



Título del Trabajo Fin de Máster:

***ANÁLISIS DE LA MEJORA DE LA
EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS
PROCESOS DE UNA EDAR***

Intensificación:

TRATAMIENTO DE AGUAS

Autor:

ALMAZÁN LOPE, JESSICA

Director/es:

DR. FERRER POLO, JOSÉ

Fecha: <MARZO, 2014>

Título del Trabajo Fin de Máster:

ANÁLISIS DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PROCESOS DE UNA EDAR

Autor: **ALMAZÁN LOPE, JESSICA**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	JOSÉ FERRER POLO	Fecha de Lectura	<ABRIL, 2014>
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

El presente trabajo determina, el rendimiento energético de cada uno de los procesos que conforman la depuradora objeto del estudio y determina como optimizar energéticamente la instalación, nunca mermando la productividad de la misma, en todo caso mejorándola.

El análisis se realiza relacionando los equipos y variables del proceso con la energía consumida por cada uno de ellos, lo que permite determinar el consumo óptimo de cada proceso y el efecto se obtiene incrementando o reduciendo el consumo energético del mismo.

Para la realización del presente trabajo, se lleva a cabo el siguiente esquema de trabajo:

- Se realiza el estudio de los consumos iniciales (estado 0)*
- Se estudian y se analizan los porcentajes de consumo en cada línea de tratamiento (pretratamiento, tratamiento biológico, tratamiento de fangos, desodorización, etc.)*
- La línea de tratamiento que supone un consumo energético más elevado, se analizara en mayor detalle, y se proponen los procesos en los cuales actuar de cara a obtener unas medidas que sean lo más efectivas posible y supongan un mayor ahorro*
- Se realiza un estudio de las potenciales medidas a emplear en cada uno de los procesos con un potencial de ahorro mayor*

El trabajo introduce, según estudios existentes, los consumos energético generalistas producidos según la tipología de depuración en las estaciones depuradoras de agua urbana existentes en España. Como caso concreto se analiza, partiendo de una EDAR cualquiera de tipo aireación prolongada, los consumos energéticos concretos existentes en la misma y se deduce en qué procesos existe un potencial ahorro mayor.

Inicialmente se describe la estación depuradora de la cual es objeto el estudio, describiendo sus caudales de diseño, línea de tratamiento, equipos instalados, consumos energéticos estimados según potencias por metro cúbico de agua tratada, estudio porcentual de consumos, etc.

Como consecuencia de esta deducción de potenciales ahorros en la estación depuradora estudiada, se plantean tres medidas a analizar de cara a la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones:

- 1. Mejora de la eficiencia del bombeo de cabecera*
- 2. Sustitución de los equipos de aireación biológica*
- 3. Mejora de la transferencia de oxígeno. Difusores del reactor biológico*

De cada una de las mejoras se estudian varias alternativas, se comparan energéticamente y económicamente. Con lo que se extraen unas conclusiones y/o recomendaciones.

Como conclusión, se calculan los porcentajes de ahorro frente al consumo total actual de la EDAR de cada una de las medidas estudiadas para cada mejora planteada; y se comparan dos grupos de

opciones de mejoras y se propone el grupo recomendado en base al estudio realizado, en función de si el plazo de explotación de la planta es de cuatro o de ocho años de duración.

El análisis finalmente alcanza, con los datos de la depuradora estudiada, unas conclusiones que podrán ser extrapolables para cualquier depuradora del mismo sistema o para el estudio de soluciones de cualquier equipo similar a sustituir en cualquier tipo de instalación depuradora.

Las conclusiones son de utilidad para la toma de decisiones respecto a mejora en la eficiencia energética de una depuradora tanto:

-- A nivel global de la depuradora como una primera aproximación de la localización de consumos por procesos, al conocer los consumos energéticos de cada uno de los procesos porcentualmente respecto al resto.

-- Dentro de cada proceso, se estudia el consumo de cada uno de los equipos, extrapolable a otras depuradoras, ya que los equipos suelen ser siempre similares. Con lo que se podrá servir para discernir que equipo presenta mayor consumo y por lo tanto, el que puede representar mayor ahorro actuando sobre él.

-- De los estudios pormenorizados que se realizan se puede realizar una extrapolación para casos con equipos similares, conociendo los ahorros porcentuales que se pueden llegar a obtener al acometer esas actuaciones y el tiempo de amortización. Se estudian diversas mejoras para cada equipo, pudiendo así tomar una decisión de la inversión a realizar.

El present treball determina, el rendiment energètic de cada un dels processos que conformen la depuradora objecte de l'estudi i determina com optimitzar energèticament la instal·lació, mai minvant la productivitat de la mateixa, en tot cas millorant-la.

L'anàlisi es realitza relacionant els equips i variables del procés amb l'energia consumida per cada un d'ells, la qual cosa permet determinar el consum òptim de cada procés i l'efecte s'obté incrementant o reduint el consum energètic del mateix.

Per a la realització del present treball, es du a terme el següent esquema de treball:

-- Es realitza l'estudi dels consums inicials (estat 0)

-- S'estudien i s'analitzen els percentatges de consum en cada línia de tractament (pretractament, tractament biològic, tractament de fangs, desodoració, etc.)

-- La línia de tractament que suposa un consum energètic més elevat, s'analitzara en major detall, i es proposen els processos en els quals actuar de cara a obtindre unes mesures que siguin el més efectives possible i suposen un major estalvi

-- Es realitza un estudi de les potencials mesures a emprar en cada un dels processos amb un potencial d'estalvi major

El treball introduïx, segons estudis existents, els consums energètics generalistes produïts segons la tipologia de depuració en les estacions depuradores d'aigua urbana existents a Espanya. Com a cas concret s'analitza, partint d'una EDAR qualsevol de tipus aireig prolongat, els consums energètics concrets existents en la mateixa i es deduïx en quins processos hi ha un potencial estalvi major.

Inicialment es descriu l'estació depuradora de la qual és objecte l'estudi, descrivint els seus cabals de disseny, línia de tractament, equips instal·lats, consums energètics estimats segons potències per metre cúbic d'aigua tractada, estudi percentual de consums, etc. Com a conseqüència d'esta deducció de potencials estalvis en l'estació depuradora estudiada, es plantegen tres mesures a analitzar de cara a la millora de l'eficiència energètica de les instal·lacions:

1. Millora de l'eficiència del bombament de capçalera

2. Substitució dels equips d'aireig biològic

3. Millora de la transferència d'oxigen. Difusors del reactor biològic

De cada una de les millores s'estudien diverses alternatives, es comparen energèticament i econòmicament. Amb el que s'extrauen unes conclusions y/o recomanacions.

Com a conclusió, es calculen els percentatges d'estalvi enfront del consum total actual de l'EDAR de cada una de les mesures estudiades per a cada millora plantejada; i es comparen dos grups d'opcions de millores i es proposa el grup recomanat basant-se en l'estudi realitzat, en funció de si el termini d'explotació de la planta és de quatre o de huit anys de duració.

L'anàlisi finalment aconseguix, amb les dades de la depuradora estudiada, unes conclusions que podran ser extrapolables per a qualsevol depuradora del mateix sistema o per a l'estudi de solucions de qualsevol equip semblant a substituir en qualsevol tipus d'instal·lació depuradora.

Les conclusions són d'utilitat per a la presa de decisions respecte a millora en l'eficiència energètica d'una depuradora tant:

-- A nivell global de la depuradora com una primera aproximació de la localització de consums per processos, al conèixer els consums energètics de cada un dels processos percentualment respecte a la resta.

-- Dins de cada procés, s'estudia el consum de cada un dels equips, extrapolable a altres depuradores, ja que els equips solen ser sempre semblants. Amb el que es podrà servir per a discernir que equip presenta major consum i per tant, el que pot representar major estalvi actuant sobre ell.

-- Dels estudis detallats que es realitzen es pot realitzar una extrapolació per a casos amb equips semblants, coneixent els estalvis percentuals que es poden arribar a obtenir a l'escometre eixes actuacions i el temps d'amortització. S'estudien diverses millores per a cada equip, podent així prendre una decisió de la inversió a realitzar.

This work determines the energy efficiency of each process involved in the wastewater treatment plant object of study. At the same time establishes how to optimize energetically the facilities increasing its productivity.

The analysis starts with the existing relationship between equipment description and process variables and their energy consumption, which allows to determine the optimal consumption of each process and the effects that increasing or decreasing it have over the global efficiency.

To carry out this work, the following scheme of work is followed:

-- Establishment of the initial energy consumption (stage 0).

-- Study and analysis of each treatment process consumption (pre-treatment, biological treatment, sludge treatment, deodorization, etc)

-- The higher the energy consumption of a treatment process is, the more detailed analysis will be carried out. As a result of it, the processes in which to act will be identified in order to achieve the most effective and with higher savings measures to adopt.

In every process identified a study of potential measures to adopt is carried out.

The work introduces, according to previous studies, the common energy consumptions of the different wastewater treatment technologies existing in most of the urban wastewater treatment plants in Spain. As a case study, the energy consumption of a typical prolonged aeration WWTP is analyzed and the processes with potential higher savings are identified.

Initially the wastewater treatment plant is described, stating its different design flow capacities, treatment processes, equipment, energy consumptions estimated according to power consumption per cubic meter of treated water, energy consumptions percentages, etc.

As a consequence of this study of potential savings in the referred wastewater treatment plant, three energy efficiency measures are settled:

1. Improvement of the efficiency of the inlet pumping station.

2. Biological aeration equipment substitution.

3. Improvement of the oxygen transfer. Diffusion system of the biological reactor.

Various alternatives are studied of every improvement proposed, comparing them energetically and economically. As a result of this, some conclusions and/or recommendations arise.

As a conclusion, the saving percentages versus the actual global consumption of the WWTP of every measure studied are calculated for each improvement planned; two groups of improvement options are compared and the recommended group of measures is analyzed taking into account two different exploitation life periods of four and eight years.

At the end, the analysis obtains some conclusions that could be extrapolated for similar treatment systems facilities or for the feasibility study of similar equipment to substitute in every wastewater treatment plant.

The conclusions arisen are useful for decision making with respect to the energy efficiency of a wastewater treatment plant at:

-- Global level, as a first approach of the identification of process consumptions, settling the energy consumption of every process as a percentage of the total energy consumption of the facility.

-- Process level, the consumption of every equipment is studied, what can be extrapolated to other facilities, due to the fact that the equipment is similar in every facility. At this scale could be useful to identify the equipment that presents the highest rates of energy consumption and thus could suppose the highest savings acting on them.

-- Detailed level, some of the studied carried out could result interesting to assess similar equipment, establishing the percentage savings that could be achieved with these actions and the amortization time. Diverse improvements of every equipment are studied, resulting interesting for the investment decision making.

Palabras clave:

EDAR / eficiencia / energía / depuración

AGRADECIMIENTOS

Dedicado a mis padres, sin ellos hubiese sido imposible llegar hasta aquí. Agradezco a mi pareja y amigos que desinteresadamente han invertido su tiempo y conocimientos para ayudarme a completar este trabajo. Y agradezco a mi tutor la ayuda y orientación que me ha facilitado.

PRESENTACIÓN PERSONAL

Titulación: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Situación laboral: Últimos 6 años trabajando en Vielca Ingenieros (Empresa Consultora)

Actual residencia: Valencia

Email contacto: j.almazanlope@gmail.com

INDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO II. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	9
CAPÍTULO III. ESTADO ACTUAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS DEPURADORAS EN ESPAÑA	12
III.1. POTENCIAL DE AHORRO.....	14
CAPÍTULO IV. AHORRO ENERGÉTICO EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS	18
IV.1. SISTEMAS DE AHORRO ENERGÉTICO A CORTO PLAZO EN DEPURACIÓN	18
IV.2. TENDENCIAS TECNOLÓGICAS ACTUALES EN DEPURACIÓN	23
CAPÍTULO V. DESCRIPCIÓN DE LA EDAR OBJETO DE ESTUDIO	28
V.1. LINEA DE TRATAMIENTO	29
V.2. EQUIPOS Y CONSUMOS	32
V.3. CONSUMO ENERGÉTICO POR METRO CÚBICO DE AGUA TRATADA	33
V.4. ESTUDIO PORCENTAJE DE CONSUMOS DE LA EDAR.....	34
V.5. POTENCIALES MEDIDAS A ANALIZAR.....	36
V.5.1. CONSUMO SOPLANTES DE AIREACIÓN	37
V.5.2. CONSUMO BOMBAS DE CABECERA	38
CAPÍTULO VI. MEDIDAS ANALIZADAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA EDAR	41
VI.1. MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL BOMBEO DE CABECERA.....	41
VI.1.1. ESTADO ACTUAL.....	41
VI.1.2. OPCIONES DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y COMPARATIVA.....	44
VI.1.3. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	53
VI.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
VI.2. SUSTITUCIÓN DE LOS EQUIPOS DE AIREACIÓN BIOLÓGICA.....	57
VI.2.1. ESTADO ACTUAL.....	57
VI.2.2. OPCIONES DE MEJORA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y COMPARATIVA	59
VI.2.3. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	63
VI.2.4. RESUMEN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
VI.3. MEJORA DE LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO. DIFUSORES DEL REACTOR BIOLÓGICO	69
VI.3.1. ESTADO ACTUAL. ANTECEDENTES	69
VI.3.2. OPCIONES DE MEJORA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y COMPARATIVA	71
VI.3.3. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA	75
VI.3.4. RESUMEN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.....	81
VII.1. PORCENTAJE DE AHORRO DE CADA ALTERNATIVA	81
VII.2. AHORROS GLOBALES DE ENERGIA.....	82
VII.2.1. CUATRO AÑOS DE EXPLOTACIÓN.....	82
VII.2.2. OCHO AÑOS DE EXPLOTACIÓN	84
VII.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Precios de la electricidad consumidor industrial.....	8
Figura 2: Diagrama de bloques de una EDAR de aireación prolongada tipo. FUENTE: www.epsar.gva.es/ .	12
Figuras 3 y 4: Ejemplo de plantas de aireación prolongada	12
Figura 5: Número de EDAR en España distribuidas por Comunidades Autónomas en 2010 [3].....	14
Figura 6: Gráfica de la evolución del coste medio de depuración de aguas residuales [7].....	15
Figura 7: Gráfico de la potencia requerida por unidad de tratamiento [6].....	16
Figura 8: Gráfico de la potencia de ahorro por unidad de tratamiento [6]	17
Figura 9: Tabla de potenciales ahorros en la EDAR actuales [6]	17
Figura 10: Ejemplo sistema de control REDOX.....	21
Figura 11: Clasificación europea nuevos motores	21
Figura 12: Turbina de aireación.....	23
Figura 13: Decantadoras centrífugas	24
Figura 14: Cubiertas del pretratamiento de una EDAR	24
Figura 15 y 16: Digestor de fangos y gasómetro de una EDAR de tratamiento convencional.....	26
Figura 17: Planta de compostaje de los fangos procedentes de las EDAR.....	28
Figura 18: Reactor biológico de una EDAR.....	31
Figura 19: Espesadores de fangos de una EDAR	33
Figura 20: Diagrama de bloques de proceso de la EDAR. FUENTE: www.epsar.gva.es	34
Figura 21: Gráfico del histórico de caudales mensuales acumulados de entrada a la EDAR para el periodo de estudio.....	35
Figura 22: Gráfico del caudal de entrada mensual / consumo energético mensual.....	36
Figura 23: Gráfico de la distribución del consumo de energía en la EDAR por procesos.....	37
Figura 24: Gráfico de la distribución del consumo energético de la EDAR en el tratamiento biológico.....	37
Figura 25: Bomba centrífuga	43
Figura 26: Gráfico de las curvas de funcionamiento de las bombas de cabecera existentes a velocidad nominal	44
Figura 27: Gráfico de la curva resistente y del bombeo de cabecera	45
Figura 28: Gráfico de la potencia consumida por la bomba a partir de las curvas	45
Figura 29: Representación de cada tipo de regulación de bombeo. FUENTE: catálogo ABB.....	46
Figura 30: Gráfico de las curvas caudal-potencia para cada tipo de regulación de bombeo. FUENTE: AIMEE	47
Figura 31: Gráficos de los consumos de potencia mediante el método de regulación por válvula de estrangulamiento y el de válvula de bypass [10]	47
Figura 32: Gráfico del consumo de potencia mediante el método de variador de frecuencia [10]	48
Figura 33: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad fija y al 20% del caudal.....	51
Figura 34: Gráfico de las curvas Q-H velocidad variable al 60% del caudal	51
Figura 35: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad fija al 66% del caudal	52
Figura 36: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad variable y al 85% del caudal	53
Figura 37: Gráfico de la curva funcionamiento variador de frecuencia	53
Figura 38: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de regulación en bombeo de cabecera	54
Figura 39: Gráfico de las potencias consumidas por tipo de regulación en bombeo de cabecera	54
Figura 40: Gráfico del ahorro mensual por número de variadores con respecto al sistema actual de regulación.....	55
Figura 41: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejora de la eficiencia del bombeo de cabecera.....	57
Figura 42: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejora de la eficiencia del bombeo de cabecera.....	57
Figura 43: Imágenes de una soplante de émbolos rotativos [14]	59
Figura 44: Consumo de aire requerido / suministrado soplante existente	60
Figura 45: Curvas características de la soplante existente instalada [14].....	62
Figura 46: Soplante de levitación magnética	63
Figura 47: Gráfico de las líneas de tendencia caudal – potencia de ambas alternativas	64
Figura 48: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de mejora en las soplantes del tratamiento biológico.....	65
Figura 49: Gráfico potencias consumidas por tipo de mejora en las soplantes del tratamiento biológico ..	65

Figura 50: Gráfico del ahorro mensual por tipo de mejora con respecto al sistema actual de suministro de aire	66
Figura 51: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejoras de la eficiencia de las soplantes del tratamiento biológico	68
Figura 52: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejoras de la eficiencia de las soplantes del tratamiento biológico	68
Figura 53: Imagen instalación red de difusores en un reactor biológico	72
Figura 54: Gráfico de la evolución presión durante las dosificaciones aplicadas	75
Figura 55: Gráfico de la evolución caudal difusor - %SOTE para ambos tipos de difusores [21]	76
Figura 56: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de mejora en los difusores biológicos	76
Figura 57: Gráfico de las potencias consumidas por tipo de mejora en los difusores biológicos	77
Figura 58: Gráfico del ahorro mensual por tipo de mejora con respecto al estado actual de difusores	77
Figura 59: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejora del consumo por los difusores	79
Figura 60: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejora del consumo por los difusores	80
Figura 61: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para los dos grupos de alternativas	85
Figura 62: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para los dos grupos de alternativas	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencias y consumos de los equipos de la EDAR	33
Tabla 2: Tabla del ahorro total mensual y anual según el número de variadores con respecto al sistema actual de regulación	54
Tabla 3: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de un variador de frecuencia	55
Tabla 4: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de tres variador de frecuencia	55
Tabla 5: Cuadro de características de la soplante existente instalada. FUENTE: MAPNER	59
Tabla 6: Tabla del ahorro total mensual y anual de las alternativas propuestas con respecto al sistema actual de suministro de aire al tratamiento biológico	65
Tabla 7: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de un variador de frecuencia	66
Tabla 8: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la sustitución del equipo actual por uno más eficiente	66
Tabla 9: Tabla de las características de los difusores existentes	69
Tabla 10: Tabla del ahorro total mensual y anual de las alternativas propuestas con respecto al sistema actual de difusores	76
Tabla 11: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la limpieza de los difusores	76
Tabla 12: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la sustitución de los difusores por unos de alta eficiencia	77
Tabla 13: Tabla de los porcentajes de ahorro frente al consumo total actual de la EDAR de cada una de las medidas planteadas	81
Tabla 14: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas recomendado para un periodo de explotación de 4 años	82
Tabla 15: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas menos recomendable para un periodo de explotación de 4 años	82
Tabla 16: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas recomendado para un periodo de explotación de 8 años	84
Tabla 17: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas menos recomendable para un periodo de explotación de 8 años	84

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de la economía mundial se basa en el consumo de energía, es necesario para nuestro desarrollo económico y social. Esto choca con la concienciación medioambiental, afortunadamente cada vez más instaurada en las sociedades más desarrolladas.

Algunas alarmas han comenzado a ponerse en marcha debido al agotamiento de las energías no renovables, por ejemplo en España, que tiene gran dependencia energética del exterior, el 91% de la producción energética es de este tipo. Algunas de las energías no renovables (las de tipo fósil) tienen un ciclo de formación de millones de años, por lo que, al ritmo de consumo actual, terminarán agotándose o a medio plazo dejarán de ser económicamente rentables.

El consumo de energía, junto con el transporte, suponen la principal causa de las emisiones de gases de efecto invernadero, gases responsables del posible cambio climático (con el aumento de temperatura, subida del nivel del mar y disminución de precipitaciones) por la generación de residuos, emisiones atmosféricas, contaminación de aguas y suelos, etc. que producen.

Como se indicaba, hay países con gran dependencia energética, como la gran mayoría de la Unión Europea, que registra un aumento constante. Actualmente, cubre sus necesidades energéticas en un 50% con productos importados, y si se continúa de la misma manera este porcentaje ascenderá al 70% en 2020 o 2030. Esta dependencia externa acarrea riesgos económicos, sociales, ecológicos y físicos para estos países. Desde el punto de vista geopolítico, el 45% de las importaciones de petróleo proceden de Oriente Medio, y el 40% de gas natural de Rusia. La Unión Europea no dispone de medios energéticos para influir en el mercado internacional, por lo que esta vulnerabilidad afecta considerablemente a las subidas de precio de la energía [5].

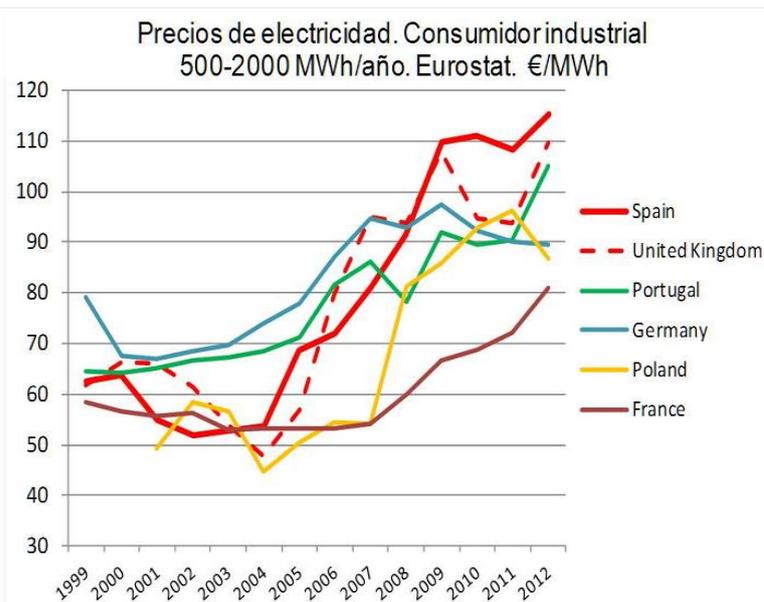


Figura 1: Precios de la electricidad consumidor industrial

En la figura 1 se representa la evolución del precio de la electricidad para las industrias en algunos de los países europeos de referencia entre los años 1999 y 2012. Se puede observar como España es de los países que mayor subida del precio de la electricidad ha sufrido durante los últimos años.

