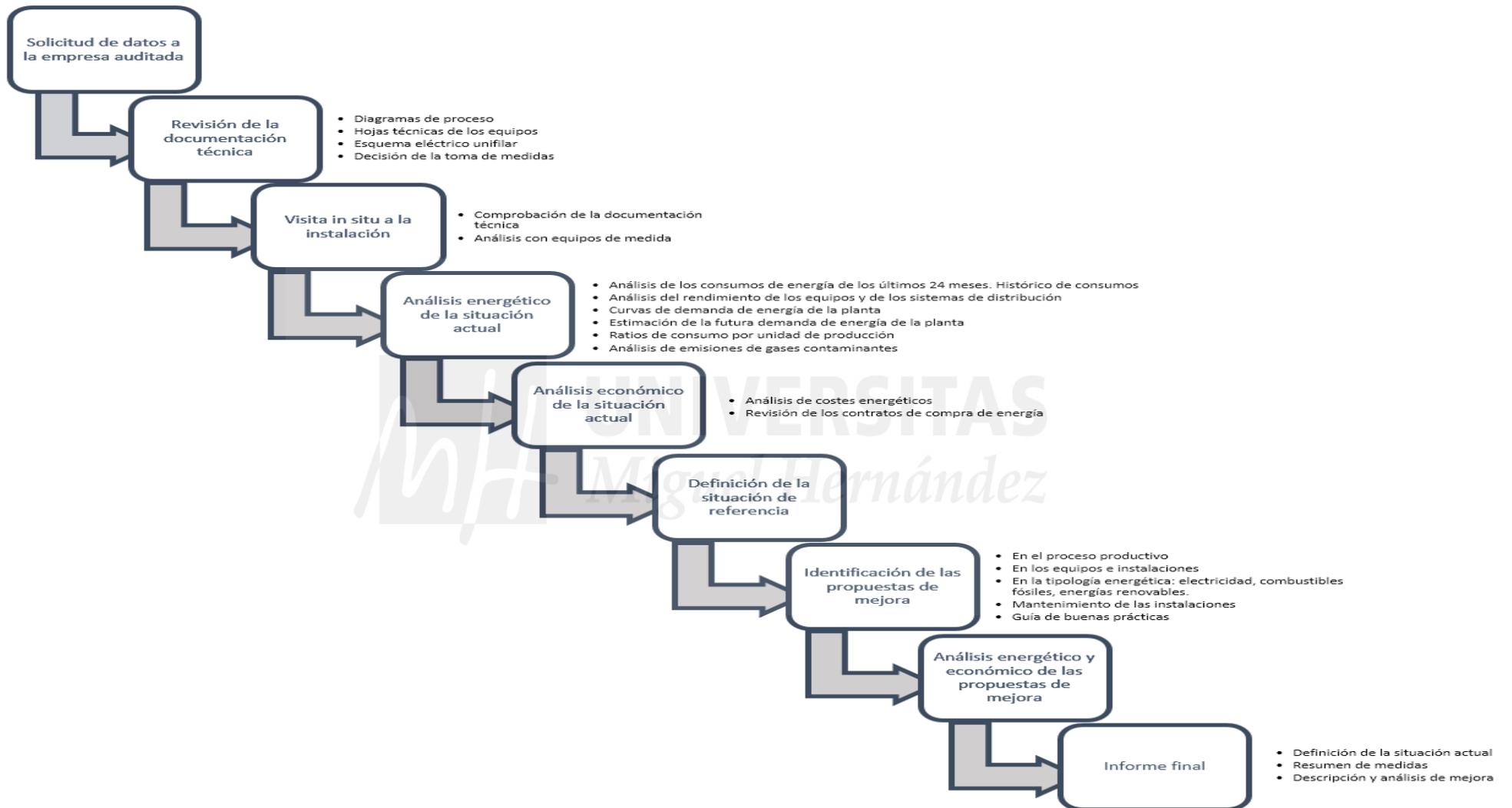


Figura 54. Cronograma de las etapas de una auditoría energética en EDAR.

1. SOLICITUD DE DATOS A LA EDAR AUDITADA

Recolección de información para tener conocimiento del proceso energético llevado a cabo en la EDAR. Dicha información se refiere básicamente a usos de la energía, equipos e instalaciones y cualquier variable que pueda dar lugar a variaciones significativas en el consumo o en la producción.

2. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

Durante esta etapa la empresa auditora tiene un conocimiento fehaciente de la EDAR, de su proceso productivo y de sus instalaciones y equipos, evaluando así que partes de la misma deben ser objeto de auditoría. En la mayoría de los casos se debe recurrir a información adicional para complementar aquella suministrada por los gestores de la EDAR auditada, ya sea por medio de fabricantes de equipos o de fuentes bibliográficas especializadas.

3. VISITA IN SITU A LA INSTALACIÓN

La finalidad de esta visita es la verificación de la información obtenida, la resolución de posibles dudas surgidas durante el análisis previo y la obtención de lecturas de consumo de energía u otros parámetros en los diferentes procesos de la EDAR a partir de diversos equipos de medición.

4. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Con ello se establece el mapa energético de la EDAR, evaluando rendimientos de los equipos y la eficiencia energética aplicada hasta el momento. Mediante la comparación de los resultados obtenidos con parámetros conocidos mediante recursos bibliográficos o de empresas fabricantes se procede a la realización de las diversas propuestas de mejora que optimicen la planta.

También se incluye dentro del análisis energético el análisis de emisiones de gases contaminantes.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Este análisis tiene por objeto resaltar los costes energéticos de los diferentes procesos y equipos de la EDAR, los precios medios obtenidos, el coste por unidad (o variable asociada), el porcentaje que el coste energético representa sobre los costes totales y los factores determinantes de estos costes.

6. DEFINICIÓN DE LA SITUACIÓN DE REFERENCIA

El establecimiento de la situación de referencia, consensuada con los responsables energéticos de la EDAR, se hace con el fin de evaluar los resultados de las mejoras propuestas en la auditoría. Dicha situación de referencia debe tener en cuenta todos aquellos parámetros que puedan influir tanto en el consumo como en el coste energético, algunos ejemplos pueden ser la variabilidad de caudal de entrada a la EDAR según la estación del año, la climatología, los precios de la energía, entre otras.

7. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

Una vez realizado tanto el análisis energético como económico se puede proceder a la definición de propuestas de mejora a llevar a cabo por la EDAR. Estas se establecen en función de los objetivos de la auditoría y de su tipología.

8. ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

Para saber si las actuaciones de mejora propuestas en el punto anterior son viables para la EDAR hay que realizar un análisis de viabilidad técnica y económica. Para ello se valoran mediante simulación energética los consumos de energía como si estuviera ya implantada la mejora. Esta simulación puede ser global de manera que se trabajen con rendimientos medios para los equipos e instalaciones o al detalle para lo que se utilizan rendimientos instantáneos, estacionales y cargas parciales. En cuanto a la parte económica se deben considerar los costes energéticos, operacionales y de mantenimiento, sin olvidar por supuesto los costes medioambientales.

9. INFORME FINAL

En el informe final redactado por los auditores queda reflejado lo siguiente:

- Los consumos energéticos actuales y sus costes.
- El mapa energético de la EDAR con los rendimientos de los equipos y la eficiencia energética actual.
- Propuestas de mejora para optimizar la instalación.
- Partes del proceso en los que es preferible invertir en función del resultado deseado ya sea, mejora de la eficiencia energética, mejora de emisiones o mejora de costes energéticos.
- Ahorros económicos estimados tras la implantación de la mejora.
- Inversión necesaria para la consecución de dichos ahorros económicos.

7.2 MATERIAL NECESARIO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA

Para poder llevar a cabo satisfactoriamente una auditoría energética en una EDAR se debe disponer de ciertos equipos y herramientas de medida fundamentales. A continuación se detallan algunos de ellos:

- Analizador de redes eléctricas.
- Analizador de gases de combustión.
- Luxómetro.
- Caudalímetro ultrasónico portátil.
- Cámara termográfica.
- Cámara de fotos.
- Equipos portátiles de medida, tipo data logger.
- Anemómetro-Termohigrómetro.
- Medidor de infiltraciones.
- Ordenador portátil.
- Equipo completo de herramientas.

- Material de seguridad.

Del instrumental citado anteriormente para medición cobran especial relevancia en EDAR los analizadores de redes, los luxómetros, los caudalímetros y la cámara termográfica.