Por ello, una de las formas de actuar para limitar e impedir las gravísimas consecuencias ambientales, sociales y económicas, relacionadas con el creciente consumo de energía, entre otras, consiste en reducir el consumo energético.

El reto por optimizar la eficiencia energética de las instalaciones, lejos de ser un proceso discreto en el tiempo, se conforma como una cultura de trabajo íntimamente ligada a los constantes avances tecnológicos.

Este reto es asumido por la administración y las empresas explotadoras, que tanto desde un punto de vista medioambiental como desde un punto de vista económico, ven fundamental la optimización energética de los sistemas de saneamiento y depuración.

El coste del consumo energético de una Estación de Depuración de Agua Residual (en adelante EDAR) se cifra entre el 15 y el 30% del coste total de explotación.

La optimización de los procesos a nivel energético es especialmente importante en aquellas instalaciones que se encuentran trabajando por debajo de su capacidad de tratamiento, instalaciones en las que el ratio energético suele estar, en la mayoría de los casos, alejado del mejor posible.

Es por tanto fundamental llevar a cabo una optimización energética de las instalaciones, sin comprometer con ello los rendimientos de las mismas. Para ello se debe llevar a cabo un análisis conjunto del patrón de consumo por procesos, del rendimiento y de variables de control de los mismos.

La demanda energética es específica para cada tipo de tratamiento empleado y dependiente del tamaño de la instalación. De esta forma, cuanto mayor es la estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), disminuye el ratio energético para un mismo tratamiento, por lo que se puede afirmar que existe una economía en escala. Por tanto, el consumo energético varía de unas instalaciones a otras, dependiendo de factores como: el tamaño de la instalación, tipo de procesos, etapas de tratamiento y carga influente [4].

La eficiencia energética en las EDAR es consecuencia de la acción conjunta del establecimiento de las Medidas de Optimización Energética y de la recuperación de energía de los procesos. La diferencia de consumo eléctrico entre una instalación optimizada y otra que no lo esté puede oscilar entre el 20% y el 60%. Por lo tanto, en el peor de los casos (20% de la reducción), la aplicación de estos principios a las EDAR que actualmente hay en servicio en España y que depuran anualmente 13.000 hm³, representa una reducción potencial del consumo eléctrico de 1.300 GWh/año, cuyos costes evitados ascenderían a 130 millones de euros, y el ambiental de 1.656.000 tCO₂ [4].

OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

CAPÍTULO II. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El objetivo del presente estudio es determinar el rendimiento energético de cada uno de los procesos que conforman la depuradora objeto del estudio y establecer cómo optimizar energéticamente la instalación, nunca mermando la productividad de la misma, en todo caso mejorándola.

El análisis se realiza relacionando los equipos y variables del proceso con la energía consumida por cada uno de ellos, lo que permite determinar el consumo óptimo de cada proceso y el efecto que se obtiene incrementando o reduciendo el consumo energético del mismo.

Para la realización del presente documento, se lleva a cabo el siguiente esquema de trabajo:

- Se realiza el estudio de los consumos actuales.
- Se estudian y se analizan los porcentajes de consumo en cada línea de tratamiento (pretratamiento, tratamiento biológico, tratamiento de fangos, desodorización, etc.).
- Las líneas de tratamiento que supongan un consumo energético más elevado, se analizarán en mayor detalle, y se propondrán los procesos en los cuales actuar de cara a obtener unas medidas que sean lo más efectivas posible y supongan un mayor ahorro.
- Se realiza un estudio de las potenciales medidas a emplear en cada uno de los procesos con un potencial de ahorro mayor.

Los procesos analizados de forma independiente son: el bombeo de cabecera, el pretratamiento, el tratamiento biológico, la desodorización, el proceso de tratamiento y deshidratación de fangos, y el alumbrado y tomas de corriente.

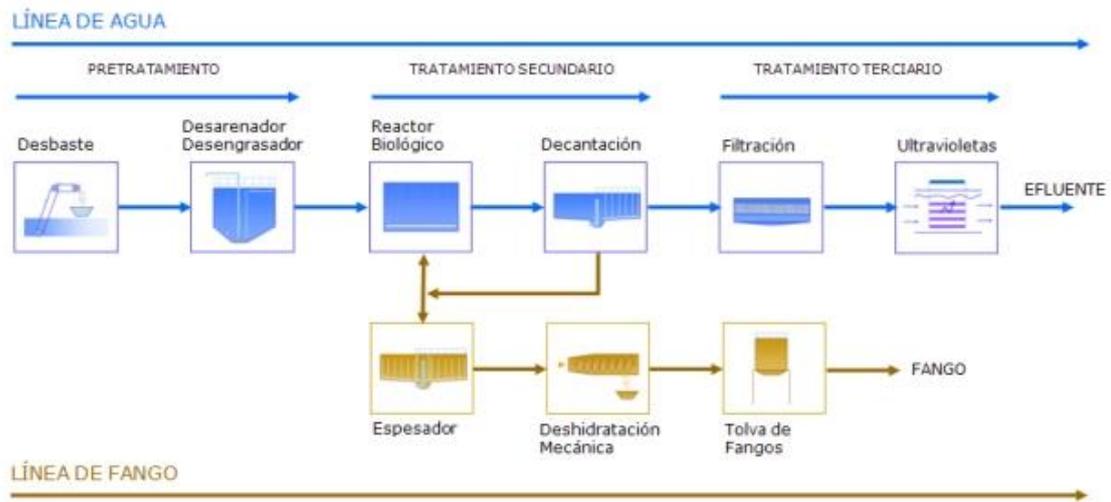


Figura 2: Diagrama de bloques de una EDAR de aireación prolongada tipo.
FUENTE: www.epsar.gva.es/

Se presta especial atención, analizándose con mayor desglose al tratamiento biológico, debido a que éste supone el 70% del consumo de la EDAR estudiada.

Las medidas de ahorro energético que se plantean, están enfocadas en busca de un diseño más eficiente, una reducción de los costes de mantenimiento y reparaciones, un consumo adaptable a los requerimientos de cada instante mediante los variadores de frecuencia, entre otros.



Figuras 3 y 4: Ejemplo de plantas de aireación prolongada

ESTADO ACTUAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS EDAR EN ESPAÑA

CAPÍTULO III. ESTADO ACTUAL DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS DEPURADORAS EN ESPAÑA

Según indica el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011 – 2020 [5]: *El caudal de las necesidades de abastecimiento de agua para uso humano y la posterior depuración de sus aguas residuales se estima en una horquilla entre los 160 y los 180 litros por persona y día.*

El sector del tratamiento de aguas ha incrementado el consumo de energía no sólo por el crecimiento poblacional sino también por el proveniente de las exigencias sobre calidad y depuración de las aguas residuales según se indica en la Directiva 91/271 y el derivado Plan Nacional de Saneamiento y Depuración, que se ha traducido en la entrada en servicio de numerosas estaciones de depuración de aguas residuales en toda la geografía española.

Según datos del Ministerio de Industria, en 2010 estaban en servicio en España 2.950 EDAR para el tratamiento de las aguas urbanas, 600 más que en 2004. Por lo que concluye, que al menos el 95% de la población española está conectada a algún sistema de depuración. En la siguiente figura, extraída de la Versión preliminar del Plan Nacional de Reutilización de Aguas [3] se muestra el número de EDAR distribuidas por Comunidades Autónomas:

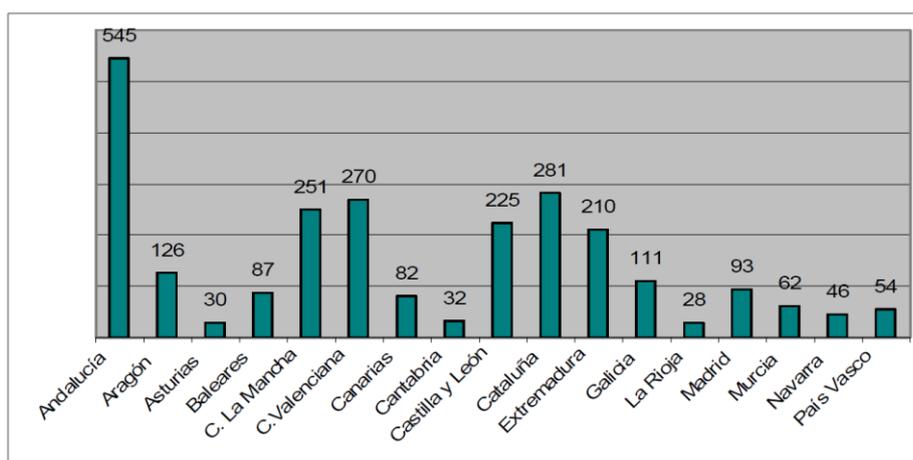


Figura 5: Número de EDAR en España distribuidas por Comunidades Autónomas en 2010 [3]

El consumo de energía de las depuradoras de aguas residuales depende de la tecnología empleada, del tamaño de la población servida y de los límites de vertido y depuración aplicables en cada uno de los casos.

En base a los datos aportados del estudio de prospectiva realizado por el IDAE [6] (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) de “Consumo energético en el sector del agua”, se estima un consumo medio de energía en depuración de agua de 0,5 kWh/m³, lo que representó para las instalaciones existentes en 2010 un consumo de electricidad de 2.225 GWh/año. El estudio analiza la interdependencia entre agua y energía en nuestro país y el papel que la ciencia y la tecnología pueden tener para reducir la energía consumida en el ciclo del agua

En la Comunidad Valenciana, según datos proporcionados por la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR) [7], la evolución del coste medio de depuración de aguas residuales presenta la siguiente tendencia:

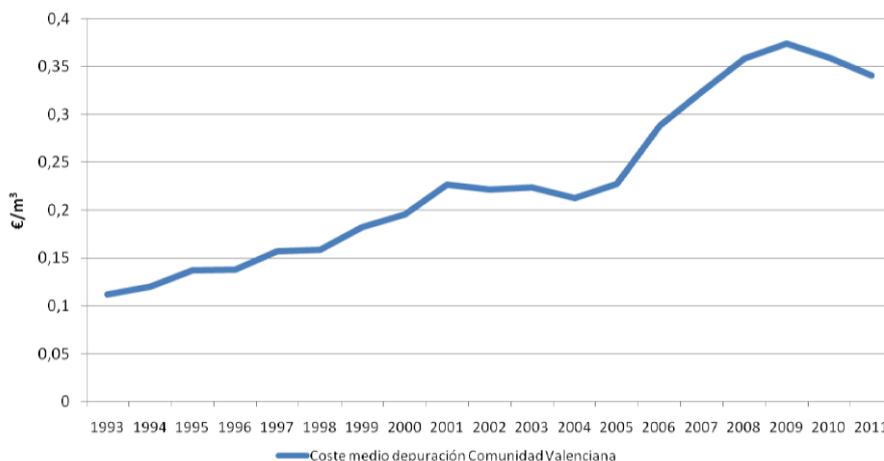


Figura 6: Gráfica de la evolución del coste medio de depuración de aguas residuales [7]

Se observa como desde el año 2005 el coste económico de la depuración de las aguas en la Comunidad Valenciana aumenta en mayor medida que en años anteriores, llegando hasta un pico en el año 2009. Los dos últimos años la tendencia tiende ligeramente a la baja.

III.1. POTENCIAL DE AHORRO

La figura 7 extraída del estudio de prospectiva del Consumo energético en el Sector del Agua que realizó el IDEA en 2010 [6], presenta la potencia por unidad de tratamiento, expresado en watos por habitante equivalente.

En la siguiente gráfica podemos observar que, conforme aumenta el tamaño de la depuradora de agua residual urbana, disminuye el gasto energético por habitante equivalente:

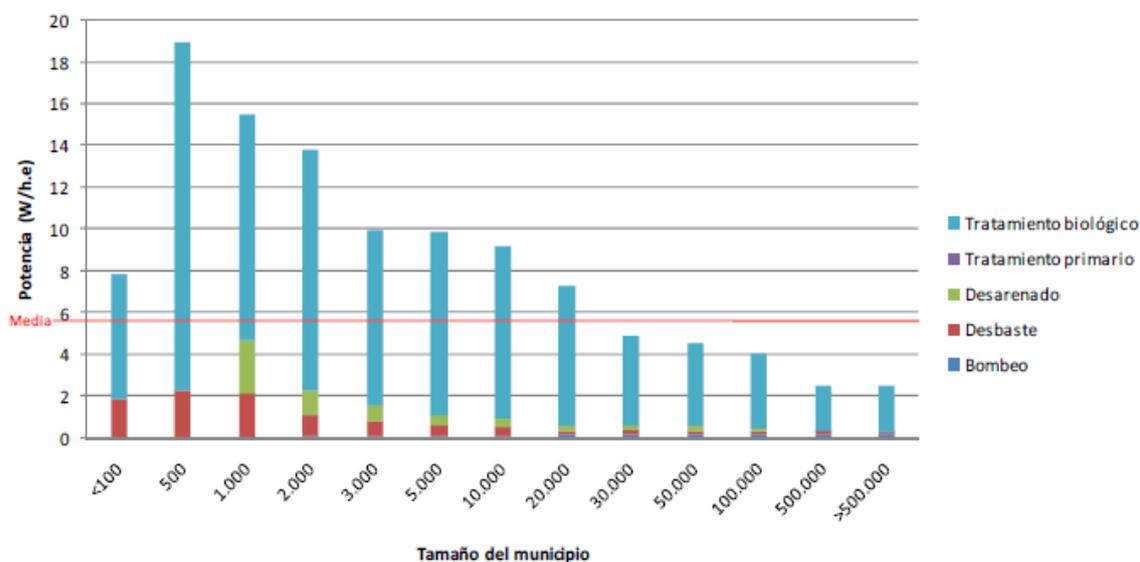


Figura 7: Gráfico de la potencia requerida por unidad de tratamiento [6]

En este documento, además, se realiza un estudio del potencial de ahorro en depuración urbana. Como una primera estimación del potencial de ahorro, se redefinen los consumos energéticos, asumiendo una mejor gestión de la aireación (mediante temporizadores y el empleo de sistemas de agitación específicos) y mediante modificaciones conceptuales en el pretratamiento.

Los resultados se resumen en la figura 8, donde se marca en rojo la diferencia entre el consumo actual (valor superior de la barra roja) y el consumo tras implantar las mencionadas medidas de ahorro (valor inferior de la barra roja). La figura indica que el mayor potencial de ahorro (máxima amplitud de la barra roja) se encontrará en las pequeñas plantas.

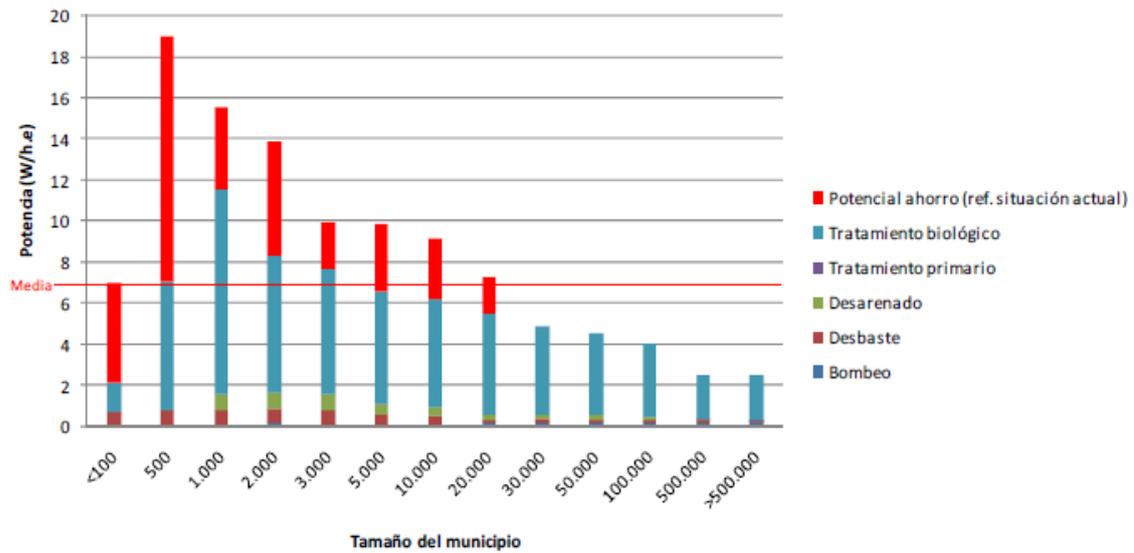


Figura 8: Gráfico de la potencia de ahorro por unidad de tratamiento [6]

El ahorro global del conjunto de depuradoras españolas es de un 17,5%, tal y como se resume en la siguiente tabla:

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

Figura 9: Tabla de potenciales ahorros en la EDAR actuales [6]

Las conclusiones del citado estudio son las siguientes:

- *El censo de depuradoras del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente no recoge datos que permiten una evaluación cuantitativa del consumo energético.*

- La potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas en España es de 305 MW, lo que equivale a 5,6 W/h.e o a un consumo de 49 kWh/(h.e.año) .
- Se estima el potencial de ahorro global en un 17,5%. El mayor impacto se podrá lograr en las pequeñas plantas mediante la implantación de temporizadores y modificaciones conceptuales en el pretratamiento.
- Los diseños de una depuradora se basan en criterios de proceso y funcionamiento mecánico (robustez). Apenas se toma en consideración el consumo energético con la excepción de las grandes depuradoras, donde el control de la aireación, además de su función para el control del proceso, está pensado para racionalizar el consumo energético.
- Depuradoras pequeñas (<5.000 h.e.) emplean equipos de pretratamiento dimensionados con criterios de robustez. La potencia de bombas y motores está justificada por la necesidad de evitar atascos y obstrucciones.
- Depuradoras pequeñas y de tamaño medio carecen de sistemas de control de la aireación. Además, la aireación se sobredimensiona para cumplir la doble función de aireación y mezcla.
- Depuradoras grandes tienen un consumo más ajustado ya que cuentan con sistemas de control de la aireación. Además, se ha superado el umbral mínimo de potencia para conferir el carácter de robustez al equipamiento mecánico, por lo que su dimensionamiento está determinado por parámetros mecánicos e hidráulicos acordes con la capacidad de la planta.

AHORRO ENERGÉTICO EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

CAPÍTULO IV. AHORRO ENERGÉTICO EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

IV.1. SISTEMAS DE AHORRO ENERGÉTICO A CORTO PLAZO EN DEPURACIÓN

Los sistemas de ahorro energético con resultados a corto plazo más empleados hoy en día en depuración de aguas residuales urbanas se basan en reducir consumos energéticos, y se encuentran fundamentalmente focalizados en el sistema de aireación del tratamiento biológico ya que, en la mayoría de EDAR, representa el apartado donde se localizan los mayores gastos energéticos.

Algunos ejemplos de sistemas de ahorro energético a corto plazo son [4, 6, 7 y 8]:

1) Independizar la aireación de la agitación en los reactores de fangos activados

Existen muchos equipos en reactores biológicos que realizan la doble función de oxigenar y mantener los fangos activados en suspensión. La consecuencia es que la regulación de la aireación está condicionada a las necesidades de mezcla. Dado que los sistemas de aireación no son muy eficientes para la mezcla, en régimen de aireación extendida, se incurre en un gasto excesivo de energía. La medida consiste en introducir sistemas separados para mezcla y oxigenación.

2) Cambiar la tipología de aireación para mejorar la eficiencia energética

El cambio de aireación superficial a aireación por burbujas puede significar un ahorro energético muy importante, por dos vías: mayor rendimiento del sistema de aireación y mayores posibilidades de control del proceso.

3) Implantar equipos de aireación más eficientes

El cambio de los aireadores superficiales por otros de alto rendimiento puede significar un ahorro energético importante (25 – 90%). Compresores de alto rendimiento pueden tener un 10 - 15% más de rendimiento.

4) Implantación del control de procesos por sensores

Instalación de un sistema de control de la aireación por sensores que controlan parámetros de proceso (oxígeno, redox, amonio, nitrato). Requiere sistemas de aireación de potencia variable o intermitente. Según la configuración, pueden obtenerse reducciones en el consumo energético de 25 - 55%.



Figura 10: Ejemplo sistema de control REDOX

5) Empleo de la lógica difusa en el control de procesos

La carga de una depuradora responde en gran medida a procesos cíclicos (día-noche) o patrones conocidos (lluvia-seco). Mientras controles convencionales por PLC responden a puntos fijos de arranque y parada, el control del proceso mediante lógica difusa de creación de un sistema experto de depuración, permite anticiparse a nuevas condiciones de operación. El ahorro energético se estima en un 20%.

6) Medidas de ahorro en el uso de motores eléctricos

A partir de 2011 sólo se pueden comercializar en Europa motores IE2 o superior, según la Directiva 2005/32/CE RD640/2009. Para motores de 7,5 a 375 kW, en enero de 2015 la exigencia se aumenta a IE3 o IE2 cuando esté accionado por convertidor de frecuencia; y lo mismo en 2017 para motores de 0,75 a 375 kW. En la figura 11 se

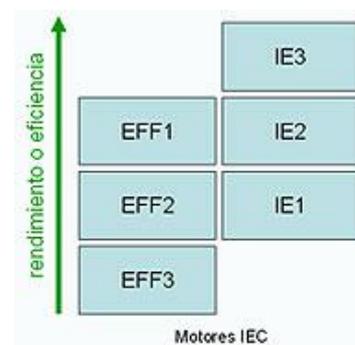


Figura 11: Clasificación europea nuevos motores

representa la antigua nomenclatura de motores y la nueva nomenclatura europea según rendimiento o eficiencia.

Las medidas de ahorro en el uso de motores eléctricos más extendidas son: el uso de motores de alta eficiencia, una selección adecuada de los motores, realizar una operación racional de los motores eléctricos, así como mejorar las condiciones de operación de los motores eléctricos.

Adoptando estas medidas, de media se reduce su pérdida de energía en más de un 40%, incrementando además la vida del motor: mejor funcionamiento en condiciones ambientales críticas y menor mantenimiento preventivo junto con menores vibraciones, entre otras. El incremento de la inversión en estos motores puede ser amortizado durante la vida del motor, dado que, sólo el 1% del coste de toda su vida útil pertenece al precio de compra.

7) Optimización de los bombeos

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

Además, mediante sistemas de control de frecuencia puede optimizarse el bombeo en función del caudal y presión (caudal de entrada) o parámetros de proceso (caudal de retorno de fangos).

La optimización de rendimientos y regulación de caudales permite ajustar el consumo eléctrico.

8) Instalación de turbinas en saltos de agua

Los desniveles a lo largo del proceso de depuración son mínimos, sin embargo en el desagüe sí que pueden aparecer saltos de agua de una altura interesante.

En estos puntos se puede analizar la viabilidad de instalar una micro-turbina hidráulica a la salida de agua depurada con el fin de aprovechar el salto y caudal existente para generar energía eléctrica.

Debido a las características típicas de las depuradoras, la turbina que mejor se ajusta a estas instalaciones son las diseñadas para emplazamientos con saltos de agua reducidos y caudales pequeños.

Para la instalación de una turbina de 700 o 1.000 W es necesario un salto de agua neto de 2,2 a 2,5 metros con un caudal de 50 l/s.



Figura 12: Turbina de aireación

9) Aprovechar el 100% del biogás de la digestión para generación eléctrica (para EDAR convencionales)

En muchas depuradoras solamente se aprovecha parte del biogás (del proceso de fangos activados) generado en la digestión. Posibles medidas para aprovechar la totalidad del biogás requieren flexibilizar el sistema de aprovechamiento energético.

Estas prácticas, consisten en la instalación de un mayor número de motores de gas, instalación de un gasómetro, fluctuación de la temperatura de la digestión entre 32 y 36 °C para actuar como búfer (una forma de almacenamiento intermedio) de calor.

10) Re-evaluación de la deshidratación, incluyendo el parámetro de consumo energético



Figura 13: Decantadoras centrífugas

Esta opción promueve la selección de tecnologías de deshidratación, no solamente bajo criterios de inversión y rendimiento de deshidratación, sino también en consumo energético del proceso y los costes del transporte del producto deshidratado.

11) Implantación de sistemas de control por sensores para regular el nivel de ventilación en naves cerradas.

La mayoría de las depuradoras cuentan con sistemas de tratamiento del aire para el control de olores. Estos sistemas mueven grandes volúmenes de aire. Los sistemas se suelen operar por ventilación fija y sobredimensionada para garantizar la calidad del aire tratada. Se puede ahorrar energía fluctuando el caudal según la concentración de ácido sulfhídrico y/o amonio en el aire extraído.

12) Aumentar la desodorización confinada para reducir el número de renovaciones de aire a extraer

Diseñar las instalaciones de depuración lo más confinadas posible en los focos de olor, que implican un mayor número de renovaciones de aire para cumplir las diferentes normativas de control de olores. De esta forma, las renovaciones de aire de los edificios podrán reducirse, y por lo tanto disminuir la potencia de los ventiladores de la desodorización.



Figura 14: Cubiertas del pretratamiento de una EDAR

IV.2. TENDENCIAS TECNOLÓGICAS ACTUALES EN DEPURACIÓN

Hoy en día los sistemas de ahorro energético en depuración de aguas residuales urbanas más empleados y sobre los que se centran las investigaciones están basados en innovación de equipos, la recuperación de energía y la reutilización de los residuos generados del proceso depurador.

Algunos ejemplos de tendencias que se están implantando son las siguientes [4, 6, 7 y 8]:

1) **Aplicación de la tecnología MBR (Bioreactor de membranas) en la depuración urbana**

En la depuración convencional, la separación entre fangos y agua tratada es uno de los puntos débiles. La tecnología de bioreactores de membrana cambia esta condición. Permite mayores concentraciones de fangos y con ello reactores más pequeños, logrando una separación absoluta entre sólidos y agua. En el estado actual de desarrollo, los MBR consumen más energía que sistemas convencionales, por lo que el reto consiste en incrementar la eficiencia energética del sistema, mejorando membranas, reduciendo fouling, etc.

2) **Cogeneración**

La cogeneración energética es un sistema de alta eficiencia energética, que consiste en obtener simultáneamente energía eléctrica (electricidad) y energía térmica (calor) a partir de otra energía primaria. Esta energía primaria se suele obtener mediante la combustión de combustibles fósiles (en el caso de las EDAR suele ser biogás y fangos).

En las EDAR se diseñan instalaciones de cogeneración, por ejemplo, para el secado de los fangos generados en la misma, produciendo energía eléctrica y térmica conjuntamente, y permite obtener eficiencias de hasta el 70% frente a los métodos tradicionales de producción, con los que se suele obtener algo menos de 48 %.

Otro ejemplo son las plantas que aprovechan el biogás producido en los diferentes procesos de depuración. Eliminando previamente el ácido sulfhídrico se genera energía eléctrica y térmica mediante unos motores de combustión interna.



Figura 15 y 16: Digestor de fangos y gasómetro de una EDAR de tratamiento convencional

3) **Aplicación y desarrollo de tecnologías para mejorar la biodisponibilidad de los fangos**

La biodigestión se alimenta con los fangos primarios y secundarios de la depuración aerobia. La desintegración de la biomasa puede mejorar la disponibilidad biológica del sustrato y de esta manera incrementar la producción de biogás de la digestión. La desintegración se puede realizar con procesos mecánicos, sónicos y/o térmicos. Estos procesos pueden incrementar la biodisponibilidad en un 30% y reducen el tiempo de digestión a la mitad.

4) **Desarrollar tecnologías que permiten reducir el consumo energético de la eliminación de nutrientes**

La oxidación del nitrógeno y las recirculaciones internas de los procesos de desnitrificación incrementan el consumo energético de la depuración. Los balances de nutrientes de las EDAR indican que las aguas de retorno de la línea de fangos constituyen un aporte de nutrientes significativo. Se han desarrollado varios procesos que actúan de forma eficiente sobre este flujo, reduciendo así el consumo energético

global (0,5 - 5% del total). Existen nuevos procesos que desnitrifican a partir de nitrito que son aún más eficientes (2 – 10% de reducción para el total de la depuradora).

5) Implantación de sistemas de Ciclo Rankine Orgánico para optimizar el aprovechamiento energético de biogás

La demanda de calor de los digestores suele ser inferior al calor disponible en la cogeneración de la totalidad del biogás. El rendimiento energético global puede incrementarse mediante un sistema de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que aprovecha el calor de los gases de combustión. Las plantas existentes de ORC operan en rangos de 160 – 1.500 kW, aunque se está preparando la entrada en el mercado de unidades de 3 – 15 kW. El rendimiento eléctrico de un ORC está en el orden de 10 – 20%.

6) Mejorar la fiabilidad de sensores para el control de procesos

La optimización del proceso de depuración, y en consecuencia, del consumo energético requiere de datos fiables en tiempo real, por lo que el buen funcionamiento de los sensores es de suma importancia. Aunque el mercado ofrece sensores para todos los parámetros relevantes, su fiabilidad, la dificultad de su calibración en un entorno hostil (como el de las depuradoras) y especialmente la comprobación en tiempo real de su buen funcionamiento no está resuelta. Existe una necesidad, por tanto, de mejorar la fiabilidad de los sensores: bien mediante su rediseño o mediante sistemas de limpieza y calibración automática.

7) Reutilización de los residuos de la depuradora para el desarrollo de nuevos materiales



Figura 17: Planta de compostaje de los fangos procedentes de las EDAR

Se están realizando estudios para la reutilización de los fangos secados o de las cenizas procedentes de la combustión, como nuevos materiales de la construcción o para aplicación directa a la agricultura como abono.

DESCRIPCIÓN DE LA EDAR OBJETO DE ESTUDIO

CAPÍTULO V. DESCRIPCIÓN DE LA EDAR OBJETO DE ESTUDIO

El estudio se ha basado en una EDAR de fangos activos de baja carga, o lo que es lo mismo, de aireación prolongada con una tipología de reactor biológico de flujo en pistón. La depuradora fue diseñada para tratar un caudal medio de 12.000 m³/día, presenta un factor punta para caudal pretratado de 1,6 y tiene una potencia total instalada de 400 kW.

CAUDAL MEDIO: 12.000 m³/d
CAUDAL PUNTA: 20.000 m³/d
POTENCIA INSTALADA: 400 kW

Los rendimientos de depuración medios son del 97% en sólidos suspendidos, 96% en cuanto a DBO₅ y del 95% en DQO. Cumpliendo el efluente con la Directiva Comunitaria 91/271/CEE (Real Decreto 509/1996).

Según la normativa anterior, resultan unas exigencias de vertido de:

CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE BIOLÓGICO		
Concentración media de DBO ₅	mg/l	<25
Concentración media de S.S.	mg/l	<35
DQO	mg/l	<125
Ptotal	mg/l	1
Nt	mg/l	10

El diseño de la EDAR contempla la posibilidad de nitrificar y desnitrificar, además de eliminar fósforo de manera química.

El fango procedente del proceso tendrá las siguientes características, entendiéndose que los valores aportados son mínimos exigibles:

CARACTERÍSTICAS DEL FANGO	
Sequedad (% en peso de sólidos secos)	≥ 25
Estabilidad (% en peso de sólidos volátiles)	≥ 45

V.1. LINEA DE TRATAMIENTO

La línea de tratamiento consta de las siguientes etapas:

LÍNEA DE AGUA

- Obra de llegada, alivio y by-pass.
- Pozo de gruesos.
- Bombeo de cabecera de elevación a pretratamiento mediante cuatro (4) bombas centrífugas sumergibles a caudal constante de 300 m³/h, tres (3) en funcionamiento y una en reserva para caudales punta o reparaciones (3+1R).
- Pretratamiento (canales de desbaste y desarenado-desengrasado) para tratar un caudal de 20.000 m³/d (caudal punta).
- Reactor biológico tipo flujo en pistón de 20.000 m³ y un calado de 5 m. Para mantener una colonia importante de fangos activados, se realiza una recirculación externa de fangos mediante bombas centrífugas en seco (2+1R) de capacidad 500 m³/h (ubicadas en el pozo de bombeo); y para poder desnitrificar, se lleva a cabo una recirculación interna, mediante una bomba axial de 1.500 m³/h (1+1R). El nuevo reactor se ha proyectado para poder llevar a cabo la nitrificación-desnitrificación total del amonio influente y evitar la desnitrificación en los decantadores secundarios.



Figura 18: Reactor biológico de una EDAR

El aporte de aire se efectúa mediante dos soplantes (1+1R) de émbolos rotativos de caudal 8.000 Nm³/h que alimentan unas parrillas de difusores de burbuja fina tipo membrana con cuatro agitadores situados estratégicamente.

Existen 1.512 difusores de membrana estándar EPDM instalados en el reactor biológico de la depuradora. Los difusores están en operación desde hace 24 meses, sin que se haya llevado a cabo ninguna limpieza.

- Decantación secundaria, formada por dos decantadores de gravedad cilíndricos de 28 metros de diámetro interior y 4 metros de altura bajo vertedero. Disponen de extracción de flotantes, así como arqueta anexa para el bombeo de dichas flotantes.
- Arqueta de salida de planta.
- Medida de caudal de salida de planta.
- Arqueta de agua tratada.
- Cloración en línea.
- Desinfección ultravioleta.

LÍNEA DE FANGOS

- Un pozo de bombeo de recirculación y purga de fangos en exceso. En dicho cuerpo se encuentran ubicadas: bombas de recirculación (2+1R) y bombas de purga (1+1R) de 20 m³/h de caudal.
- Un espesador de gravedad de diámetro 8 metros.
- Bombeo de fangos espesados mediante (1+1R) bombas helicoidales.
- Deshidratación de fangos mediante dos decantadoras centrífugas (1+1R) de capacidad unitaria 45 m³/h.
- Acondicionamiento de fangos mediante un equipo de polielectrolito.
- Transporte de fangos deshidratados mediante bomba helicoidal.
- Dos silos metálicos para el almacenamiento y descarga de los fangos deshidratados.



Figura 19: Espesadores de fangos de una EDAR

OTRAS INSTALACIONES

Se complementa la línea de tratamiento con las siguientes instalaciones:

- Instalaciones eléctricas.
- Control e instrumentación.
- Servicios auxiliares: Agua industrial, agua potable, riego, vaciados, polipastos de mantenimiento, ventiladores y cabinas de insonorización.
- Sistema de desodorización para los elementos que lo requieran, con ventilador encapsulado para reducción de ruido ambiente.
- Diversos edificios para alojamiento de los equipos, control, vestuarios y taller.

El diagrama de bloques de la EDAR objeto de estudio es el siguiente:

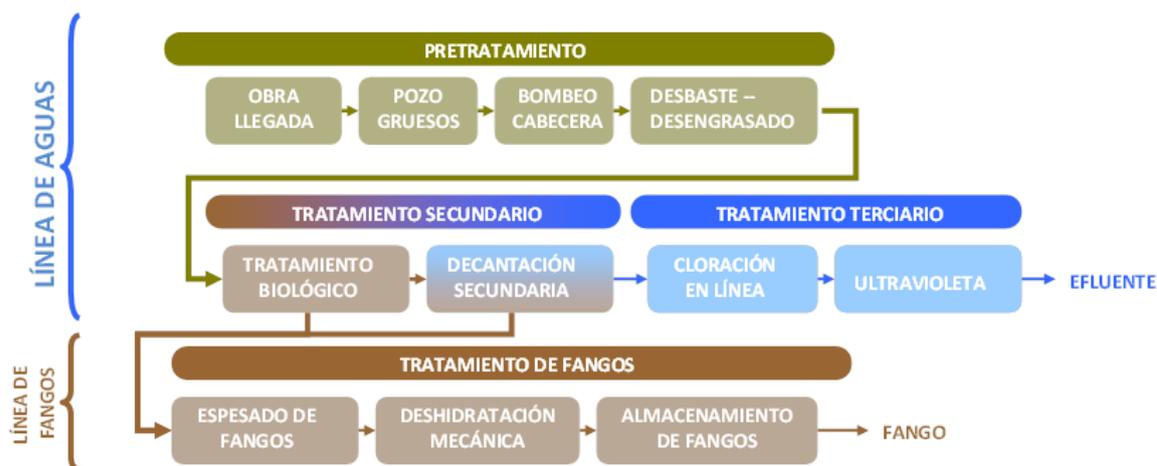


Figura 20: Diagrama de bloques de proceso de la EDAR. FUENTE: www.epsar.gva.es

V.2. EQUIPOS Y CONSUMOS

En este apartado se indican los consumos de los equipos instalados, de características indicadas en el apartado anterior, en la planta estudiada a caudal medio. En la tabla siguiente, se definen las potencias de los equipos instalados en la EDAR, el número de equipos instalados, equipos en funcionamiento, las horas al día de funcionamiento y los kW/h consumidos por cada uno de ellos al día:

	POTENCIA UNITARIA kW	INSTALADOS	FUNCIONANDO	HORAS	KWh/DÍA
BOMBEO DE CABECERA	10	4	3	24	576,00
PRETRATAMIENTO	32,75	1	1	6	157,20
TRATAMIENTO BIOLÓGICO					
Soplantes biológico	160,00	2	1	21	2.688,00
Aceleradores de corriente	5	5	4	24	384,00
Decantador secundario	1,75	2	2	22	61,60
Recirculación externa de fangos	12,00	3	2	22	422,40
Recirculación interna	8,00	3	2	15	192,00
FANGOS					
Decantadora Centrífuga	75,00	1	1	5	300,00
Resto	20,00	1	1	5	80,00
DESODORIZACION	40,00	1	1	9,00	288,00
ALUMBRADOS, TOMAS CORRIENTES	21,67	1	1	10,00	173,33
TOTAL DEL CONSUMO DIARIO (kW-h/día)					5.322,53

Tabla 1: Potencias y consumos de los equipos de la EDAR

V.3. CONSUMO ENERGÉTICO POR METRO CÚBICO DE AGUA TRATADA

El caudal mensual de entrada a la planta en el periodo de enero 2011 a septiembre 2012 varía entre 8.000 m³/día y 23.000 m³/día. El histórico para el periodo de estudio del caudal de entrada a la EDAR acumulado mensual se muestra en el gráfico siguiente:

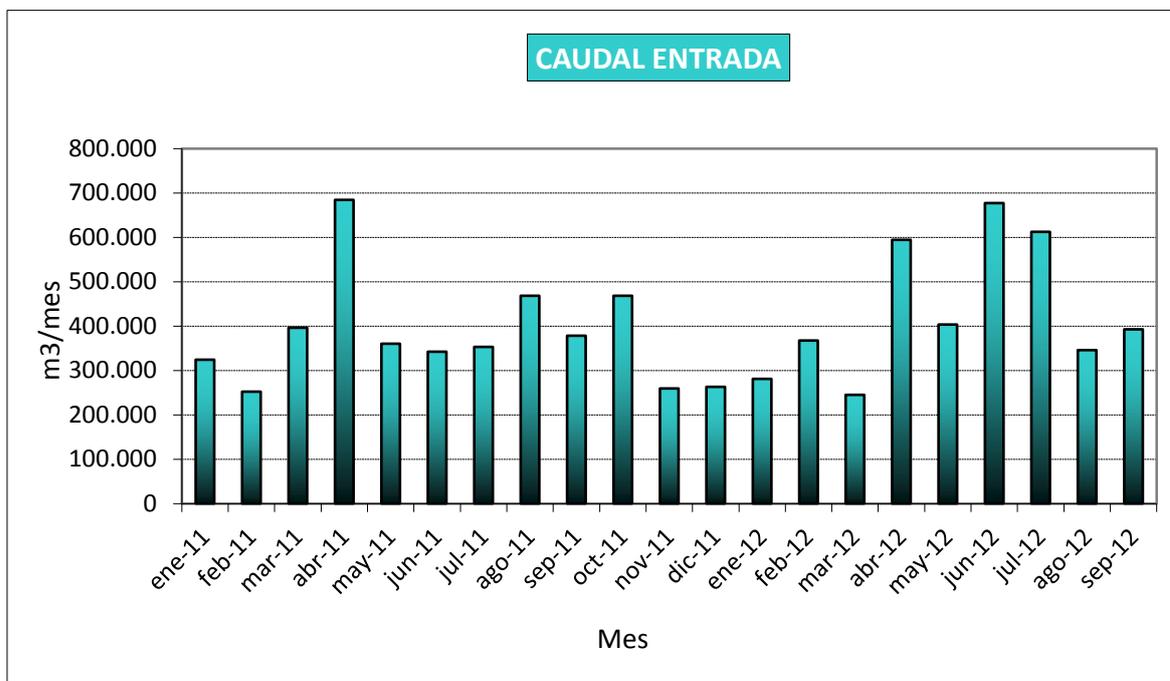


Figura 21: Gráfico del histórico de caudales mensuales acumulados de entrada a la EDAR para el periodo de estudio

De la figura 21 anterior se puede extraer que el ratio de consumo energético por caudal tratado en la depuradora es 0,44 kW/m³ a caudal medio. En el siguiente gráfico, se representa el caudal mensual del periodo estudiado frente al consumo energético mensual en la EDAR. Puede observarse que el consumo energético, no se acopla a los caudales tratados en la planta, debido a la rigidez de sus equipos frente a la variación de caudales. Cuanta más diferencia haya entre el caudal tratado y el consumo energético más ineficiente será la planta.

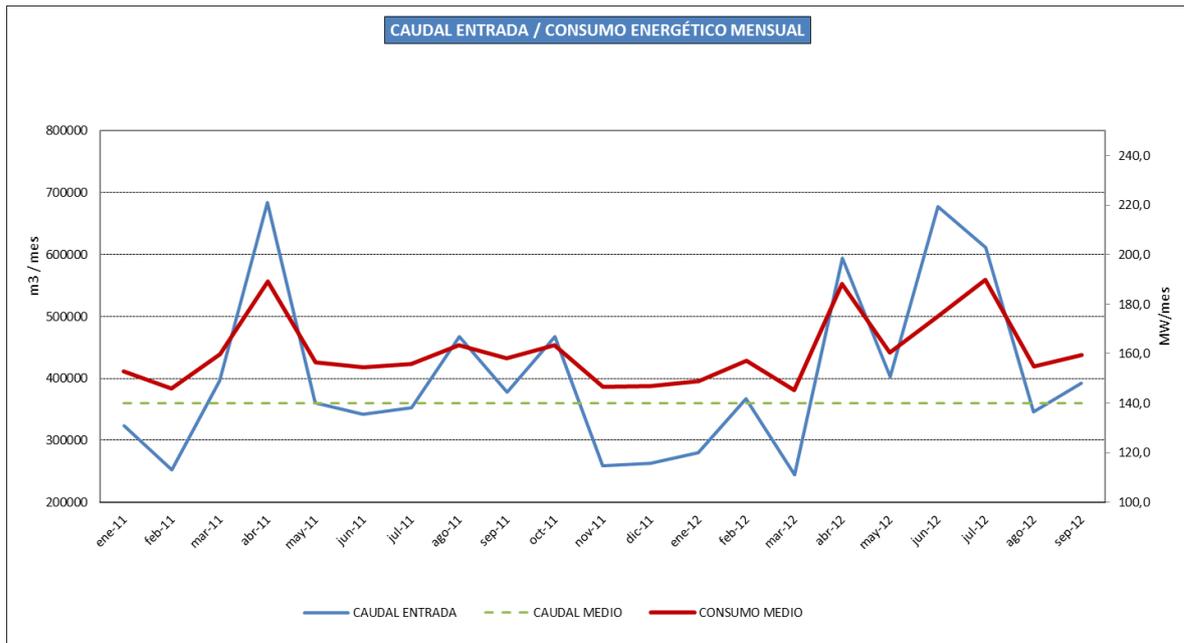


Figura 22: Gráfico del caudal de entrada mensual / consumo energético mensual

La rigidez de equipos de consumos altos en la planta, como son las bombas de cabecera y las soplantes, no son capaces de regular su caudal en función de la demanda, lo cual provoca que frente a momentos valle o punta de caudal se consuma mucha más energía de la estrictamente necesaria.

V.4. ESTUDIO PORCENTAJE DE CONSUMOS DE LA EDAR

A partir la tabla 1 del apartado V.2., se pueden calcular los porcentajes de consumos energéticos de la planta según procesos.

En la figura 23, se muestran las distribuciones de consumo energético de la EDAR estudiada. Como se observa, los consumos de energía más importantes se localizan con los producidos para llevar a cabo el tratamiento biológico, en concreto un 71% del consumo energético total de la instalación. Como se ha calculado en apartados anteriores, el ratio de consumo energético por caudal tratado en la depuradora es 0,44 kW/m³.