Los analizadores de redes son esenciales ya que permiten realizar análisis y estudios de consumo energético. Con esta herramienta se pueden descubrir averías, fallos y defectos más comunes en la red eléctrica:

- La calidad de la energía eléctrica consumida: transitorios, armónicos, interarmónicos, fluctuaciones de tensión, interrupciones y desequilibrios.
- Perfil de consumo eléctrico de las distintas partes de la EDAR.



Figura 55. Ejemplos de analizadores de redes.

Los puntos de medida con esta herramienta en una EDAR son los siguientes:

- Cuadro general (para análisis global de la planta)
- Cuadros secundarios o CCM's (para análisis parcial)
- Grandes consumidores (análisis específico)
- Equipos susceptibles de mejoras de eficiencia

La forma correcta de medir en cabecera de instalación o en cuadros secundarios aparece reflejada en las siguientes figuras.

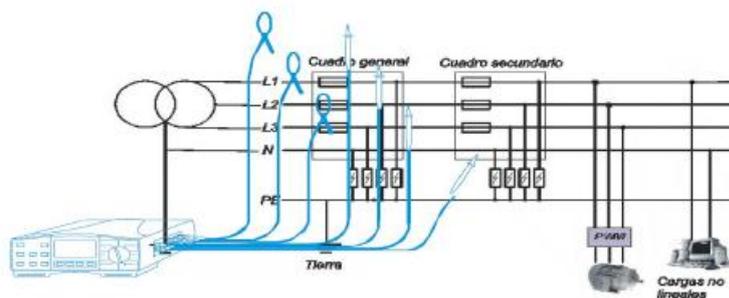


Figura 56. Medición en cabecera de instalación.

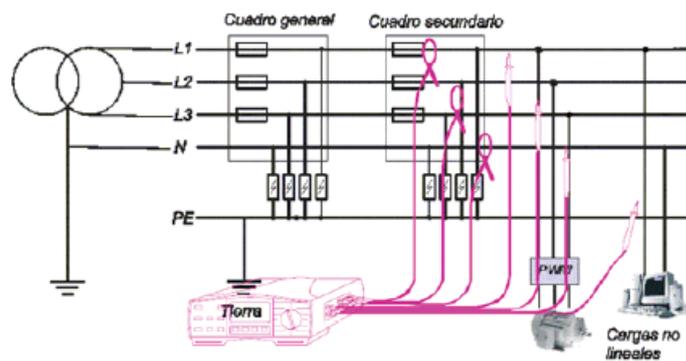


Figura 57. Medición en cuadros secundarios o CCM's.

A la hora de evaluar el estado lumínico y su consumo, es muy útil el luxómetro pues se pueden conseguir ahorros considerables tanto en las oficinas como en los edificios de proceso y el alumbrado exterior.

La utilización del caudalímetro ultrasónico portátil es muy efectiva ya que permite realizar la medición de caudal en cualquier punto y sin entrar en contacto con el fluido.



Figura 58. Ejemplo de caudalímetro ultrasónico portátil.

Por último, es interesante el uso de cámara termográfica ya que con ella se puede verificar fugas de calor, estado de los aislamientos, infiltraciones de aire, entre otras. Con dicha herramienta se fotografía la radiación de calor (luz infrarroja) invisible al ojo humano emitida por los objetos. Es de útil aplicación que la cámara disponga de software de análisis de datos obtenidos en las termografías para proceder a futuras valoraciones.

8. CONCLUSIONES

Las auditorías energéticas son una herramienta que puede ser utilizada para analizar el consumo y la eficiencia energética de las EDAR, con una metodología sencilla y relativamente pocos parámetros de medida, para obtener una información muy robusta sobre la gestión energética.

Los valores de las medidas correctoras obtenidas en diferentes casos de estudio se han mostrado coherentes con la realidad energética de las EDARs. Se puede afirmar que las medidas correctoras propuestas son consistentes y se han podido identificar los puntos críticos de baja eficiencia energética en este tipo de instalaciones.

Es necesario aplicar esta metodología a más EDAR, para validar la metodología propuesta.

Se ha comprobado que los puntos críticos de mayor consumo energético se producen en el tratamiento secundario seguido del tratamiento primario.