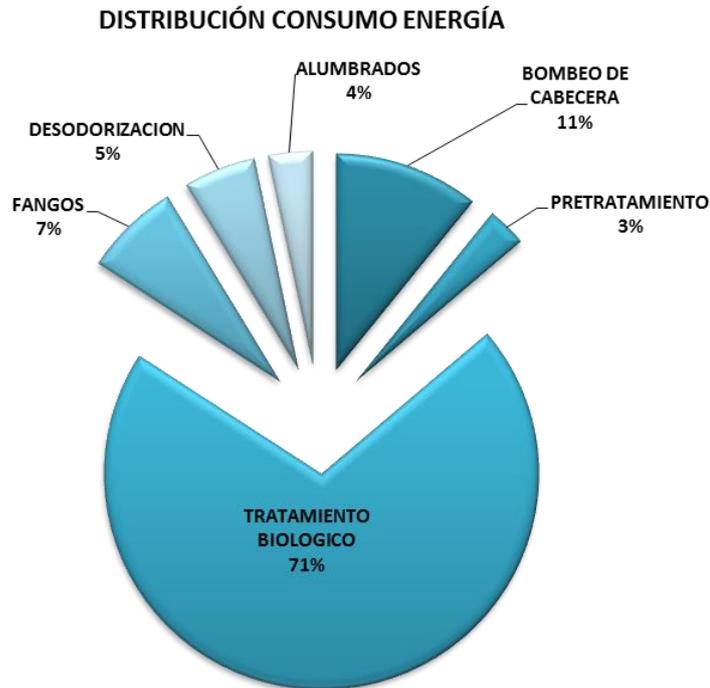


Figura 23: Gráfico de la distribución del consumo de energía en la EDAR por procesos

El siguiente gráfico, muestra la distribución de consumos energéticos dentro del tratamiento biológico, y como se observa, la etapa de aireación biológica supone el 67% del proceso, suponiendo aproximadamente el 50% del consumo energético de la EDAR.

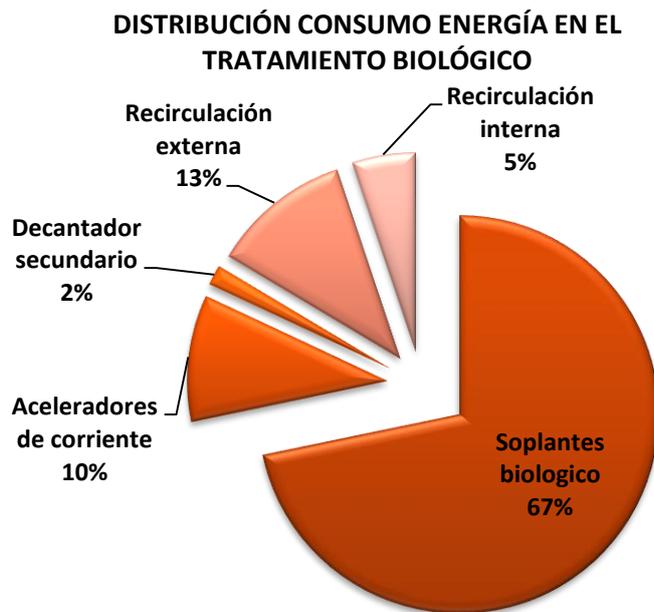


Figura 24: Gráfico de la distribución del consumo energético de la EDAR en el tratamiento biológico

V.5. POTENCIALES MEDIDAS A ANALIZAR

En este apartado se va a tratar de justificar las actuaciones que potencialmente pueden suponer un mayor ahorro energético, a partir de los datos aportados en los apartados anteriores.

Como se indica en el apartado anterior, el tratamiento que mayor consumo energético ocasiona en la EDAR es el tratamiento biológico. De este tratamiento, según la figura 24 más de la mitad del consumo (en concreto en 67%) se encuentra en la producción de aire.

Por lo tanto, parece lógico centrarse en este apartado a la hora de reducir en primera instancia el coste energético de la planta. Los equipos que conforman el tratamiento biológico de la presente EDAR son:

- Las ya mencionadas soplantes de aireación, que se encargan de aportar la concentración de oxígeno necesario al tanque para que se produzcan las reacciones esperadas.
- Los aceleradores de corriente que mantienen el contenido del tanque mezclado entre otras funciones.
- Los difusores de membrana por los que se introducen las burbujas de aire en el agua y se transfiere el oxígeno durante el ascenso de las burbujas a la superficie.
- Las bombas de recirculación de fangos que mantienen la concentración de fango necesaria dentro del reactor biológico.

De todos estos equipos, como ya se ha indicado, los que mayor consumo presentan son las soplantes de aireación. Por lo que a continuación nos centraremos en analizar los aspectos que afectan al consumo de las mismas en la planta estudiada.

V.5.1. Consumo soplantes de aireación

Una soplante, como es lógico, consume más conforme mayor requerimiento de oxígeno se le pida. La mezcla del reactor requiere que se aumente la concentración de oxígeno disuelto en el agua para poder ser asimilado por las bacterias y que se realicen las reacciones de degradación de la materia orgánica. Una de las formas de aumentar esta concentración es añadiendo burbujas de aire en el agua, estas burbujas transfieren oxígeno durante su ascenso superficie. Las más altas transferencias de oxígeno se consiguen mediante mayor superficie específica de las burbujas de aire.

Los **difusores** utilizados en tratamientos biológicos son los de burbuja fina, dada la mayor superficie específica de burbujas que generan frente a los difusores de burbuja gruesa.

Éste es el caso de la presente EDAR, tiene instalados difusores de burbuja fina. El problema que presentan estos difusores son los atascos y el ensuciamiento, por lo que pueden presentar altas pérdidas de carga. En esta instalación, como se ha dicho en el apartado V.1 anterior, los difusores están en operación desde hace 24 meses, sin que se haya llevado a cabo ninguna limpieza, por lo que como corrobora la experiencia a lo largo de años en otras EDAR (se indican los estudios consultados en el apartado de bibliografía), la eficacia de transferencia de oxígeno será mucho menor al óptimo calculado. La tasa de transferencia de oxígeno a caudal medio de diseño es del 30 % y una pérdida de carga en el difusor de 4,46 kPa; mientras que la transferencia tras 24 meses sin mantenimiento es del 18% y la pérdida de carga de 5,80 kPa.

Otro de los aspectos que define el menor o mayor consumo de la soplante es la **eficiencia energética** del propio equipo. Actualmente, como se ha comentado en apartados introductorios, se han realizado grandes avances e investigaciones de cara a mejorar la calificación energética de los motores y máquinas, y reducir así el consumo energético y por lo tanto los costes.

Las soplantes de la planta que se está estudiando son del tipo émbolos rotativos, existiendo actualmente equipos más eficientes energéticamente, como las soplantes de

levitación magnética, que ya han sido utilizadas y contrastada su eficiencia en numerosas depuradoras.

Por lo tanto, las medidas a estudiar de cara a la reducción de costes energéticos en la aireación del tratamiento biológico son:

- 1. Instalación de un variador de frecuencia en las soplantes para adaptarse al caudal de entrada de la EDAR.**
- 2. Sustitución de las soplantes de émbolos rotativos por otros equipos más eficientes.**
- 3. Limpieza y/o sustitución de los difusores.**

V.5.2. Consumo bombas de cabecera

Tras el análisis de la reducción de consumos en el tratamiento biológico, según las figuras 20 y 23, los equipos que mayores consumos presentan (después de las soplantes) son las bombas de cabecera.

Las bombas funcionan a caudal constante (velocidad constante), por lo que una medida de ahorro energético sustancial sería aportar a las bombas centrífugas existentes de un equipo que permita que trabajen, no por escalones, si no en función de la demanda. El equipo que se utiliza para este fin es un variador de frecuencia, que permite variar la velocidad de funcionamiento de la bomba, pudiéndose acoplar a los caudales demandados. Será necesario estudiar la cantidad de variadores necesarios, ya que optimizando el funcionamiento escalonado de las bombas según los caudales de entradas históricos, unas bombas pueden funcionar a caudal constante y el resto con variador adaptándose a la curva de demanda existente y ahorrando así también costes energéticos y de mantenimiento y reposición de nuevos variadores innecesarios.

Por lo tanto, las medidas a estudiar de cara a la reducción de costes energéticos en el bombeo de cabecera son:

- 1. Instalación de un variadores de frecuencia en una de las bombas de cabecera para adaptarse al caudal de entrada de la EDAR.**
- 2. Instalación de un variador de frecuencia en cada una de las bombas de cabecera para adaptarse al caudal de entrada de la EDAR.**

**MEDIDAS ANALIZADAS PARA LA MEJORA DE
LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA EDAR**

CAPÍTULO VI. MEDIDAS ANALIZADAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA EDAR

VI.1. MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL BOMBEO DE CABECERA

VI.1.1. Estado actual

Características bombas existentes

El bombeo de cabecera de elevación a pretratamiento se realiza mediante cuatro (3+1R) bombas centrífugas sumergibles a caudal constante, tres de ellas para impulsar el caudal máximo de pretratamiento y una en reserva para las reparaciones de alguna de las que estén en funcionamiento a caudal medio.

Las bombas impulsan 300 m³/h cada una, de agua bruta, a la entrada de la EDAR y su altura manométrica es de 8 metro columna de agua.

La bomba centrífuga aspira el agua en dirección horizontal y la impulsa en vertical, tal y como se muestra en la siguiente figura:

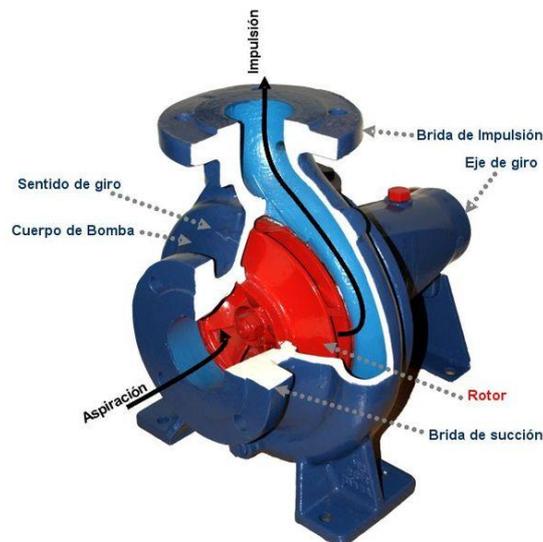


Figura 25: Bomba centrífuga

La curva de las bombas instaladas se puede ver en este gráfico:

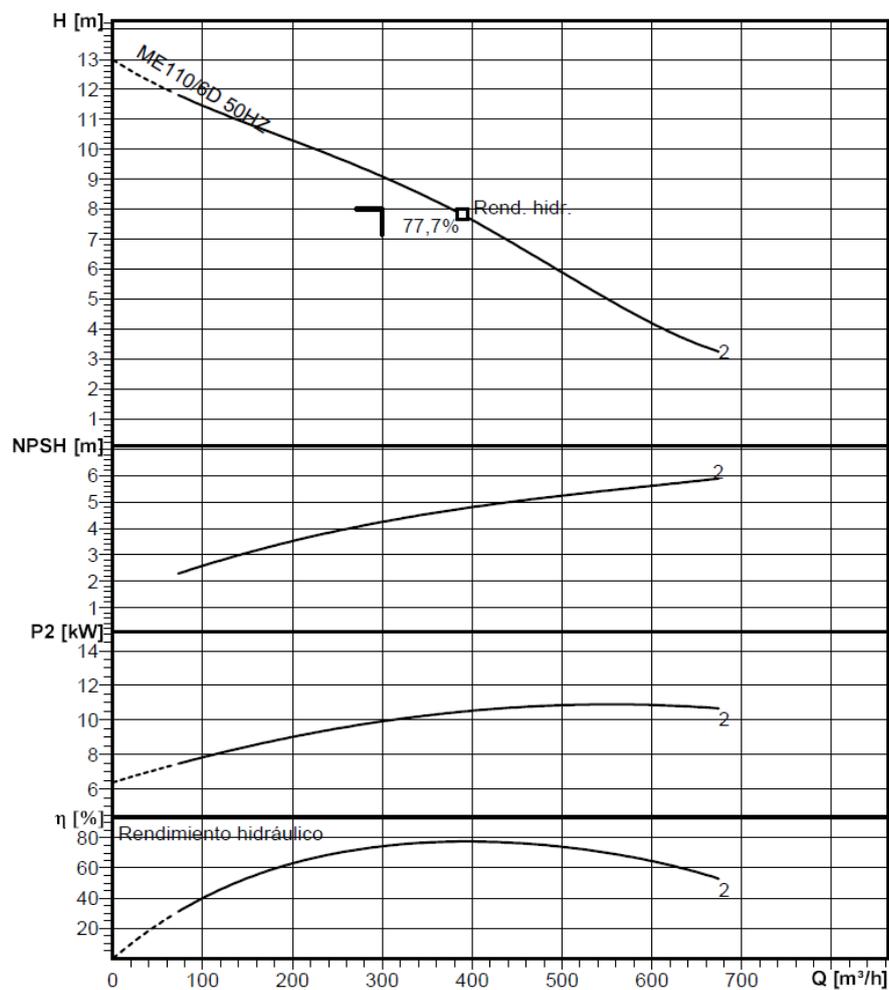


Figura 26: Gráfico de las curvas de funcionamiento de las bombas de cabecera existentes a velocidad nominal

Las especificaciones características de funcionamiento se detallan a continuación:

- Caudal: 300 m³/h.
- Rendimiento: 75,4 % (Q=100%).
- NPSH: 4,4 metros.
- Potencia en el eje: 10 kW .

La curva de las bombas así como, la curva resistente se muestran en el próximo gráfico:

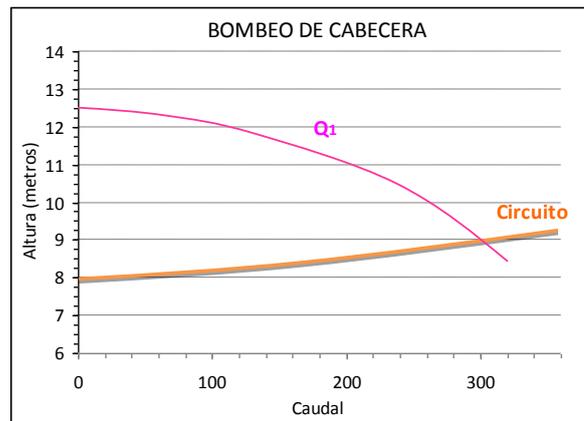


Figura 27: Gráfico de la curva resistente y del bombeo de cabecera

La potencia que consume la bomba es equivalente al rectángulo encerrado bajo el punto de intersección de la curva de la bomba y la curva del circuito, tal y como se observa en el siguiente esquema:

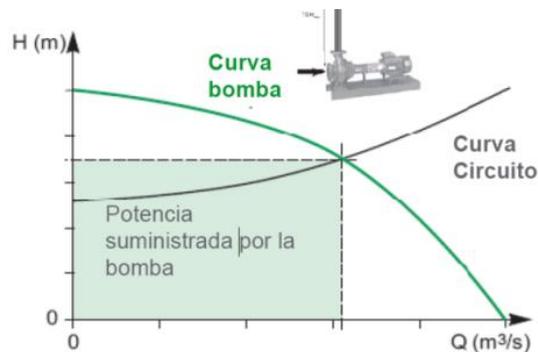


Figura 28: Gráfico de la potencia consumida por la bomba a partir de las curvas

Regulación caudal

Actualmente, se regula el caudal según el sistema denominado marcha-paro que implica ir bombeando por escalones en función del caudal, poniéndose en marcha las bombas necesarias. Es un sistema utilizado habitualmente en las EDAR.

Como ejemplo veamos lo que ocurriría frente a un caudal de $450 \text{ m}^3/\text{h}$: se necesitarían dos bombas en funcionamiento, una de ellas el 100% del tiempo y la otra estaría en marcha aproximadamente el 50% del tiempo que dure la demanda.

VI.1.2. Opciones de mejora de la eficiencia energética y comparativa

El estudio de las variaciones de caudal permite mejorar la eficiencia de la instalación de bombeo.

Existen diferentes métodos para regular el caudal bombeado, los más utilizados son:

- Válvula de by-pass.
- Estrangulamiento.
- Marcha paro.
- Variador frecuencia.

En la siguiente figura se definen gráficamente los modos de regulación enumerados:

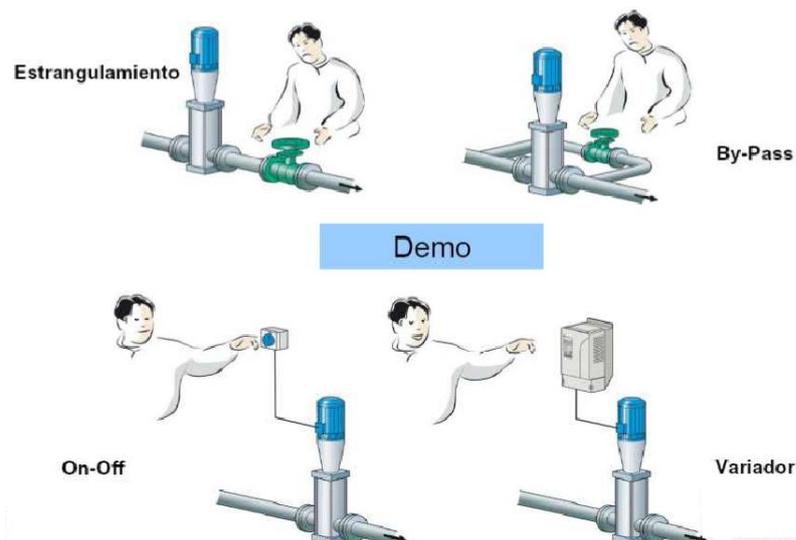


Figura 29: Representación de cada tipo de regulación de bombeo. FUENTE: catálogo ABB

Según bibliografía consultada [9, 10 y 11], de los anteriores métodos el que mayor consumo genera es el de la válvula de by-pass, seguido del estrangulamiento y el que mayor ahorro energético produce es el variador de frecuencia, pudiendo llegar hasta el 50%, dado que se aproxima en gran medida al control ideal del bombeo frente a variaciones de caudal y potencia consumida, según se puede observar en la este gráfico:

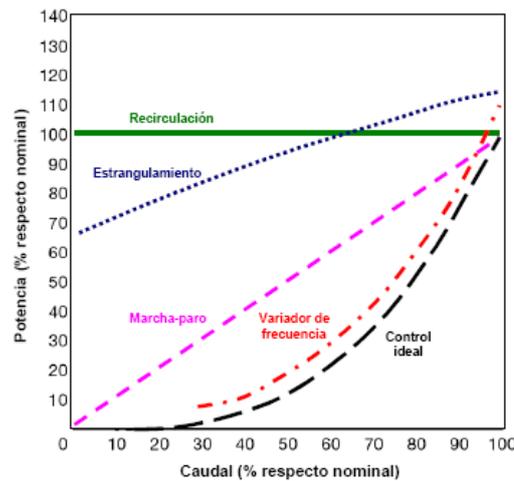


Figura 30: Gráfico de las curvas caudal-potencia para cada tipo de regulación de bombeo. FUENTE: AIMEE

Veamos cómo funcionan los métodos que presentan mayor consumo, en el siguiente esquema, siendo Q_n el caudal nominal que aporta la bomba, Q_r el caudal requerido o demandado y el punto C el punto óptimo energéticamente hablando para que la bomba trabajase suministrando el caudal requerido:

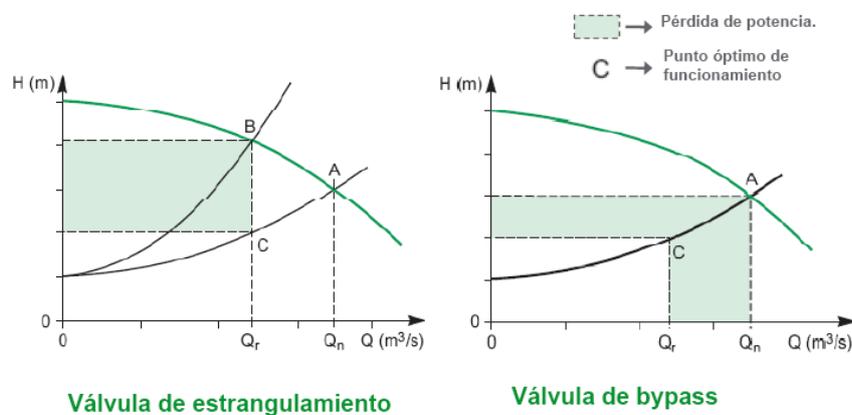


Figura 31: Gráficos de los consumos de potencia mediante el método de regulación por válvula de estrangulamiento y el de válvula de bypass [10]

Tal y como se observa, el área sombreada indica el consumo que se produce por la falta de optimización del equipo frente a una variación de demanda de caudal, lo que no ocurre mediante la utilización de variadores de frecuencia, muy utilizados hoy en día. Como ejemplifica el siguiente esquema frente a una reducción del 20% del caudal de diseño de la bomba, se reduce el consumo de potencia de todo el área sombreada más oscura:

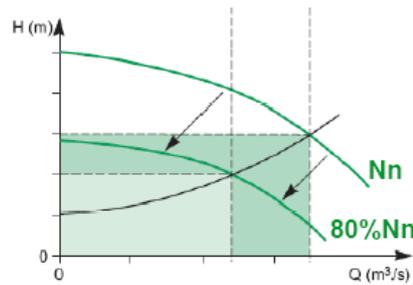


Figura 32: Gráfico del consumo de potencia mediante el método de variador de frecuencia [10]

Existen otras alternativas para la reducción de consumo energético de un bombeo, como por ejemplo la utilización de motores de alto rendimiento. Según bibliografía consultada, puede suponer un ahorro de hasta el 10%, pero la inversión es mucho mayor que la del variador de frecuencia.

En este apartado, vamos a limitarnos a estudiar la alternativa de reducción de consumo que potencialmente nos va a permitir una mayor reducción porcentual del coste energético del bombeo de cabecera, como es la instalación de variadores de frecuencia.

Ventajas de los variadores de frecuencia

Las ventajas fundamentales de la instalación de variadores de frecuencia son [9]:

- **Permite la laminación de caudal:**
 - Posibilidad de ajustar exactamente el caudal bombeado al caudal entrante.
 - Uniformar al máximo el caudal de salida ya que es muy importante en estaciones cabeceras de EDAR.
- **Eléctricamente, se elimina el estrés eléctrico en la instalación** al conseguir arrancar la bomba sin pasar en ningún momento de la intensidad nominal de la misma.
- **Reducción número de atascos.** La bomba se programa para que funcione en sentido contrario durante algún tiempo antes de su arranque, eliminando así, cualquier principio de atasco.
- **Reducción consumo energético.**

Además de las siguientes:

- Contribuir a reducir emisiones CO₂.
- Reduce su factura en los factores de energía y de potencia.
 - La corriente de arranque necesaria es una fracción de la que se requiere en arranque directo.
 - El equipo de distribución eléctrica necesario es más pequeño y económico.
 - El generador de emergencia necesario para grandes bombas se puede reducir en un 30 o 50% su tamaño original.
 - Ahorros en energía reactiva.
- Optimizar su inversión.
 - Reducir coste mantenimiento, dado que mejora su funcionamiento eléctrico y mecánico.
 - Mejorar procesos productivos, tal y como se ha indicado.

Veamos a continuación, el ahorro que supondría la instalación de un solo variador, o un variador para cada una de las bombas:

La potencia útil de una bomba es igual a [9]:

$$P = Q * H * \rho * g$$

P = potencia consumida (kW)

Q = caudal (m³/s)

H = altura (m)

ρ = densidad del líquido (kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Siendo las potencias a velocidad nominal y a velocidad reducida por variador de frecuencia las siguientes:

Potencia absorbida a velocidad nominal

$$P_{abs} = P_u * \frac{1}{\eta_{mot}}$$

Potencia absorbida a velocidad reducida

$$P_{abs} = P_u * \frac{1}{\eta_{mot}} * \frac{1}{\eta_{var}}$$

P_u = potencia útil (kW)

η_{mot} = rendimiento del motor de la bomba

η_{var} = rendimiento del variador de frecuencia

La comparativa, teniendo en cuenta el histórico de caudales de entrada a la depuradora, va a ser del 40% o del 180% del caudal medio.

Tal y como se ha indicado se estudian tres casos:

- **Caso 1: las tres a velocidad fija reguladas según marcha-paro.**
- **Caso 2: una bomba a velocidad variable y el resto a velocidad fija.**
- **Caso 3: las tres bombas a velocidad variable.**

Los rendimientos de los equipos instalados o a instalar son los siguientes:

$$\eta_{motor} = 0,87$$

$$\eta_{variador} = 0,97$$

Se estudian a continuación varios estados de funcionamiento, de forma que al final se obtenga una curva caudal-potencia de funcionamiento de la bomba con variador de frecuencia:

1) Caudal medio al 70% → 40 % capacidad bombeo

Caso 1:

1 bomba → 100 % tiempo → $P_{abs}(Q=300 \text{ m}^3/\text{h}; \text{velocidad nominal}) = 10 \text{ kW}$

1 bomba → 20 % tiempo

$$P = 10 * (1 + 0,2) = 12,0 \text{ kW}$$

Caso 2:

1 bomba → 100 % tiempo

1 bomba variador → 20 %

$$P = \frac{8,25 * 60 * 9,81 * 1}{3600 * 0,97 * 0,87} + 10 = 1,64 + 10 = 11,64 kW$$

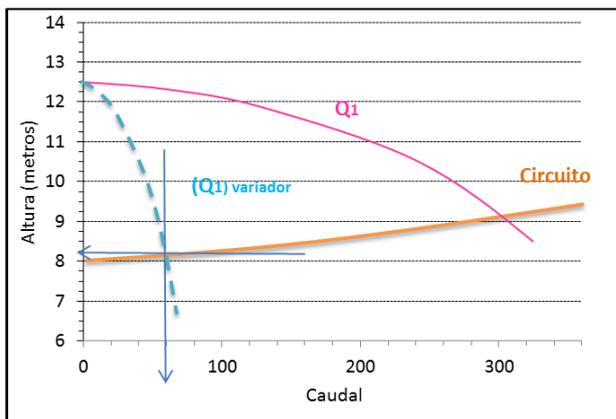


Figura 33: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad fija y al 20% del caudal

Caso 3:

2 bombas variador → 60 % cada una

$$P = \frac{8,5 * 300 * 0,6 * 2 * 9,81 * 1}{3600 * 0,97 * 0,87} = 10,11 kW$$

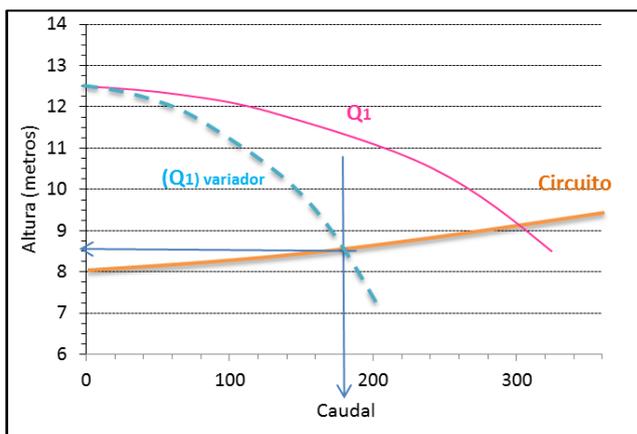


Figura 34: Gráfico de las curvas Q-H velocidad variable al 60% del caudal

2) Caudal medio al 100% → 55% capacidad bombeo

Caso 1:

1 bomba → 100 % tiempo

1 bomba → 66 % tiempo

$$P = 10 * (1 + 0,66) = 16,6kW$$

Caso 2:

1 bomba → 100 % tiempo

1 bomba variador → 66 % (200m³/h)

$$P = \frac{8,6 * 900 * 0,6 * 9,81 * 1}{3600 * 0,97 * 0,87} + 10 = 7,43 + 10 = 17,43kW$$

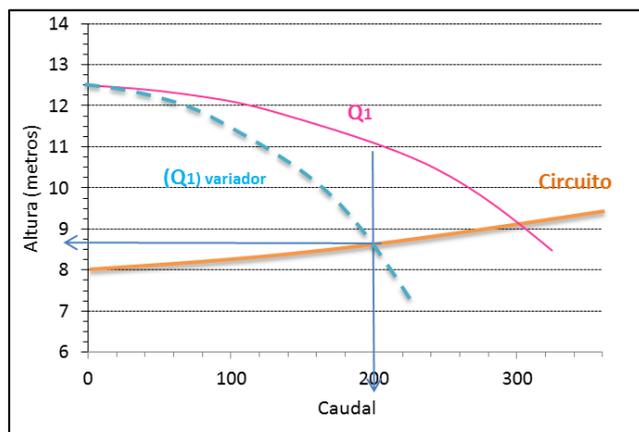


Figura 35: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad fija al 66% del caudal

Caso 3:

1 bomba → 100 % tiempo

1 bomba variador → 85 % (250m³/h)

$$P = \frac{8,8 * 300 * 0,85 * 2 * 9,81 * 1}{3600 * 0,97 * 0,87} = 18,01kW$$

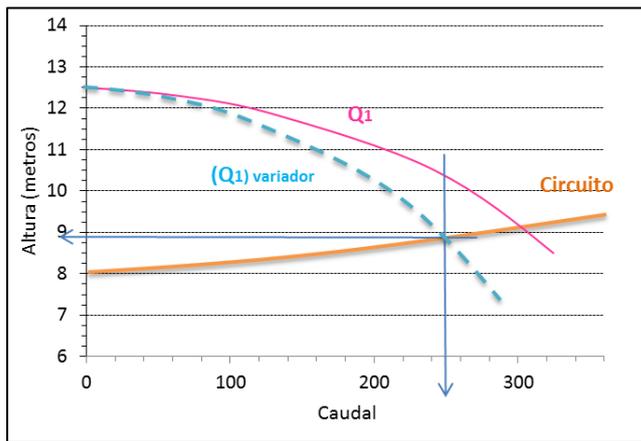


Figura 36: Gráfico de las curvas Q-H a velocidad variable y al 85% del caudal

Haciendo lo mismo con diferentes hipótesis, obtenemos una nube de puntos, de la cual se puede calcular su línea de tendencia. Tal y como se muestra mostrará en el siguiente gráfico:

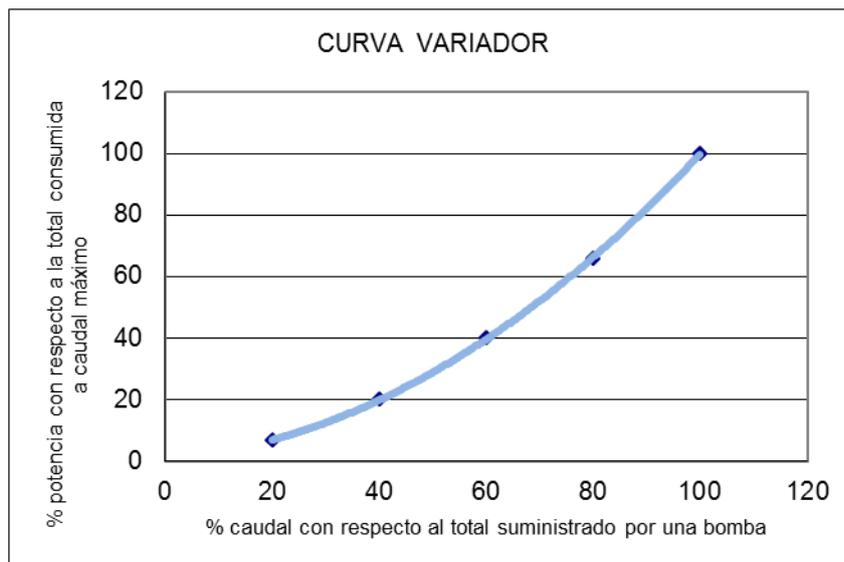


Figura 37: Gráfico de la curva funcionamiento variador de frecuencia

Por lo que a continuación, ya se disponen de los datos para poder calcular el potencial ahorro a partir de la curva obtenida de la energía al bombear los caudales históricos en la EDAR.

En el siguiente gráfico se observa la potencia consumida en los tres casos estudiados, una potencia del 100% significa una bomba actuando a caudal máximo, un 200% dos bombas actuando a caudal máximo y así sucesivamente:

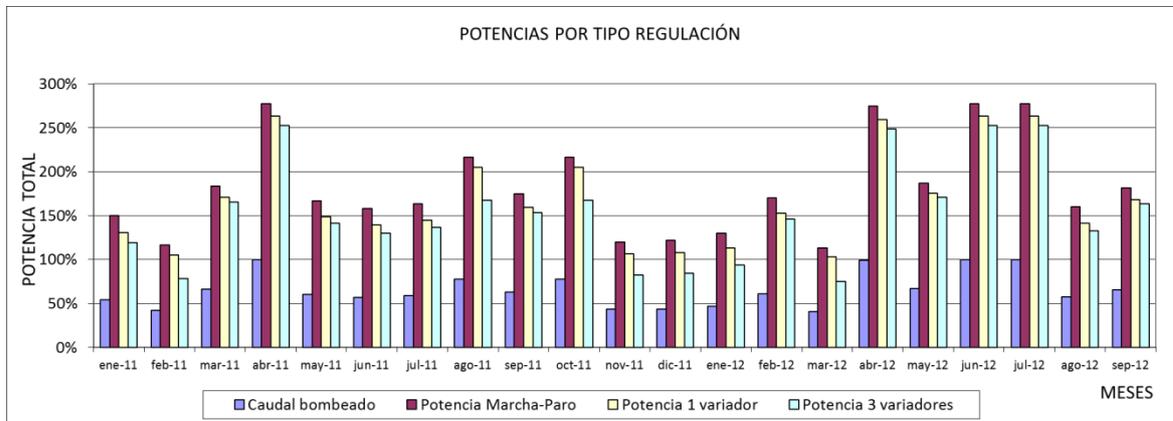


Figura 38: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de regulación en bombeo de cabecera

En la próxima figura, se observa claramente que el método de regulación marcha-paro es el que mayor consumo supone y, el método añadiendo 3 variadores de frecuencia, el que menos:

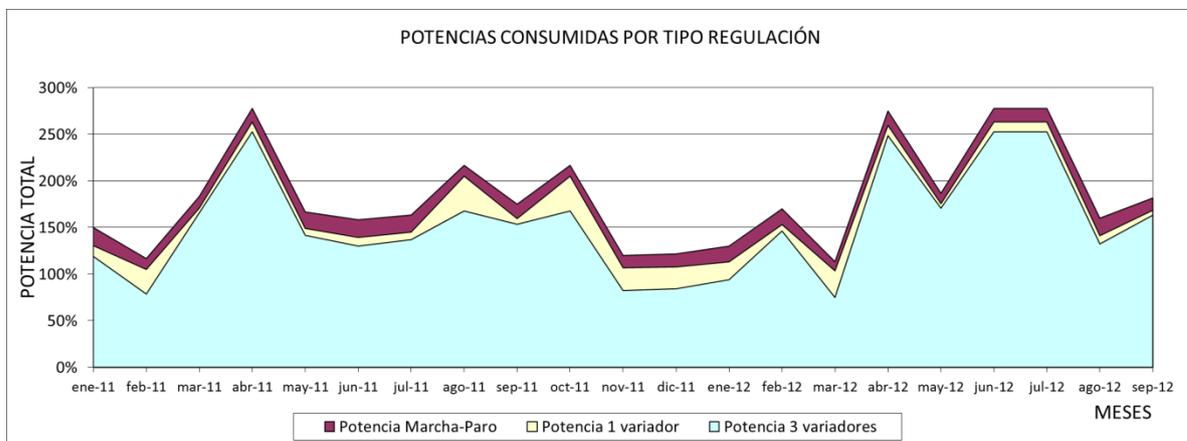


Figura 39: Gráfico de las potencias consumidas por tipo de regulación en bombeo de cabecera

VI.1.3. Estudio de viabilidad económica

Comparativa de costes anuales

La siguiente imagen muestra el porcentaje de ahorro con respecto al método de regulación utilizado inicialmente en la EDAR, frente a los métodos instalando uno o tres variadores de frecuencia respectivamente.



Figura 40: Gráfico del ahorro mensual por número de variadores con respecto al sistema actual de regulación

Ahorro total mensual y anual

Los ahorros totales respecto de la regulación marcha-paro son:

	1 variador	3 variadores
AHORRO MES	1.241,38 kW (8%)	2.486,50 kW (16%)
AHORRO ANUAL (8750 h/año)	14.896,52 kW	29.838,06 kW

Tabla 2: Tabla del ahorro total mensual y anual según el número de variadores con respecto al sistema actual de regulación

Solución más confortable y más eficiente el caso 3. Permite un ahorro de energía consumida de más de un 15% con respecto a la regulación actual.

Análisis del periodo de retorno

El siguiente estudio analiza el periodo de retorno estimado de las inversiones de la instalación de un variador frente a tres, considerando las inversiones iniciales y unos determinados índices de incremento de precio de la electricidad.

Más adelante se muestra gráficamente como las inversiones de los variadores de frecuencia se van amortizando a lo largo de los años. A partir de este coste inicial cada año se va obteniendo un ahorro económico teniendo en cuenta los costes anuales de operación de la gráfica de la página anterior.

Considerando un coste de la energía eléctrica de 0,098 €/kwh, el payback (recuperación de la inversión realizada) de la instalación de un variador se produce a los 1,93 años, mientras que los tres variadores en 2,76.

En las siguientes tablas se muestran las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado (ahorros acumulados – inversiones totales), para cada una de las alternativas:

Un variador

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	- 2.780,00								
AHORRO	-	1.474,36	1.439,71	1.511,70	1.511,70	1.511,70	1.511,70	1.511,70	1.511,70
SALDO	- 2.780,00	- 1.305,64	134,08	1.645,78	3.157,48	4.669,18	6.180,88	7.692,58	9.204,28

Tabla 3: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de un variador de frecuencia

Tres variadores

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	8.340,00	-	-	-	-	-	-	-	-
AHORRO	-	3.170,99	2.658,46	3.264,76	3.264,76	3.264,76	3.264,76	3.264,76	3.264,76
SALDO	-8.340,00	-5.169,01	-2.510,55	754,22	4.018,98	7.283,75	10.548,51	13.813,27	17.078,04

Tabla 4: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de tres variador de frecuencia

Ahora se muestra una comparativa de los saldos acumulados (ahorros acumulados – inversiones) para los periodos de cuatro y ocho años:

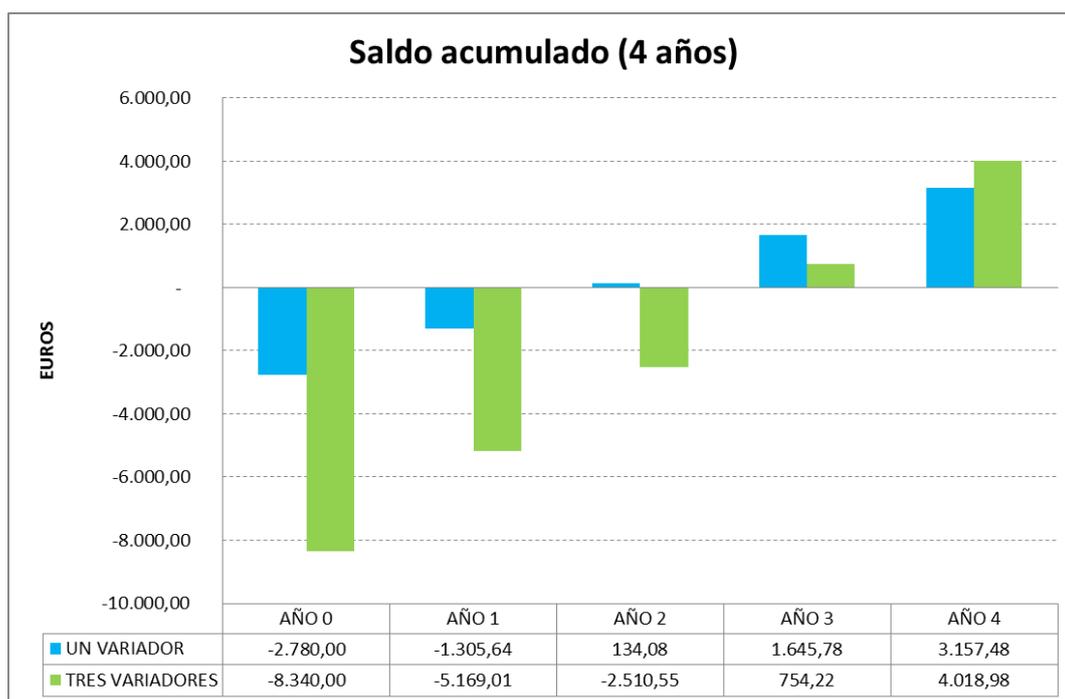
Ahorro total acumulado en 4 años

Figura 41: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejora de la eficiencia del bombeo de cabecera

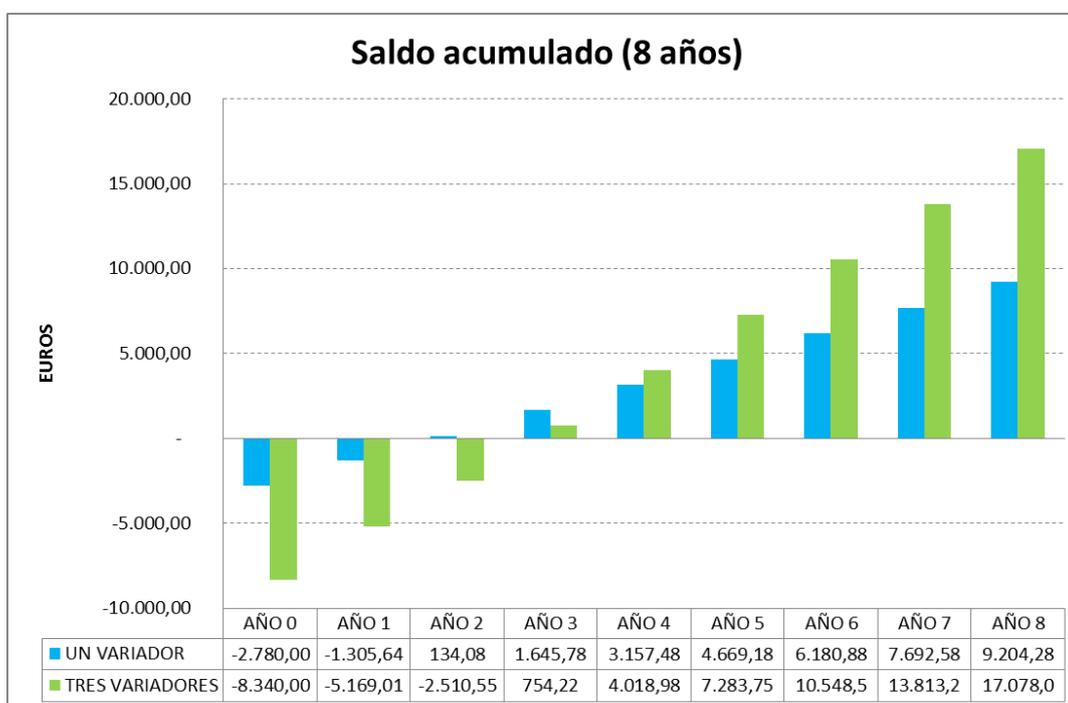
Ahorro total acumulado en 8 años

Figura 42: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejora de la eficiencia del bombeo de cabecera

VI.1.4. Resumen de resultados y discusión

Análisis de resultados

- En el caso del bombeo de cabecera, el uso de variadores es la clave para la reducción del consumo de energía. Por lo que se considera la mejor elección para la mejora de la eficiencia energética del bombeo de cabecera existente.
- La inversión inicial se recupera rápidamente.
- No se ha considerado para la recuperación del coste de la inversión, pero no hay que olvidar, como ya se ha indicado anteriormente, que los variadores evitan los golpes de ariete, la sobrepresión y la cavitación, extendiendo la vida útil de los equipos y la instalación.
- Teniendo en cuenta que habitualmente el periodo de concesión de la explotación de una EDAR suele durar cuatro años, se obtiene un ahorro energético instalando un variador de aproximadamente 3.200 €, e instalando tres variadores de aproximadamente 4.000 € durante el periodo de explotación
- Mientras que si el periodo de explotación es de ocho años, se obtiene un ahorro energético instalando un variador de aproximadamente 17.000 €, e instalando tres variadores de aproximadamente 9.200 € durante el periodo de explotación

Discusión

Dado los resultados obtenidos se recomienda la instalación de tres variadores de frecuencia dado que:

- Por lo que para un periodo de explotación de cuatro años, el ahorro energético, pese a que más lento, es mayor.
- Para un periodo de ocho años, la ventaja es clara, puesto que el ahorro es casi el doble
- Además, mecánicamente se recomienda que todas las bombas trabajen de la misma forma, para que se desgasten al mismo tiempo, lo que supone también, una reducción de los costes de reparaciones y mantenimiento

VI.2. SUSTITUCIÓN DE LOS EQUIPOS DE AIREACIÓN BIOLÓGICA

VI.2.1. Estado actual

Características equipo aireación biológica actual

El aporte de aire para el tratamiento biológico, realizado en los reactores de tipo flujo en pistón de 20.000 m³ y un calado de 5 metros, se efectúa mediante dos soplante (1+1R) de émbolos rotativos de caudal 8.000 Nm³/h que alimentan unas parrillas de difusores de burbuja fina tipo membrana con cuatro agitadores situados estratégicamente.