De las medidas de ahorro energético expuestas en el capítulo cuatro existen algunas cuya implantación supone una inversión baja y su amortización por tanto requiere un periodo breve de tiempo y otras cuya inversión es alta pero la repercusión tanto energética como económica es tan elevada que igualmente su periodo de amortización es relativamente bajo. También hay otras cuyas inversiones económicas son más elevadas y requieren por tanto un estudio del ahorro energético que se produce en caso de realizar la inversión con la finalidad de hallar el plazo de amortización y así conocer la rentabilidad o no del cambio. Como se ha visto también, las medidas expuestas en el capítulo cinco no repercuten en la reducción del consumo energético pero sí en el ahorro económico pues su función es la optimización de la factura eléctrica.

A continuación se detalla un resumen donde se concentran las recomendaciones a realizar en las instalaciones propuestas en este trabajo según dos categorías: la primera, según el coste de la inversión y la segunda, según el potencial de ahorro.

8.1 MEDIDAS EN FUNCIÓN DEL COSTE DE INVERSIÓN

La adopción de las medidas correctoras propuestas, se pueden agrupar en tres categorías según su coste de inversión. La primera categoría comprende aquellas medidas con un coste de inversión bajo, la segunda a las medidas con coste de inversión medio, y, por

último, la tercera a medidas con un alto coste de inversión. Con la adopción de las medidas clasificadas a continuación pueden conseguirse ahorros máximos que rondan los 100.000 € y mínimos de cientos de euros.

MEDIDAS CON BAJO COSTE DE INVERSIÓN

En este grupo se engloban aquellas medidas cuya inversión no supera la cifra estimada de 1.000 €. Estas son:

- Arrancadores estáticos. El uso de arrancadores estáticos en los motores minimiza los golpes y vibraciones, incrementa la vida útil y la eficiencia de los equipos.
- Variadores de velocidad. Ofrece la posibilidad de variar las velocidades de operación. Entre los más utilizados se encuentran los variadores de frecuencia que evitan el desgaste mecánico prolongando así la vida de la máquina, aparte de mejorar el factor de potencia minimizando así el uso de baterías de condensadores en la instalación.
- Mejora en el factor de potencia. La instalación de baterías de condensadores para compensar la energía reactiva evita el recargo en la facturación de la energía, además de reducir las caídas de tensión y salvaguardar la vida útil de la instalación.
- Protocolo de mantenimiento periódico. Su influencia es determinante en la optimización de la instalación pues con un buen mantenimiento de equipos e instalaciones se puede llegar a aumentar la vida útil de los mismos, minimizar los tiempos de parada y averías, garantizar el buen funcionamiento, entre otros.
- Optimización de la factura. Una gestión adecuada en la contratación y uso de las tarifas más adecuadas a las necesidades reales de cada instalación puede suponer un gran ahorro económico para ésta. Así, la selección de la tarifa se deberá realizar en función del número de horas y periodos horarios de utilización de la instalación a plena carga. El ajuste de la potencia contratada se deberá realizar conforme a la realmente utilizada para que no existan penalizaciones económicas en la facturación.
- Edad de fango. Con la variación del parámetro de edad de fango se pueden obtener ahorros energéticos sin variar la calidad de éste, siempre y cuando se tenga en cuenta el coste de la gestión de dicho fango.

- Guía de buenas prácticas. Con el uso de esta guía de buenas prácticas mejora no sólo la calidad del agua sino también la calidad del servicio, de la instalación y del medio ambiente.

En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de aplicación de las medidas citadas en casos de estudio con sus respectivos ahorros económicos y energéticos.

Tabla 12. Medidas con bajo coste de inversión.

Mejora	EDAR	Ahorro energético (kWh·año⁻¹)	Ahorro económico (€·año⁻¹)	Capítulo donde se encuentra
Variadores de velocidad	La Cartuja	885.000	95.403*	4.4
	La Hoya	210.239	22.663,76*	
Mejora en el factor de potencia	Martorell	0	8.227	4.5
Protocolo de mantenimiento periódico	Martorell	0	1.617	4.8
Ajuste de la tarifa contratada	Martorell	0	6.320	5.2
Ajuste de la potencia contratada	Martorell	0	1.227	5.3

*Suponiendo un precio de la energía del orden de 0,1078 €·kWh⁻¹.