Las soplantes de émbolos rotativos, son máquinas de ejes rotativos gemelos, en las que se consigue desplazar el fluido a gran velocidad desde la zona de entrada hacia la de salida, de alta presión, gracias al accionamiento de un sistema de correas y poleas, que provocan el giro a gran velocidad de los émbolos que descansan sobre rodamientos a bolas, están alineados paralelamente y centrados respecto a la carcasa de la máquina. Se muestran a continuación, dos figuras aclaratorias sobre la configuración de este tipo de soplantes:

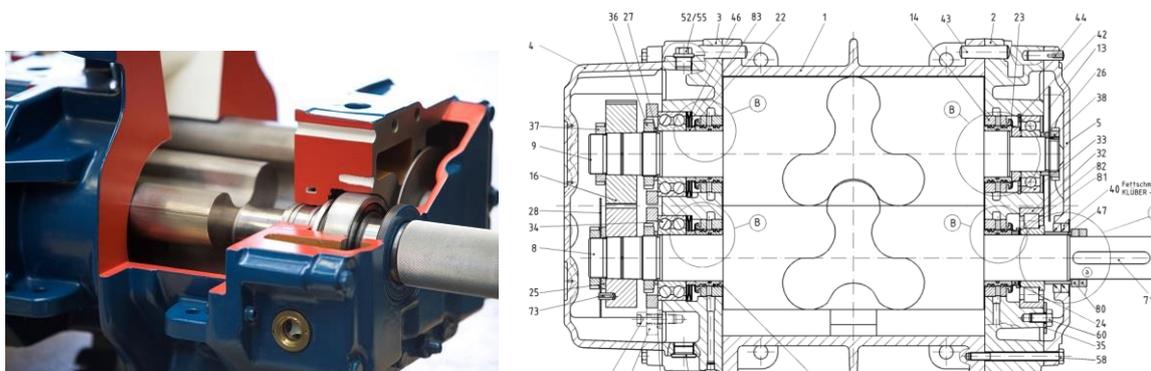


Figura 43: Imágenes de una soplante de émbolos rotativos [14]

Las características de funcionamiento son las siguientes:

- Marca MAPNER modelo SEM 90
- Caudal aspirado mínimo: 5.672 Nm³/h
- Caudal aspirado máximo: 8.586 Nm³/h

- Incremento de presión: 50 kPa
- Potencia del motor de 200 Kw
- Potencia absorbida 145 Kw
- Ruido: 85 dBA con cabina insonorizante

MODELO / MODEL		SEM.90 / DN300								
ΔP mbar	Motor [rpm]	1500								
	Soplante / blower [rpm]	500	710	920	990	1130	1200	1250	1450	
500	Q sm ³ /h	3019	4713	6407	6971	8101	8665	9068	10682	
	Δt °C	54	49	47	46	46	45	45	44	
	Pot abs Kw	59,36	84,29	109,22	117,53	134,15	142,46	148,39	172,14	
	Pot motor Kw	75	110	132	132	160	160	200	200	
	s / c	93	95	97	98	99	100	101	103	
	dBA c / c	82	83	84	84	85	85	85	86	

Tabla 5: Cuadro de características de la soplante existente instalada [14]

El siguiente gráfico muestra la variación del caudal consumido mediante la línea magenta, mientras que la línea azul punteada marca el caudal máximo que puede suministrar la soplante existente:

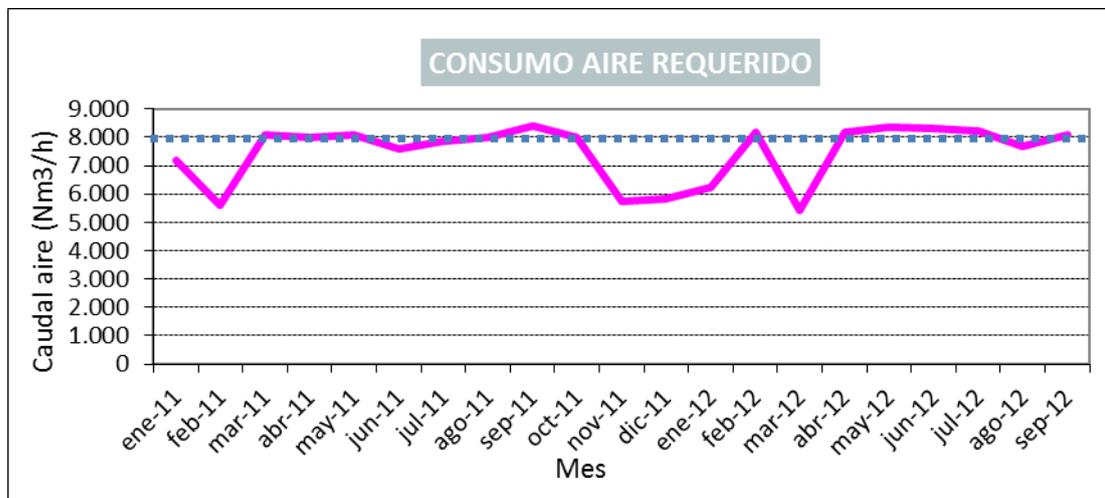


Figura 44: Consumo de aire requerido / suministrado soplante existente

Regulación caudal

Las soplantes existentes en la planta no disponen de variador de frecuencia, por lo que el caudal de aire se regula por escalones en función de las necesidades de oxígeno, poniéndose en marcha mediante el sistema de regulación todo-nada.

VI.2.2. Opciones de mejora eficiencia energética y comparativa

Para el estudio de la mejora de la eficiencia energética de las soplantes de aireación biológica se consideran tres casos:

- **Estado inicial EDAR: soplantes émbolos rotativos sin variador de frecuencia**
- **Mejora 1: instalar variador de frecuencia en la soplante existente**
- **Mejora 2: sustituir la original (sin variador) por levitación**

El caso del estado inicial es el indicado en el apartado anterior VI.2.1.

MEJORA 1: INSTALAR UN VARIADOR DE FRECUENCIA

Se estudia a continuación, el ahorro que supondría la instalación de un solo variador.

La potencia consumida por la soplante se indica en las características de la bomba, y frente a una variación de la velocidad en su correspondiente curva. Las curvas de la soplante presentan variador de frecuencia integrado, por lo que los datos obtenidos serán ya teniendo en cuenta los rendimientos del mismo.

Se pasan a observar, las curvas características de la soplante instalada:

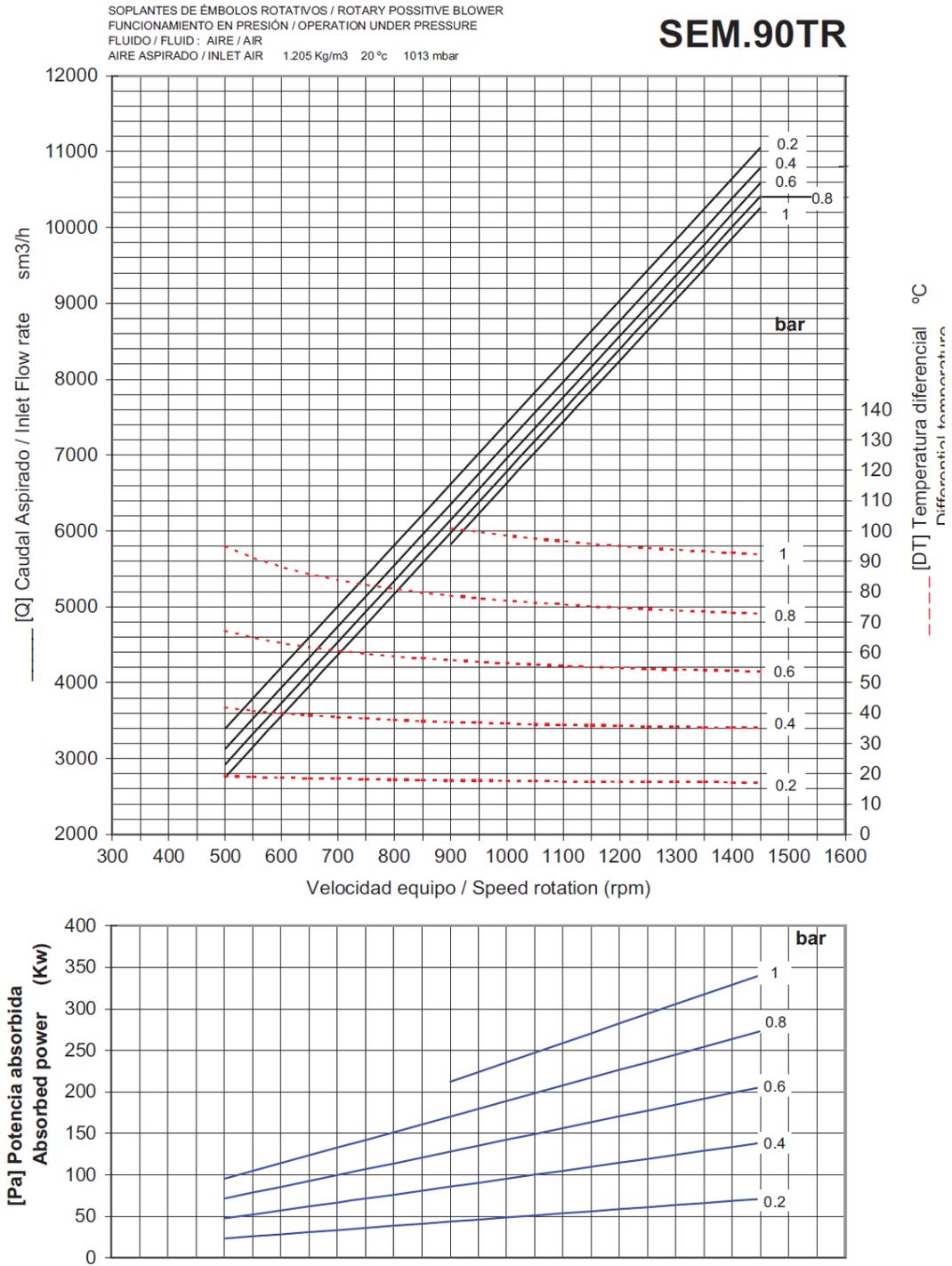


Figura 45: Curvas características de la soplante existente instalada [14]

MEJORA 2: SUSTITUIR LAS SOPLANTES POR UNAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA [15, 16 y 17]

Estas máquinas presentan control de velocidad y operación total, están exentas de aceite y ofrecen grandes ventajas en términos de alta eficiencia.

Estas soplantes están accionadas directamente por un motor síncrono de magnetismo permanente, que es muy superior a los motores convencionales. El rodete está diseñado con álabes inclinados hacia atrás de acero inoxidable, incorpora sellos de laberinto que contribuyen a una alta eficiencia y unas fugas de aire mínimas. En este tipo de motores de imanes permanentes, la refrigeración de aire se combina con



Figura 46: Soplante de levitación magnética

el magnetismo de imán permanente del motor, por lo que no necesita energía adicional para su magnetización. Lo que provoca que tenga un mayor rendimiento y mayor eficiencia. Por otro lado, el motor funciona totalmente exento de aceite y con muy poco desgaste y mantenimiento, ya que el tubo está montado directamente en el eje del motor. Las ventajas de estos equipos para el tratamiento de aguas residuales, además de las citadas de máximo rendimiento y eficiencia energética, son el bajo nivel de ruidos, la seguridad de su funcionamiento, la larga vida útil y los bajos coste de servicios y mantenimiento que supone.

Para esta mejora se sustituye la soplante existente por la siguiente soplante de levitación magnética [13]:

- Marca AERZEN modelo AT200
- Caudal aspirado mínimo: 3.200 Nm³/h
- Caudal aspirado máximo: 8.000 Nm³/h
- Incremento de presión: 50 kPa
- Potencia nominal 150 Kw
- Ruido: <81 dBa

- Potencia consumida en el eje:
 - 100% → 137,7 kW
 - 80% → 106,71 kW
 - 60 % → 81,71 kW
 - 40% → 58,18 kW

Entrando en las curvas con diferentes hipótesis, obtenemos una nube de puntos, de la cual se puede calcular su línea de tendencia. Tanto para la opción de añadir un variador, como a la de sustituir por otro equipo más eficiente. Tal y como se muestra a continuación:

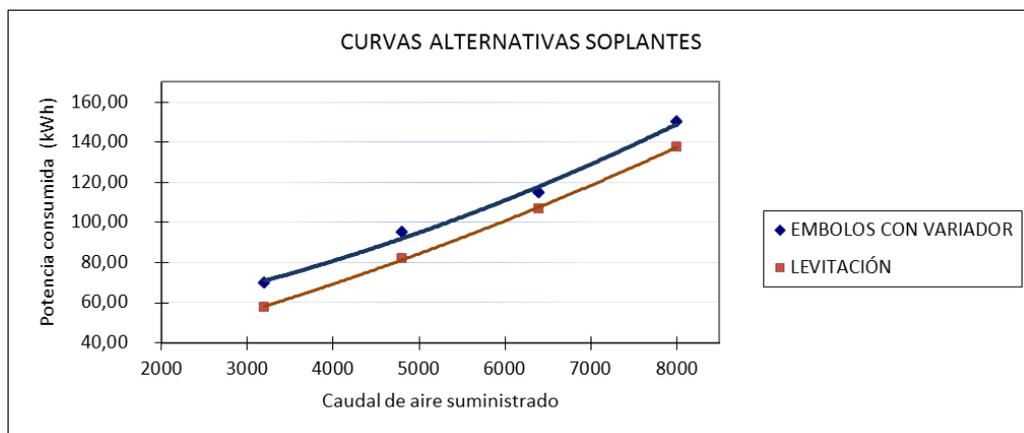


Figura 47: Gráfico de las líneas de tendencia caudal – potencia de ambas alternativas

Se realiza el potencial ahorro a partir de las curvas obtenidas, de la energía al instalar un variador de frecuencia o sustituir la soplante actual por una más eficiente de levitación magnética, según los caudales históricos de entrada al tratamiento biológico en la EDAR.

En este gráfico se observa la potencia consumida en los tres casos estudiados, el porcentaje de potencia es con respecto a la potencia nominal de la instalación actual:

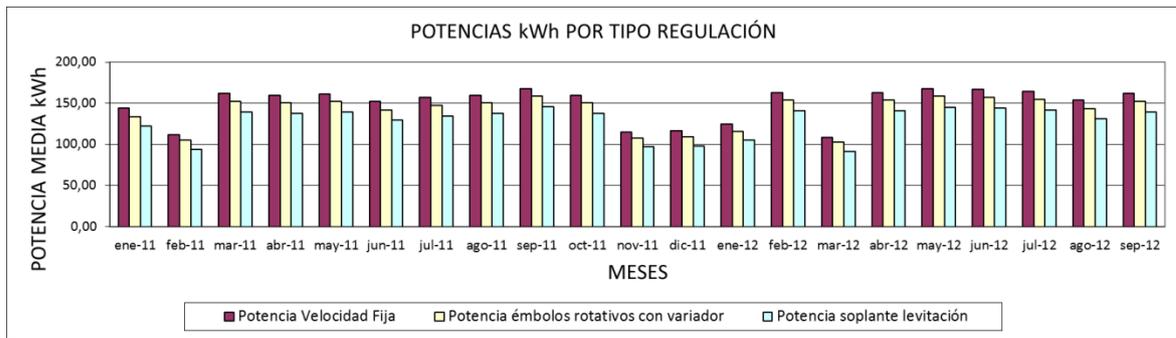


Figura 48: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de mejora en las soplantes del tratamiento biológico

En el siguiente gráfico de áreas, se observa claramente que el método de regulación todo-nada es el que mayor consumo supone y, la soplante de levitación, el que menos:

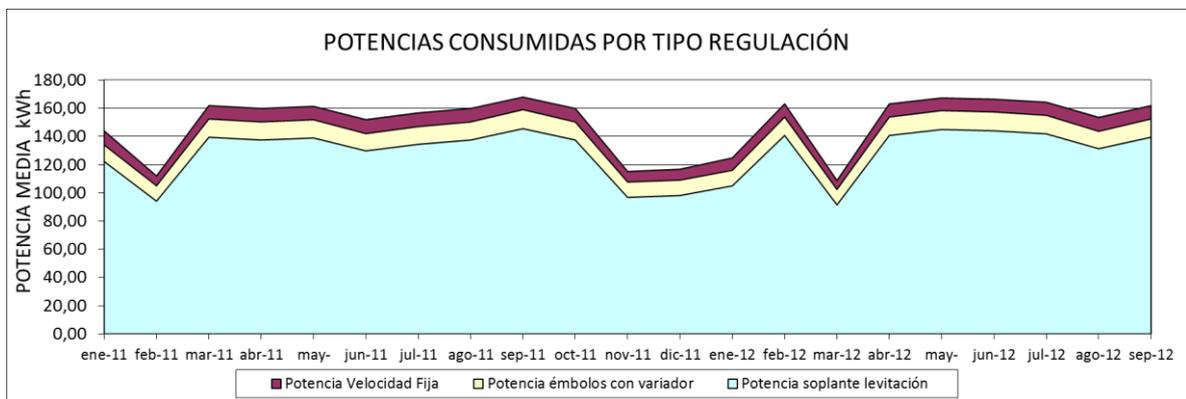


Figura 49: Gráfico potencias consumidas por tipo de mejora en las soplantes del tratamiento biológico

VI.2.3. Estudio de viabilidad económica

Comparativa de costes anuales

El siguiente gráfico muestra el porcentaje de ahorro con respecto al equipo de émbolos rotativos con sistema de regulación todo-nada utilizado inicialmente en la EDAR, frente a las alternativas estudiadas energéticamente más eficientes:

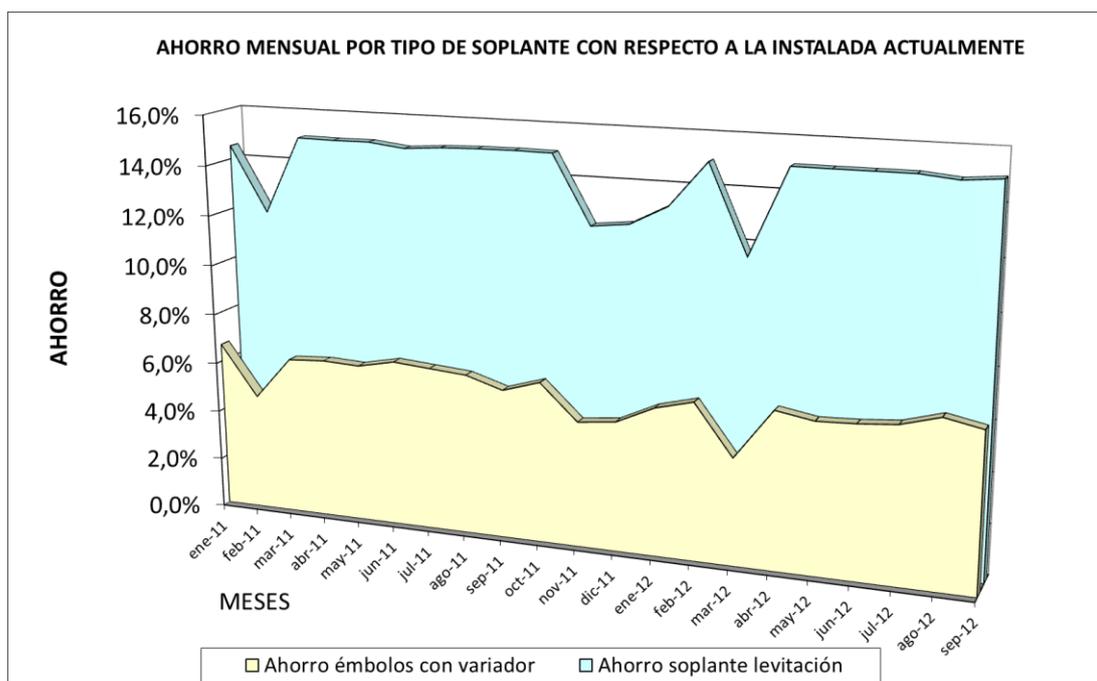


Figura 50: Gráfico del ahorro mensual por tipo de mejora con respecto al sistema actual de suministro de aire

Ahorro total mensual y anual

Los ahorros totales respecto de la regulación marcha-paro son:

	Con variador	Levitación
AHORRO MES	6.570,95 kW (6%)	15.610,32 kW (14,3%)
AHORRO ANUAL (8750 h/año)	78.851,44 kW	187.323,89 kW

Tabla 6: Tabla del ahorro total mensual y anual de las alternativas propuestas con respecto al sistema actual de suministro de aire al tratamiento biológico

Solución más confortable y más eficiente es la sustitución del equipo por uno de levitación electromagnética. Permite un ahorro de energía consumida de más de un 14% con respecto a la generación actual.

Análisis del periodo de retorno

Este estudio analiza el periodo de retorno estimado de las inversiones de la instalación de un variador frente la sustitución del equipo por uno más eficiente, considerando las

inversiones iniciales y unos determinados índices de incremento de precio de la electricidad.

En el cálculo del ahorro que supone la sustitución del equipo por uno de levitación más eficiente, se ha estimado también, un ahorro en los costes de mantenimiento de 5.000€ anuales.

Considerando un coste de la energía eléctrica de 0,098 €/kWh, el payback de la instalación de un variador se produce a los 1,31 años, mientras que la sustitución del equipo por uno de levitación en 3,06.

En las siguientes tablas se muestran las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado (ahorros acumulados – inversiones totales), para cada una de las alternativas:

Soplante de émbolos rotativos con variador

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	-10.000,00	-	-	-	-	-	-	-	-
AHORRO	-	7.763,32	7.647,98	7.628,00	7.628,00	7.628,00	7.628,00	7.628,00	7.628,00
SALDO	-10.000,00	-2.236,68	5.411,31	13.039,30	20.667,30	28.295,30	35.923,29	43.551,29	51.179,28

Tabla 7: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la instalación de un variador de frecuencia

Soplante de levitación electromagnética

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	-71.000,00	-	-	-	-	-	-	-	-
AHORRO	-	23.266,66	23.290,66	23.290,66	23.290,66	23.290,66	23.290,66	23.290,66	23.290,66
SALDO	-71.000,00	-47.733,34	-24.442,69	- 1.152,03	22.138,63	45.429,29	68.719,95	92.010,61	115.301,27

Tabla 8: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la sustitución del equipo actual por uno más eficiente

A continuación, se muestra gráficamente los comparativos de los saldos acumulados (ahorros acumulados – inversiones) para los periodos de cuatro y ocho años. A partir de la inversión inicial cada año se va obteniendo un ahorro económico:

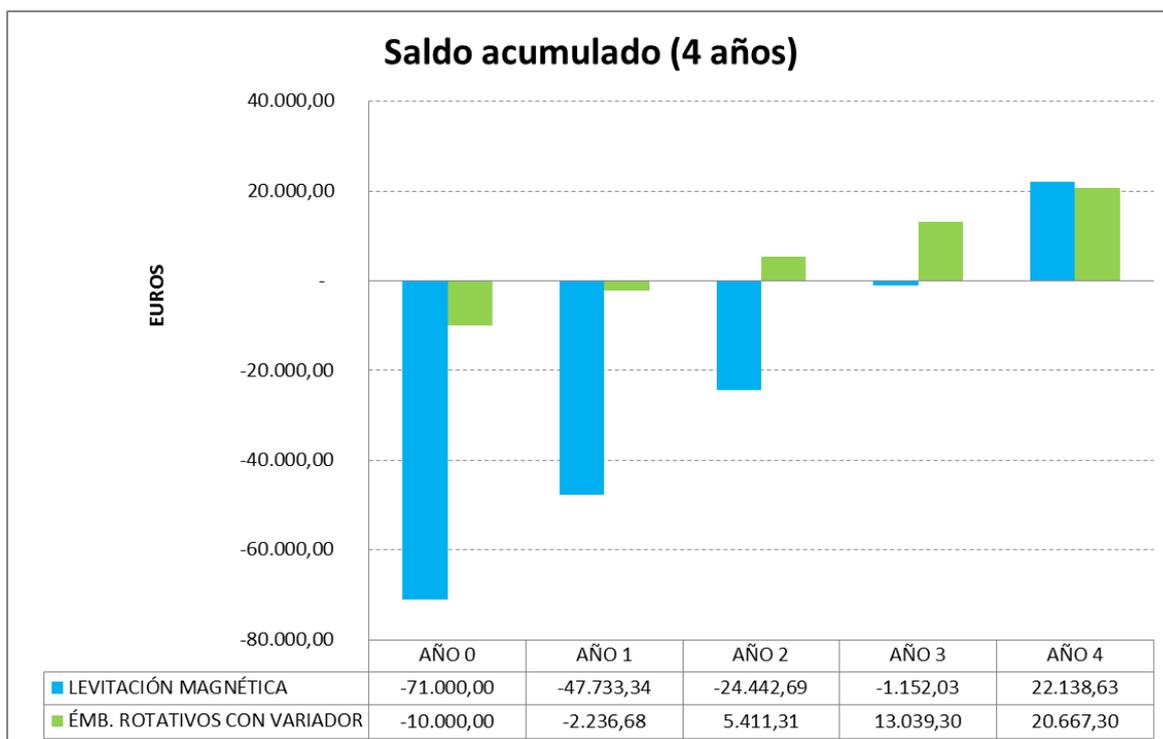
Ahorro total acumulado en 4 años

Figura 51: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejoras de la eficiencia de las soplantes del tratamiento biológico

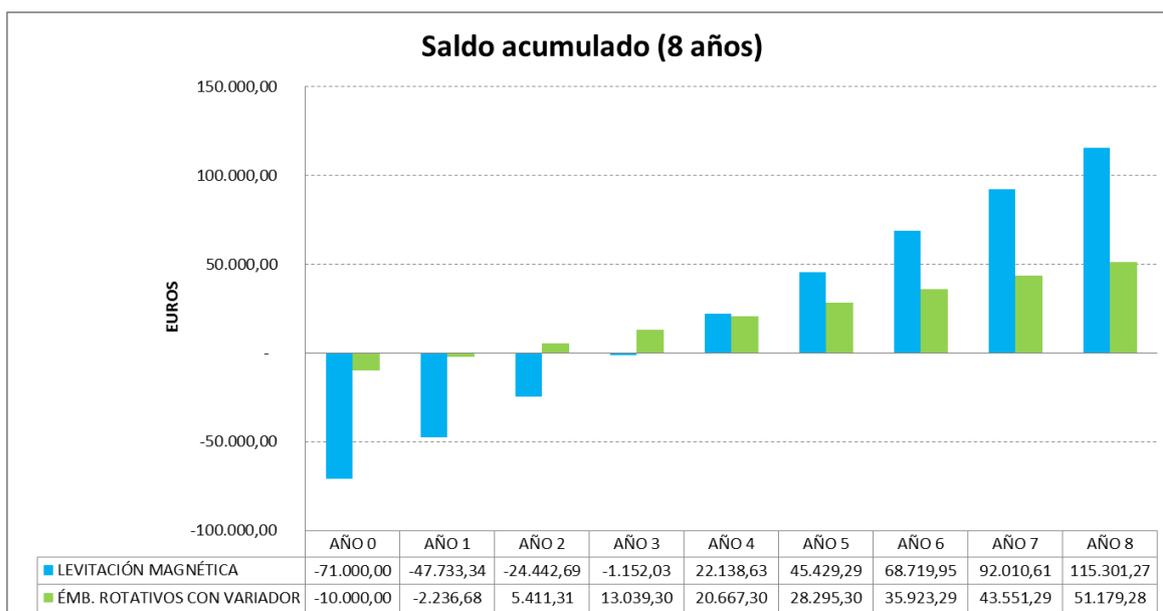
Ahorro total acumulado en 8 años

Figura 52: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejoras de la eficiencia de las soplantes del tratamiento biológico

VI.2.4. Resumen de resultados y discusión

Análisis de resultados

- En la figura 51, se observa que para el caso de cuatro años de periodo de amortización, el ahorro que supone la instalación del equipo de levitación, es muy similar al que se obtiene instalando un variador de frecuencia en el equipo actual.
- Para el caso de una concesión a ocho años, como vemos en la figura anterior, puede interesar hacer una inversión mayor que produzca una rentabilidad a largo plazo.
- No se ha considerado para la recuperación del coste de la inversión, pero no hay que olvidar, como ya se ha indicado anteriormente, que los variadores extienden la vida útil de los equipos y la instalación.

Discusión

Dado los resultados obtenidos se recomienda, para un periodo de cuatro años de concesión, la instalación de un variador de frecuencia dado que:

- Se considera una mejora elección, frente a una concesión de cuatro años, realizar la inversión menor, ya que el ahorro de ambas mejoras es muy similar. En el caso de la instalación de un variador, la inversión inicial se recupera rápidamente, y se comienza a reducir los gastos energéticos en el segundo año.

Mientras que para un periodo de ocho años, se recomienda la instalación de un equipo más eficiente:

- La sustitución del equipo existente por uno de levitación electromagnética, supone un ahorro energético total obtenido durante los ocho años del orden del doble que instalando un variador.

- Además del evidente ahorro económico anual que supone este tipo de instalaciones, los equipos de levitación electromecánica, suponen otras ventajas como son la ausencia de olores, la ausencia de ruidos, la no necesidad de tener que disponer de un depósito de combustible, que no necesita de mantenimiento alguno, que no son necesarios conductos de evacuación de humos, que no se producen humos y que, por tanto, no son necesarias las limpiezas anuales de estos componentes.

VI.3. MEJORA DE LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO. DIFUSORES DEL REACTOR BIOLÓGICO

VI.3.1. Estado actual. Antecedentes

Todos los tipos de difusores deben estar limpios para que la pérdida de carga sea lo menor posible, de forma que se optimice el consumo energético.

Tradicionalmente la limpieza de difusores se realiza de forma manual mediante chorro de agua a presión. Esta operación es muy costosa por la mano de obra y, además es muy difícil conseguir alto rendimiento de reducción de pérdida de carga cuando la colmatación se encuentra en el interior de los poros.

En este apartado se estudia la viabilidad técnica y económica de realizar la limpieza por vía química mediante ácido fórmico, dado que de ese modo se pueden disolver las impurezas acumuladas en los poros de los difusores sin dañar la membrana ni las conducciones. Además, el ácido es biodegradable y por lo tanto no genera interferencias con el tratamiento biológico.

Características difusores existentes

Los 1.512 difusores EPDM instalados en el reactor biológico de la depuradora llevan instalados 24 meses, sin que se haya llevado a cabo ninguna limpieza. Las características de los difusores existentes son las siguientes:

CARACTERÍSTICAS	EDAR
Caudal diseño(m ³ /d)	6.070
Caudal tratado (m ³ /d)	4.700
Nº R. biológicos	2
Nº R. biológicos en marcha	2
Volumen unitario biológico (m ³)	3850
Volumen de aire	8070
Nº difusores	1512
Diametro (pulgadas)	9
Caudal Nominal (Nm ³ /h)	6
Caudal Máximo (Nm ³ /h)	8,3
Caudal de Trabajo por difusor (Nm ³ /h)	4
Nivel de agua sobre difusores (m)	5,0
Pérdida de carga (bar)	0,589
% SOTE	20
Dosis de Ácido Fórmico por difusor (g/min)	0,5

Tabla 9: Tabla de las características de los difusores existentes

Siendo el SOTE (%) un parámetro que mide la eficiencia de la transferencia de oxígeno de los difusores, relaciona para aguas limpias los kgO_2 que son transferidos a la masa de agua por kgO_2 que extraen los difusores.



Figura 53: Imagen instalación red de difusores en un reactor biológico

Las causas que provocan el bajo rendimiento de la instalación se deben a la combinación de los siguientes factores [1, 2]:

- Deterioro de los difusores de aire por su edad y la agresividad del medio.
- Colmatación de los difusores de aire a consecuencia de los flujos inversos ocasionados por las frecuentes paradas de los reactores por interrupciones en el suministro eléctrico.
- Diseño de los reactores no ajustado a las condiciones reales de trabajo de la planta.

VI.3.2. Opciones de mejora eficiencia energética y comparativa

Para el estudio de la mejora de la eficiencia energética de la transferencia de oxígeno se consideran dos casos:

- **Estado inicial EDAR: difusores 24 meses instalados sin limpieza.**
- **Mejora 1: Limpieza con ácido fórmico del sistema de colectores de aireación y de los difusores de membrana de burbuja fina.**
- **Mejora 2: Sustitución de las membranas por otras de alta eficiencia.**

Hay un alto número de difusores, con un caudal unitario de $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$, por lo tanto no se va a estudiar en este caso el aumento de densidad de los mismos. En general, un aumento del número de difusores hasta una densidad de $3 \text{ Nm}^3/\text{h}$, puede suponer una mejora de un 3% del SOTE aproximadamente [21].

MEJORA 1: LIMPIEZA CON ÁCIDO FÓRMICO

La limpieza de los difusores y del sistema de colectores, se realiza según las recomendaciones del fabricante de los difusores. Se ejecutan en etapas de limpieza de 10 minutos cada una, se repiten hasta que no se aprecia disminución significativa de la presión en el colector. Se efectúan un total de seis limpiezas, con una dosis de 5 g de ácido fórmico por difusor en cada una de las etapas [2, 21].

La disminución de la presión durante los ensayos, supone una disminución de la pérdida de carga, y por lo tanto una menor potencia absorbida, lo que lleva asociado un menor consumo energético.

A continuación, se demuestra la linealidad de la disminución de pérdida de carga y de consumo energético.

El diferencial de trabajo que realiza un gas, según las ecuaciones de la termodinámica, se rige por la siguiente expresión:

$$dW = p \cdot dV$$

Siendo W la energía consumida, p la presión y V el volumen.

Sustituyendo en la fórmula de la definición de potencia (P):

$$P = \frac{dW}{dt} = p \cdot \frac{dV}{dt}$$

La energía consumida es igual a:

$$W(t_1) = \int_{t_0}^{t_1} p(t) \cdot \frac{dV(t)}{dt}$$

De esta expresión podemos ver que para obtener la energía consumida, se debe integrar el producto de los valores de presión y caudal de aire con el tiempo. Por lo que se puede extraer que, de forma aproximada, en el caso de soplantes de desplazamiento positivo existe una relación lineal y de pendiente uno, entre el aumento de la presión de trabajo y el aumento de la energía consumida, para un mismo caudal de aire suministrado.

Por lo que, como buena aproximación, podemos decir que si disminuimos la presión de trabajo, disminuirá el consumo producido para la aireación linealmente. Esta suposición se ve reforzada en estudios experimentales examinados en depuradoras [18, 19 y 20].

De los estudios experimentales analizados en EDAR similares explotadas por diferentes empresas se puede extraer que tras la limpieza con ácido fórmico se obtiene una media de un 10% de reducción de la pérdida de carga.

El ahorro de costes de mantenimiento utilizando una limpieza química frente a la limpieza manual, se estima según experiencia de diferentes explotadoras en un 2% [18, 19 y 20].

En esta EDAR en particular, tras realizar la limpieza química de los difusores se obtiene una reducción del 10,63%, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

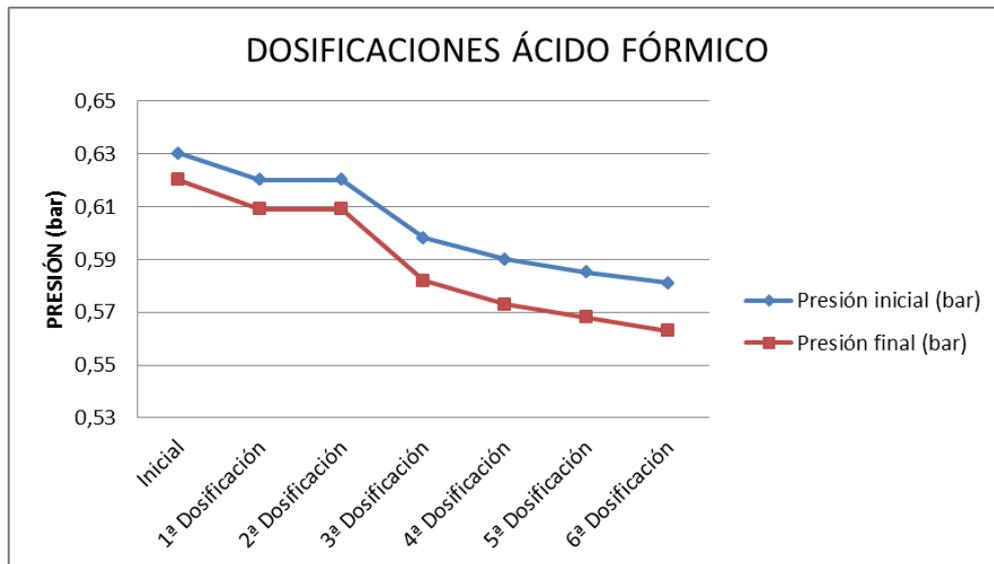


Figura 54: Gráfico de la evolución presión durante las dosificaciones aplicadas

Suponiendo una relación lineal de reducción de pérdida de carga y ahorro energético, esta reducción supondrá un 10% (quedándonos del lado conservador del ahorro calculado) del consumo energético en consumo de aire para el tratamiento biológico.

MEJORA 2: SUSTITUCIÓN DE LAS MEMBRANAS DE LOS DIFUSORES POR UNAS DE ALTA EFICIENCIA

La sustitución de las membranas existentes, por unas similares de tipo convencional, supondría una mejora porcentual de la pérdida de carga, muy similar a la obtenida tras la primera limpieza de los difusores con ácido fórmico.

Por lo que, será necesario un cambio de las membranas de los difusores cuando la evolución de las presiones obtenidas tras las limpiezas químicas no suponga prácticamente mejora.

Existen un tipo de membranas de alta eficiencia cuya instalación supone un aumento de la eficacia de transferencia de un 3,8 % [21]. Dado que el oxígeno que se transfiere aumenta en un 3,8%, el caudal de aire necesario producir disminuye un 3,8%. Por lo que supondrá un ahorro energético de este mismo porcentaje.

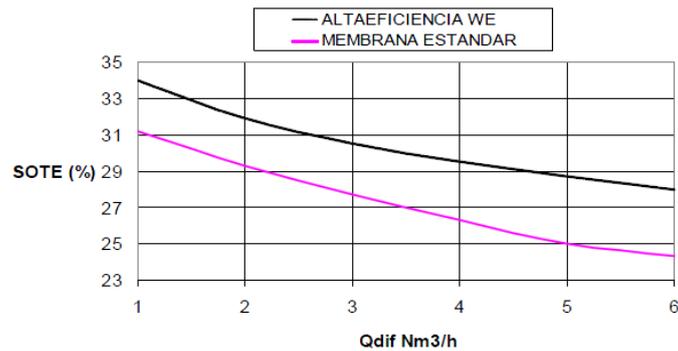


Figura 55: Gráfico de la evolución caudal difusor - %SOTE para ambos tipos de difusores [21]

Estas membranas presentan sus perforaciones repartidas en sectores circulares y su espesor variable optimizan el reparto de aire a través de toda la superficie de la membrana, aumentando así el rendimiento y vida útil de la misma [21].

En este gráfico se observa la potencia consumida en los tres casos estudiados, el consumo de potencia es con respecto al consumo actual de la instalación:

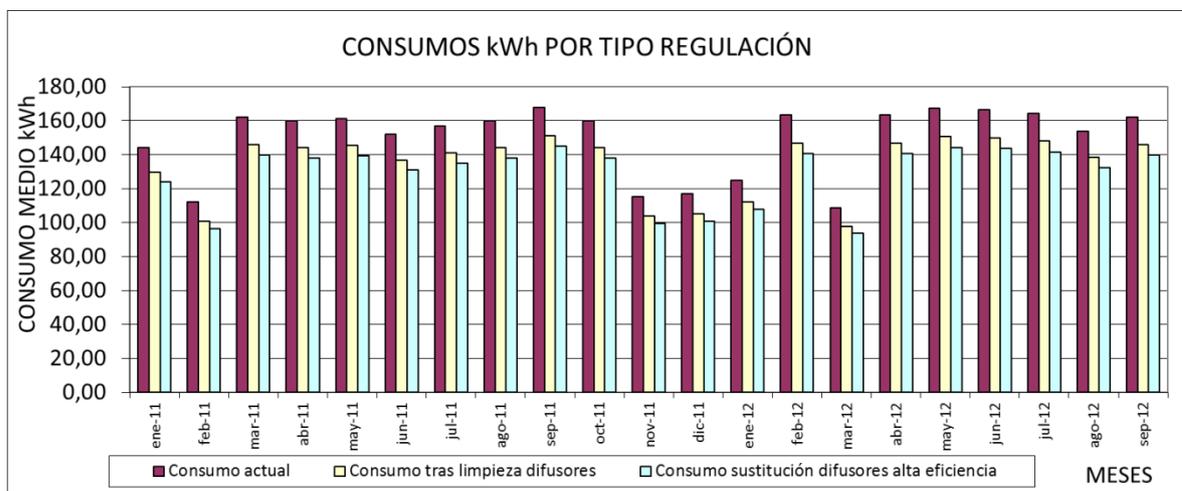


Figura 56: Gráfico de las potencias % consumidas por tipo de mejora en los difusores biológicos

En el siguiente gráfico, se observa claramente que el estado actual de los difusores es el que mayor consumo supone y, tras la sustitución por unos de alta eficiencia, el que menos.

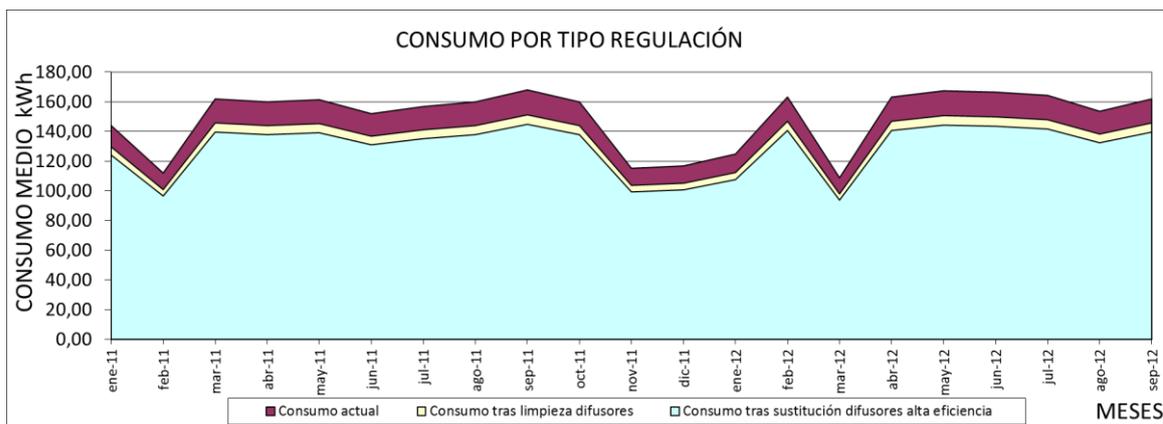


Figura 57: Gráfico de las potencias consumidas por tipo de mejora en los difusores biológicos

VI.3.3. Estudio de la viabilidad económica

Comparativa de costes anuales

El comparativo se realiza desde un punto de vista conservador, considerando que la sustitución de difusores supondrá la misma reducción de energía que en la limpieza, más la mejora de la transferencia ya indicada del 3,8%, lo que supone un total de 13,8% de ahorro.

El siguiente gráfico de áreas muestra el % de ahorro con respecto al estado inicial de los difusores, frente a su estado tras la limpieza química o sustituyéndolos por unos difusores de alta eficiencia:

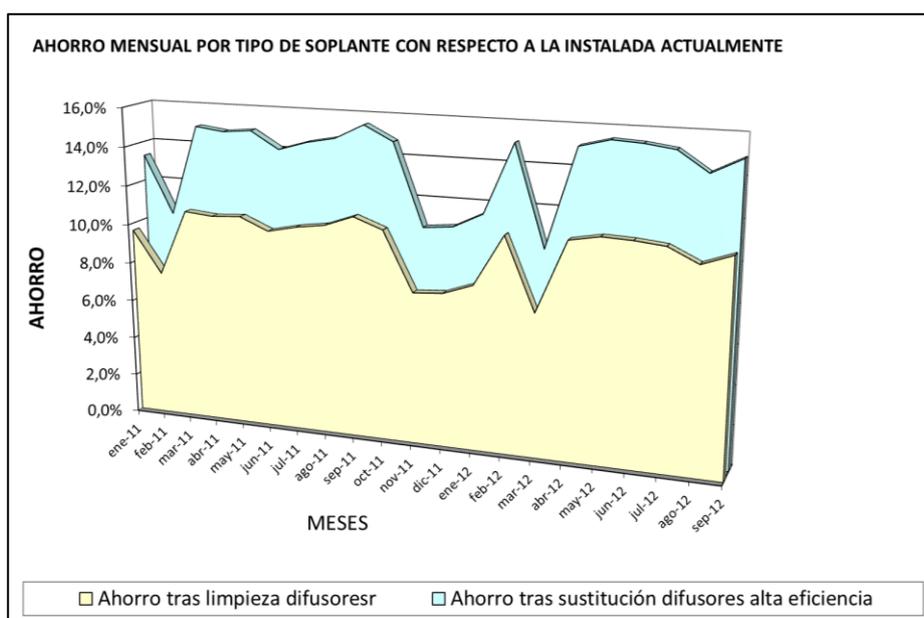


Figura 58: Gráfico del ahorro mensual por tipo de mejora con respecto al estado actual de difusores

Ahorro total mensual y anual

Los ahorros totales respecto del estado actual de los difusores son:

	Limpieza química	Sustitución difusores
AHORRO MES	10.908,66 kW (10%)	15.053,95 kW (13,8%)
AHORRO ANUAL (8750 h/año)	130.903,89 kW	180.647,37 kW

Tabla 10: Tabla del ahorro total mensual y anual de las alternativas propuestas con respecto al sistema actual de difusores

El ahorro energético entre alternativas no es muy elevado. La elección dependerá del coste de cada una de ellas y periodo en el que se quiera amortizar la posible inversión.