Las medidas correctoras expuestas previamente se han clasificado en función de los costes de inversión con el fin de establecer un orden de prioridades según este indicador.

MEDIDAS CON COSTE DE INVERSIÓN MEDIO

Se engloban aquí las medidas cuyo coste de inversión puede oscilar entre 1.000 y 10.000 €. Las medidas son:

- Optimización de los grupos de bombeo. Funcionando la bomba en su punto óptimo se consiguen importantes beneficios no sólo energéticos sino también en rendimientos de la propia máquina. Además, el diseño y/o montaje de bombas de pequeña potencia que entran en cascada según la demanda requerida en cada momento hace que los equipos se ajusten al máximo a los requerimientos de la instalación lo que implica que la planta funcione de forma eficiente.

- Adecuación de la capacidad de los equipos a la demanda real. Una solución sería la laminación de caudales pero su aplicación es dificultosa para la mayoría de EDAR.
- Modularidad de la instalación. La versatilidad de los equipos y de la instalación contribuye beneficiosamente a la disminución de la facturación eléctrica.
- Mejoras en iluminación. Con el establecimiento de las medidas como el aprovechamiento de la luz natural, adaptación del nivel de iluminación, sustitución de lámparas, entre otras, se puede optimizar la instalación obteniendo un ahorro energético considerable además de mejorar la calidad de trabajo de los empleados.
- Sinergia de cosustratos. Esta medida es interesante para aquellas plantas con instalaciones de cogeneración pues su finalidad es optimizar la producción de biogás.
- Calorifugado de digestores. Con el calorifugado tanto de los digestores como de las tuberías de calentamiento de fango se evitan las pérdidas de calor y se mantiene una temperatura estable en los digestores.

A continuación se muestran algunos ejemplos de aplicación de las medidas citadas con sus respectivos ahorros económicos y energéticos.

Tabla 13. Medidas con coste de inversión medio.

Mejora	EDAR	Ahorro energético (kWh·año ⁻¹)	Ahorro económico (€·año ⁻¹)	Capítulo donde se encuentra
Optimización de los grupos de bombeo	Martorell	4.560	491	4.3
Mejoras en iluminación	La Cartuja	465.000	50.127*	4.7
	La Hoya	5.968	643,35*	
Sinergia de cosustratos	Copero	870.000	87.000	4.10

*Suponiendo un precio de la energía del orden de 0,1078 €·kWh⁻¹.

MEDIDAS CON ELEVADO COSTE DE INVERSIÓN

En este conjunto se encuentran las mejoras cuyo coste de adquisición e implementación supera normalmente los 10.000 € (a depender del fabricante y complejidad de la instalación). Las medidas son las que se exponen a continuación:

- Uso de energías renovables. El aprovechamiento de los recursos naturales disponibles en la instalación mediante el uso de energías renovables como puede ser la cogeneración, la energía fotovoltaica, la energía eólica o la hidráulica repercute potencialmente en el ahorro energético consiguiendo en algunos casos ahorros de orden superior al 40%.
- Sistema de control avanzado para aireación. La implantación de un sistema de control avanzado para aireación en el reactor biológico deriva en una mejora de la calidad del efluente así como en un ahorro energético y económico. Gracias a estas plataformas se puede controlar eficazmente el reactor biológico de manera que se ahorre tanto en el consumo de soplantes para el aporte de oxígeno como en los aditivos necesarios para alcanzar la calidad establecida.
- Sistemas de distribución de aire. El proceso de aportación y distribución de aire representa una gran parte del consumo energético de una planta de tratamiento de aguas por lo que mejoras como el cambio de equipos o limpieza de los existentes reportan un ahorro económico elevado.
- Concentración de aguas residuales de varias poblaciones en EDARs de mayor tamaño. La ineficiencia de la planta depende en gran medida de la diferencia existente entre el caudal tratado y el caudal para el que la instalación fue diseñada. Se debe tender a hacer uso de grandes estaciones de depuración y en caso de no poder ser así, evaluar otros métodos que aun siendo algo menos eficientes no reportan un consumo excesivo en electricidad. Otra opción es aprovechar la instalación de una pequeña depuradora mediante un rediseño para bombear el agua residual a plantas de mayor capacidad.
- Actualización de equipos por modelos de Alta Eficiencia. Los equipos de Alta Eficiencia ofrecen un rendimiento muy superior en fase operativa, lo que puede conllevar la reducción del número de equipos necesarios en funcionamiento.
- Telegestión. Gracias a la telegestión se mejora la gestión energética y su eficiencia obteniendo así un ahorro económico.

- Automatización de la desodorización. Seccionando la automatización por edificios de procesos se pueden asignar consignas diferentes para cada proceso optimizando así el ahorro energético.
- Biogás como combustible para vehículos. Con el uso de este BioEDAR se consigue un combustible con una fuente de energía renovable que no contiene gases de efecto invernadero y reduce las emisiones de CO₂.

En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de aplicación de las medidas citadas con sus respectivos ahorros económicos y energéticos.

Tabla 14. Medidas con elevado coste de inversión.

Mejora	EDAR	Ahorro energético (kWh·año⁻¹)	Ahorro económico (€·año⁻¹)	Capítulo donde se encuentra
Uso de energías renovables	Pilar de la Horadada	159.500	76.000	4.1
	La Cartuja	685.000	73.843*	
Actualización de equipos por modelos de Alta Eficiencia	Girona	854.465	85.439	4.2
	La Cartuja	1.400.000	150.920*	
	Murcia Este	673.899	54.869,76	
Sistema de control avanzado para aireación	EDAR Murcia Este	186.572	15.190,88	4.6
Sistemas de distribución de aire	EDAR Murcia Este	147.138	11.980,12	4.6
Telegestión	Martorell	96.745	18.869,12	4.6
Automatización de la desodorización	La Cartuja	1.200.000	129.360	4.10

*Suponiendo un precio de la energía del orden de 0,1078 €·kWh⁻¹.

8.2 MEDIDAS EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DE AHORRO

Algunas de las medidas presentadas anteriormente conllevan un ahorro energético bastante elevado mientras que otras repercuten de manera menos significativa. A continuación, se adjunta la tabla donde han sido ordenadas estas mejoras según el potencial de ahorro energético en % con respecto al consumo energético antes de aplicar la mejora, de manera decreciente. Nótese que estos valores se corresponden con los ejemplos adjuntos en el trabajo y que pueden variar significativamente de una EDAR a otra.

Tabla 15. Medidas en función del potencial de ahorro.

Mejora	Potencial ahorro energético (%)	Mejora	Potencial ahorro energético (%)
Energías Renovables: Fotovoltaica	47	Telegestión	8,5
Energías Renovables: Cogeneración	40	Energías Renovables: Hidráulica	No hay datos
Mejoras en la Iluminación	15-50	Optimización de los grupos de bombeo	No hay datos
Sistemas de Distribución de Aire	10-40	Adecuación de la capacidad de los equipos a la demanda real	No hay datos
Sistema de Control Avanzado de la Aireación	35	Modularidad de la instalación	No hay datos
Energías Renovables: Eólica	15-30	Guía de Buenas Prácticas	No hay datos
Variadores de Velocidad	19-27	Automatización de la Desodorización	No hay datos
Actualización de equipos por modelos de Alta Eficiencia	17-23	Edad de Fango	No hay datos
Arrancadores Estáticos	10-20	Calorifugado de Digestores	No hay datos
Protocolo de Mantenimiento Periódico	7-12	Biogás como combustible para vehículos	No hay datos
Sinergia de Cosustratos	9,1	Concentración de aguas residuales de varias poblaciones en EDARs de mayor tamaño	No hay datos

Según los datos cuantitativos obtenidos en la tabla se deduce que las medidas correctoras que producen una mayor eficiencia energética son aquellas relacionadas con el uso de energías renovables mientras que las de menor eficiencia son la sinergia de cosustratos y la telegestión.

9. BIBLIOGRAFÍA

PUBLICACIONES, ARTICULOS Y LIBROS

Abadía Sánchez, R; Rocamora Osorio, MC; Ruiz Canales, A. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

ACA. (2013). *Telecontrol de l'energia al sistema de sanejament de l'EDAR de Martorell*.

ACA. (2011). *Aplicació del programa d'estalvi i eficiència energètica a les instal·lacions de sanejament d'aigües residuals de Catalunya*.

Aguiló, P; Martínez, B; Curto, J. (2013). *Optimización del consumo energético en reactores biológicos de fangos activos. El caso de la EDAR del Prat (Barcelona)*.

Albaladejo, A. (2014). *Costes energéticos de la depuración*.

Albadalejo Ruiz, A. (2013). *Parametrización del consumo energético de las depuradoras de aguas residuales de la Región de Murcia*.

Albadalejo Ruiz, A; Martínez Muro, JL; Santos Asensi, JM. (2015). *Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana*.

Albadalejo Ruiz, A; Trapote Jaume, A. (2013). *Influencia de las tarifas eléctricas en los costes de operación y mantenimiento de las depuradoras de aguas residuales*.

Astals Garcia, S; Mata Álvarez, J. (2013). *Optimització i modelització de processos avançats de digestió anaeròbia*.

Castell, D.; García, M.; et al. (2011). *Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías*.

Dalla, A.; Rigotto, C.; Staggemeier, R.; Soliman, M.C.; de Souza, FG; Henzel, A; Santos, E.L.; do Nascimento, C.A.; de Quevedo, D.M.; Fleck, J.D.; Heinzelmann, L.S.; Almeida, S.E.D.; Spilki, F.R. (2015). *Environmental Science and Pollution Research* (22) 13: 9899-991.

Díaz Álvarez, S; Folgueras Díaz, MB. (2012). *Auditoría energética en una planta de tratamiento de agua potable*.

ECOTEC. (2015). *Depuración de gases para plantas de tratamiento de aguas y residuos sólidos urbanos*.

Fernández Ramírez, L; Estévez Pastor, FS. (2012). *Mejoras en la eficiencia energética de una EDAR mediante codigestión. Estudios en planta piloto y pruebas a escala real*.

Ferran Ribas, Ignasi Rodríguez-Roda Layret, Pere Clara, Joaquim Comas Matas, J. Serrat (2008). *Mejora del control de la nitrificación/desnitrificación. Desarrollo e implementación de un sistema experto en la EDAR Vic*.

Ferrer Torregrosa, C; Olivas Masip, E; Chiva Mengod, B; Cabedo Oliver, JM; García Ventoso, M; Basiero Sichert, JA. (2009). *Análisis energético de los procesos de una EDAR*.

Gewald, D.; Siokos, K.; Karellas, S.; Spliethoff, H. (2012). *Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. Renewable & Sustainable Energy Reviews (16) 4: 1779-1789*.

González González, MG (2012). *Estudio y diseño de una planta de depuración de aguas residuales*.

González Martínez, JA; Moreno Mora, PJ. (2009). *Metodología y equipos para el control y la mejora de la eficiencia energética en EDAR urbanas*.

Hernández Sancho, F; Molinos Senante, M; Sala Garrido, R. (2011). *Eficiencia energética, una medida para reducir los costes de operación en las estaciones depuradoras de aguas residuales*.

iAgua (2014). *Eficiencia energética en las estaciones depuradoras de aguas residuales*.

iAgua (2015). *La depuradora de La Cartuja mejorará su eficiencia energética tras una inversión de 5 millones de euros*.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2010). *Estudio de Prospectiva "Consumo Energético en el Sector del Agua"*.

Inexa, Ingeniería y Exportación de Tecnología, S.L. (2009). *Deterioro del rendimiento en bombas y su prevención (03/2009 vs 1.0)*.

Jiménez Coloma, N. (2009). *Aspectos generales en la gestión y explotación de una EDAR*.

- Lee, I; Lim, H; Jung, B; Colosimo, MF; Kim, H. (2015). *Evaluation of aeration energy saving in two modified activated sludge processes. Chemosphere 140: 72-78.*
- Marqués, F; Pradas, P; Lardín, C y Simón, P. (2010). *Control del proceso biológico mediante la medida en continuo de la edad de fango. Experiencias en la EDAR Molina de Segura (Murcia).*
- Martín González, M; Moya Sánchez, N. (2011). *Valorización del biogás de la EDAR Murcia Este. Uso del biogás como combustible de vehículos.*
- Metcalf y Eddy. MC Graw Hill. 1995. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.*
- Molina, J; Yáñez, A; Jácome Burgos, A; Suárez López, J. (2009). *Nitrificación en reactores biopelícula de membrana tubular permeable a gases.*
- Moragas Bouyat, L. (2008). *EDAR de Sabadell- Riu Sec. Ampliación con tecnología BRM.*
- Morenilla, JJ. (2007). *Sistemas de control y optimización del consumo energético en EDAR.*
- Olsson, G., Nielsen, M., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A. y Steyer, J-P. (2005). *Instrumentation, control and automation in wastewater systems.*
- Prieto, C. (2010). *La hidroelectricidad en el marco de las energías renovables.*
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. BOE nº 224 18-09-2004.
- Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo. *Código Técnico de la Edificación (CTE) Exigencia básica DB HE5 “Contribución fotovoltaica mínima de energía fotovoltaica”.*
- Rodríguez, G. (2013). *Eficiencia energética en el ciclo integral del agua.*
- Segura Pachón, D; Fernández Latorre, F; Soria Tonda, JM; Muñoz Aguilar, FJ. (2011). *Guía práctica de calificación ambiental.*
- Simón, P; Lardín, C; Abellán, M; Ponsoda, J.M. (2009). *Limpieza con ácido fórmico de los difusores de membrana para la aireación de un proceso de fangos activos.*
- Simón Andreu, P; Lardín Mifsut, C; Abellán Soler, M. (2012). *Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia.*

Simón, P; Lardín, C; Moreno, B. (2010). *Optimización energética del tratamiento biológico de la EDAR de Ceutí. Parte I: selección de las condiciones de funcionamiento.*

Torres Rojo, JC; Martín González, M. (2009). *Posibilidades de cogeneración energética en la EDAR Murcia Este.*

Velázquez, S; Bueno, C; Martel, G; Conde, J; Blasco, A; Ramos, L; Vera, L; Piernavieja, G; Peñate, B; Sánchez, R; Caballero, C. (2006). *Propuestas para optimizar la autosuficiencia energética de los ciclos del agua.*

WEFPress. (2006). *Automation of wastewater treatment facilities MOP 21 - 3rd Edition.*

Zhang, Z.J.; He, X.F.; Kusiak, A. (2015). *Data-driven minimization of pump operating and maintenance cost. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 40: 37-46.*

CENTROS, ASOCIACIONES y RECURSOS PÚBLICOS.

ADECAGUA: Asociación Para la Defensa de la Calidad de las Aguas (España).

Agencia Europea de Medio Ambiente.

AQUA España: Asociación española de empresas de tratamiento y control de aguas.

Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA).

Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) Asociación que engloba a las empresas que actúan en el campo de la captación, tratamiento, distribución y depuración de aguas en España.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Calidad de las Aguas (MMA) Servicio de Tratamiento y Calidad de las Aguas del Ministerio español de Medio Ambiente.

EEAE, 2015. Eficiencia Energética y Auditorías Energéticas. Asignatura del Máster Automatización y Telecontrol para la Gestión de Recursos Hídricos y Energéticos (MATRE) de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

International Association Water Quality (IAWQ).

Water Environment Federation (WEF).

PÁGINAS WEB

Adexcop. 2015. www.adexcop.com

Aquamac. 2006. <http://aquamac.itccanarias.org>

APPA. 2015. www.appa.es

Cavo Energías. 2015. cavoenergias.com

CONAMA. 2014. www.conama.org

Degremont. 2012. www.degremont.es

EGEVASA. 2015. www.egevasa.es

El Periodic. 2012. www.elperiodic.com

EMASESA, 2015. www.emasesa.com

EMUASA. 2011. www.emuasa.es

Energética XXI. 2013. www.energetica21.com

EPSAR. 2010, 2015. www.epsar.gva.es

European Small Hydropower Association. 2006. www.esha.be

Gobierno de Canarias. 2015. www.gobiernodecanarias.org

INIMA. 2011. www.inima.es

IVEM. 2015. www.ivem.es

Schneider Electric. 2014. www.schneider-electric.com

Sisltech. 2012. www.sisltech.net/es

Tecnoaqua. 2013, 2014, 2015. www.tecnoaqua.es

Tessai. 2011. www.tessai.es