Análisis del periodo de retorno

El siguiente estudio analiza el periodo de retorno estimado del coste que supone la limpieza química de los difusores (mano de obra y materiales), que es de 100 €/año; frente la sustitución de los difusores por unos de alta eficiencia (se estima un coste de 50 €/difusor).

Considerando un coste de la energía eléctrica de 0,098 €/kWh, el payback de la instalación de un variador se produce inmediatamente, mientras que la sustitución de los difusores por unos de membranas de alta eficiencia en 4,25.

En las siguientes tablas se muestran las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado (ahorros acumulados – costes/inversiones totales), para cada una de las alternativas:

Limpieza química

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
COSTE	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
AHORRO	0,00	12.633,36	12.703,14	12.382,34	12.382,34	12.382,34	12.382,34	12.382,34	12.382,34
SALDO	-100,00	12.533,36	25.236,50	37.618,84	50.001,18	62.383,52	74.765,87	87.148,21	99.530,55

Tabla 11: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la limpieza de los difusores

Sustitución por difusores de alta eficiencia

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	-75.600,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AHORRO	0,00	17.434,03	17.668,34	17.225,63	17.225,63	17.225,63	17.225,63	17.225,63	17.225,63
SALDO	-75.600,00	-58.165,97	-40.497,63	-23.272,00	-6.046,37	11.179,26	28.404,89	45.630,53	62.856,16

Tabla 12: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado mediante la sustitución de los difusores por unos de alta eficiencia

A continuación, se muestra gráficamente los comparativos de los saldos acumulados (ahorros acumulados – inversiones) para los periodos de cuatro y ocho años. A partir de la inversión inicial cada año se va obteniendo un ahorro económico:

Ahorro total acumulado en 4 años

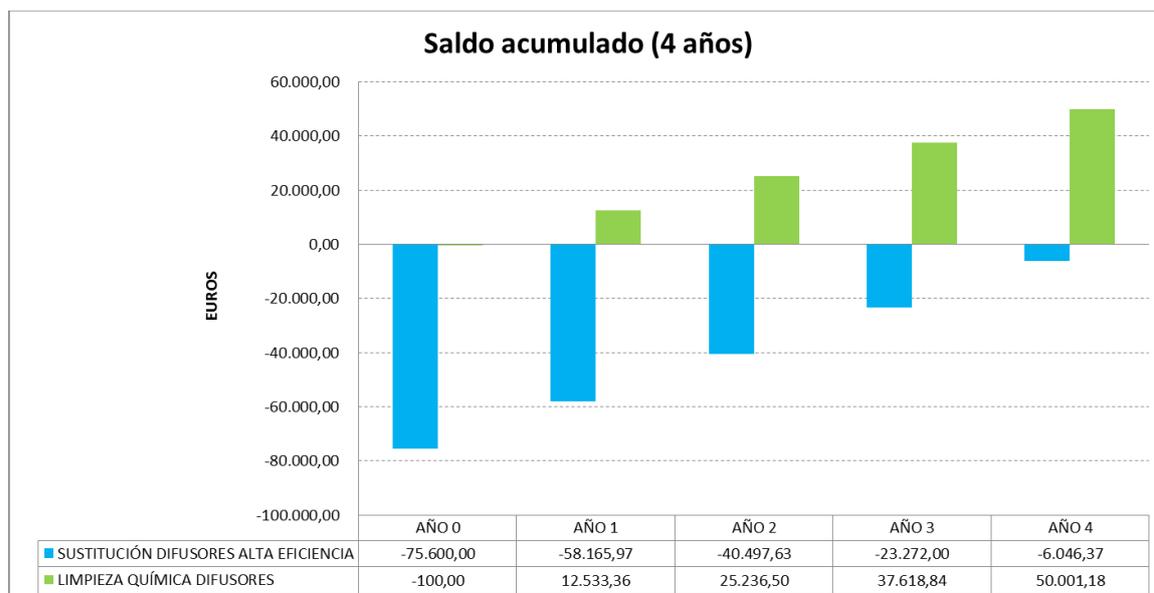


Figura 59: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para la mejora del consumo por los difusores

Ahorro total acumulado en 8 años

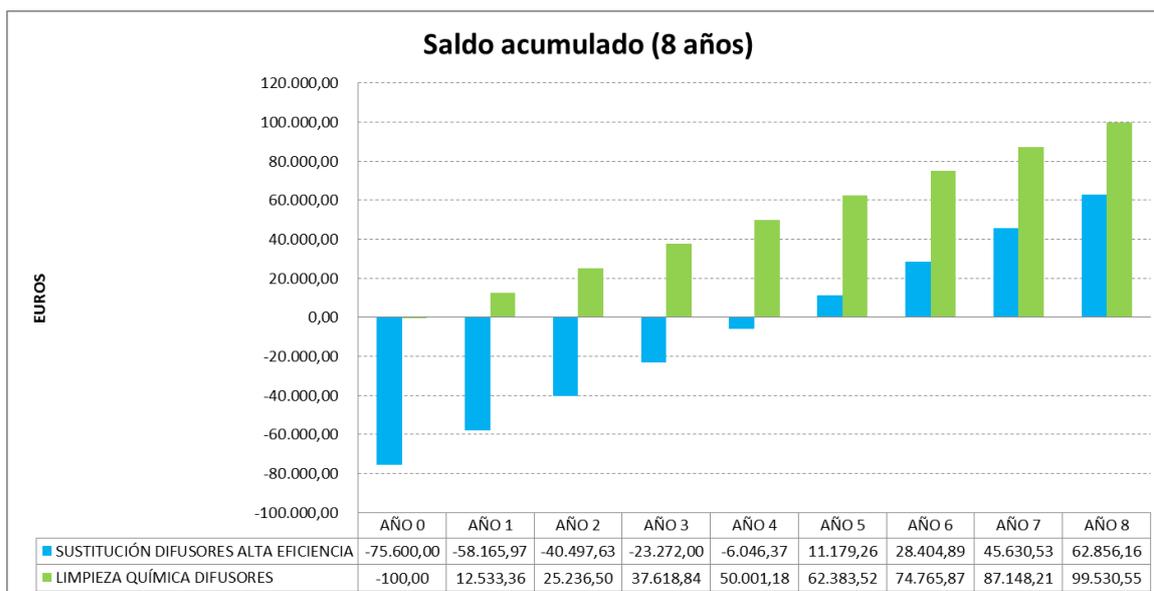


Figura 60: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para la mejora del consumo por los difusores

VI.3.4. Resumen de resultados y discusión

Análisis de resultados

- En las gráficas anteriores, se observa cómo pese a que el ahorro que supone la sustitución de los difusores es mayor, no lo es suficientemente para suponer un ahorro neto (teniendo en cuenta la inversión inicial) mayor que en el caso de la limpieza de difusores a lo largo de los ocho años de estudio.
- En la figura 59 anterior, se observa que en el año 4, ni siquiera se llega a recuperar la inversión de la sustitución de difusores. Para recuperar la inversión con estos porcentajes de ahorro se necesitarían del orden de 15 años.
- Lo que sí queda de manifiesto es la necesidad de realizar limpiezas químicas por su bajo coste y el gran ahorro energético que supone.

Discusión

Dado los resultados obtenidos se recomienda, para un periodo inferior a ocho años de concesión, la limpieza química dado que:

- Se considera una mejor elección, frente a una concesión inferior a ocho años, no realizar una gran inversión, ya que el ahorro que supone la limpieza química es mayor, y apenas supone 100 € de coste anual. Además, se comienza a ahorrar energía inmediatamente.

La sustitución de los difusores por unos más eficientes, únicamente se recomendará en algunos casos:

- La limpieza química pese a ser un método muy extendido y muy efectivo, no evita cierto ensuciamiento y desgaste de los difusores, que únicamente se pueden eliminar siendo sustituidos. Por lo que únicamente se recomendará la sustitución de los difusores en el caso de que se hayan realizado muchas limpiezas químicas en los difusores a lo largo del periodo de explotación y no se consiga la pérdida de carga esperada, por lo que el ahorro que se obtendría sería inferior.
- Este tipo de membranas de alta calidad tienen una vida útil mayor que las convencionales, pudiendo llegar a más de 10 años en muchos casos. Por otro lado, con un sistema de parrillas de última generación, con alta fiabilidad mecánica, sería posible únicamente cambiar las membranas de los difusores, con lo que la inversión realizada sería inferior y se recuperaría antes.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

VII.1. PORCENTAJE DE AHORRO DE CADA ALTERNATIVA

En este apartado se calculan los porcentajes de ahorro frente al consumo total actual de la EDAR de cada una de las medidas estudiadas para cada mejora planteada:

BOMBEO DE CABECERA	
1 Variador	3 Variadores
0,9%	1,7%
SOPLANTES BIOLÓGICO	
Émb. con variador	Levitación electrom.
3,0%	7,2%
MEJORA DIFUSORES	
Limpieza	Sustitución
5,1%	7,0%

Tabla 13: Tabla de los porcentajes de ahorro frente al consumo total actual de la EDAR de cada una de las medidas planteadas

Tal y como se esperaba al inicio del trabajo, se alcanzan las mayores reducciones de consumo en los apartados que afectan al tratamiento biológico, puesto que es el proceso de la depuradora que más energía consume de toda la planta.

Tanto la mejora de los equipos generadores de aire, como los equipos distribuidores del mismo, suponen ahorros que pueden llegar hasta el 7% del consumo total de la EDAR.

Destacar de nuevo, el importante ahorro energético que se puede conseguir con la limpieza de los difusores (5,1 % del consumo total de la EDAR) frente el bajo coste que supone (100 €/año). Por lo que esta medida debería ser imprescindible en cualquier planta de depuración de aguas residuales que disponga de difusores de burbuja fina en su instalación de tratamiento biológico.

VII.2. AHORROS GLOBALES DE ENERGIA

En este apartado se comparan dos grupos de opciones de mejoras y se propone el grupo recomendado en base al estudio realizado, en función de si el plazo de explotación de la planta es de cuatro o de ocho años de duración.

VII.2.1. Cuatro años de explotación

Para el periodo de cuatro años de explotación se descarta la opción de sustituir el equipo soplante actual por uno de levitación, dado que supone una diferencia de ahorro mínima, y la inversión que supone es elevada.

Por otro lado, se descarta la sustitución de los difusores, dado que en cuatro años no se llega a recuperar la inversión.

Respecto a la mejora de la eficiencia energética del sistema de bombeo, a continuación se comparan ambas alternativas estudiadas, instalar variador en una sola bomba o instalar variador en todas las bombas:

Grupo de alternativas recomendado: tres variadores en las bombas de cabecera + un variador en soplante + limpieza difusores

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
INVERSIÓN	- 18.440,00	-	-	-	-
AHORRO	-	23.567,67	23.009,59	23.275,10	23.275,10
SALDO	- 18.440,00	5.127,67	28.137,26	51.412,36	74.687,46

Tabla 14: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas recomendado para un periodo de explotación de 4 años

Grupo de alternativas menos recomendable: un variador en una bomba de cabecera + un variador en soplante + limpieza difusores

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
INVERSIÓN	- 12.880,00				
AHORRO	-	21.871,04	20.692,65	20.339,72	20.339,72
SALDO	- 12.880,00	8.991,04	29.683,69	50.023,40	70.363,12

Tabla 15: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas menos recomendable para un periodo de explotación de 4 años

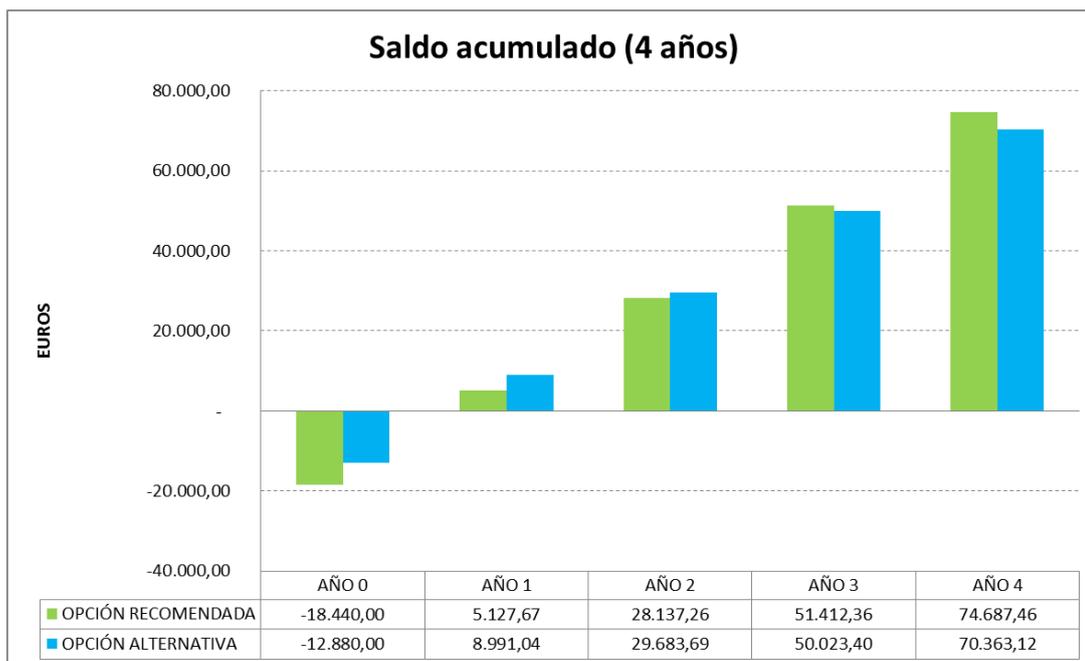


Figura 61: Gráfico del ahorro total acumulado en 4 años de ambas alternativas para los dos grupos de alternativas

Se observa, que el grupo de alternativas recomendado que incluye la instalación de variadores en cada una de las bombas supone un mayor ahorro energético y, además, como ya se ha indicado en el apartado correspondiente, mecánicamente y eléctricamente es la mejor solución, por lo que supondrá un mayor ahorro también en mantenimiento y reposiciones.

Por lo tanto, para un periodo de cuatro años de concesión del servicio de explotación de la presente EDAR estudiada se recomienda instalar variadores de frecuencia en las tres bombas de cabecera existentes, instalar un variador de frecuencia en la soplante de émbolos rotativos existente y realizar una limpieza de los difusores de burbuja fina.

Se puede decir además, extrapolando para cualquier EDAR de aireación prolongada que, para un periodo de cuatro años de explotación, se recomienda instalar variadores de frecuencia en cada bomba de cabecera existente (si las hay), instalar un variador de frecuencia si no disponen de él las soplantes existentes y muy importante realizar una limpieza química de los difusores de burbuja fina del reactor biológico.

VII.2.2. Ocho años de explotación

Para el periodo de ocho años de explotación se considerarán como mínimo las propuestas realizadas en el apartado anterior para cuatro años de explotación.

Las mejoras descartadas en el periodo anterior, se estudian a continuación (la sustitución la soplante actual por una de levitación electromagnética y la sustitución de los difusores existentes por unos de membrana de alta eficiencia):

Grupo de alternativas recomendado: tres variadores en las bombas de cabecera + sustitución de la soplante por una de levitación + sustitución difusores

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	-79.440,00	-	-	-	-	-	-	-	-
AHORRO	-	39.071,01	38.652,26	38.736,28	38.736,28	38.736,28	38.736,28	38.736,28	38.736,28
SALDO	-79.440,00	-40.368,99	-1.716,73	37.019,55	75.755,82	114.492,10	153.228,38	191.964,66	230.700,94

Tabla 16: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas recomendado para un periodo de explotación de 8 años

Grupo de alternativas menos recomendable: tres variadores en las bombas de cabecera + variador en soplante + limpieza difusores

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
INVERSIÓN	- 18.440,00								
AHORRO	-	23.567,67	23.009,59	22.229,63	22.229,63	22.229,63	22.229,63	22.229,63	22.229,63
SALDO	- 18.440,00	5.127,67	28.137,26	50.366,89	72.596,52	94.826,15	117.055,78	139.285,41	161.515,04

Tabla 17: Tabla de las inversiones anuales necesarias, los ahorros obtenidos y el saldo anual acumulado del grupo de alternativas menos recomendable para un periodo de explotación de 8 años

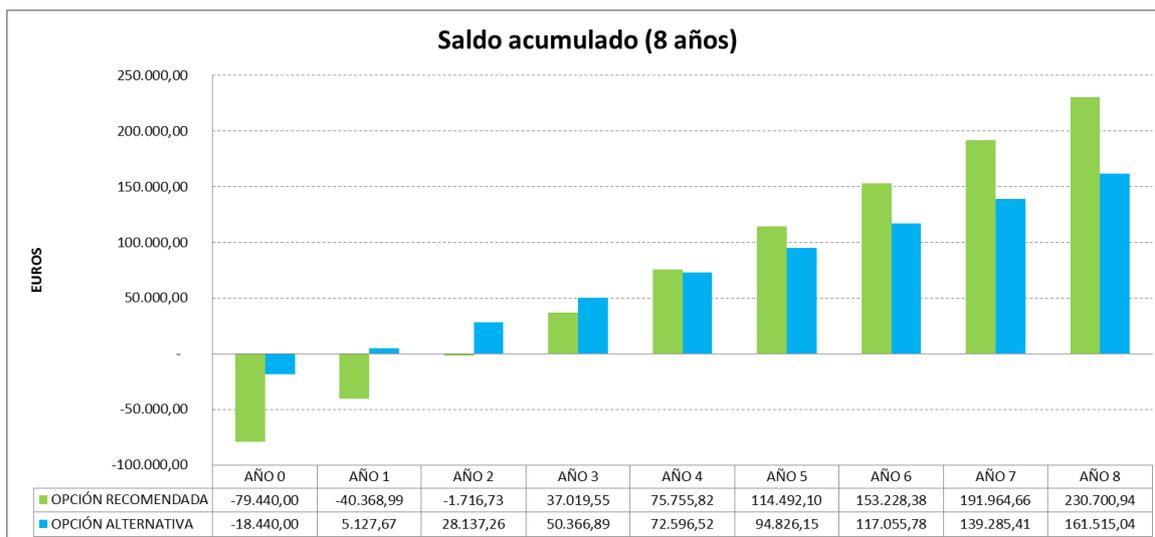


Figura 62: Gráfico del ahorro total acumulado en 8 años de ambas alternativas para los dos grupos de alternativas

El primer grupo de alternativas supone mayores inversiones y también mayores ahorros, mientras que el segundo grupo requiere menos esfuerzo en la inversión inicial, pero el ahorro energético obtenido tras el periodo de explotación es del orden de un tercio inferior al de la primera alternativa.

Para la elección del grupo de alternativas recomendado, un requisito indispensable es la capacidad de inversión que tenga el operador existente en la EDAR. Para determinar la mejor alternativa se supone que existe capital de inversión suficiente, por lo que no va a ser una limitación, en caso de que existiese habría que actuar en función del capital disponible. Por lo tanto, y teniendo en cuenta la premisa indicada, para un periodo de ocho años de concesión del servicio de explotación de la presente EDAR estudiada se recomienda instalar variadores de frecuencia en las tres bombas de cabecera existentes, sustituir la soplante para el tratamiento biológico de émbolos rotativos por un equipo de levitación electromagnética más eficiente y sustituir los difusores existentes por unos de membrana de alta eficiencia que suponen un mayor ahorro energético.

Se puede decir además, extrapolando para cualquier EDAR de aireación prolongada que, para un periodo de ocho años de explotación, se recomienda instalar variadores de frecuencia en cada bomba de cabecera existente (si las hay) e instalar soplantes y difusores para el tratamiento biológico de alta eficiencia, ya que es el apartado de la planta donde más energía se consume.

VII.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Del trabajo realizado en el presente Trabajo Fin de Máster quedan evidentemente, muchas parcelas que pueden ser objeto de estudio de futuros trabajos de investigación, que incluyan otras mejoras que garanticen un mayor ahorro energético en una EDAR.

En el apartado IV del presente proyecto ya se citan muchas de las mejoras energéticas llevadas a cabo en depuradoras a corto y a largo plazo. En futuras líneas de investigación, se podrían plantear todas estas posibles mejoras y estudiarlas de forma similar o con mediciones in-situ en las plantas, de forma que se obtenga un comparativo de inversiones vs ahorro energético para cada mejora.

A continuación, se indican algunas de las mejoras que potencialmente podrían conseguir mayores ahorros, planteables en futuros trabajos:

- Realizar un estudio más amplio optimizando, tal y como se ha hecho en este trabajo, que incluya los máximos procesos y los consumos de cada uno de los equipos pormenorizadamente. Para mayor exactitud, es necesario realizar mediciones de consumo reales, energía calorífica por pérdidas de los equipos, etc. Eligiendo las mejores alternativas inversión VS ahorro energético.
- El sistema de control sobre todo en aireación es una medida muy importante para conseguir reducir el consumo energético. Actualmente, existen sistemas con sondas mucho más potentes y fiables para realizar un control más exacto de los nitratos vertidos, y por lo tanto ajustar al máximo en función de las condiciones de vertido (como por ejemplo sistema ATL, Nipho Control, Sistema ACN+, ADEX, lógica difusa, etc.)
- Sobre todo en depuradoras convencionales, sería muy interesante realizar estudios de cara a crear EDAR autosuficientes energéticamente, transformando la energía calorífica de los fangos (biogás y biomasa), utilizando energías renovables como apoyo, etc. Así como, reutilizando los residuos finales generados.
- Realizar un estudio de tarifas eléctricas, para reducir el gasto en energía eléctrica consumiendo lo máximo posible en horas valle, y lo mínimo en horas punta.

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

GENERAL

- 1) *Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A.* (2002) Introducción a los tratamientos de aguas, Editorial UPV
- 2) *Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A.* (1992) Tratamientos físicos y químicos de aguas residuales, Editorial UPV
- 3) *Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Agua* (2010). Versión preliminar del Plan Nacional de Reutilización de Aguas
- 4) *Morenilla, J.J.* (2.011). Sistemas de control y optimización del consumo energético en EDAR publicación “Tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras” del Ministerio de Medio Ambiente - CEDEX
- 5) *Ministerio de Industria. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)* (julio 2011) Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011 – 2020 y anexos
- 6) *Ministerio de Industria. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).* (julio 2010) Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua
- 7) *Martínez Muro, J.L.*, Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (EPSAR) (2013) Memoria de Gestión del año 2012
- 8) *Aguado Alonso, J.*, (2009) Eficiencia energética en los sistemas de aireación de procesos de fangos activados, publicado por la Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables

EFICIENCIA BOMBEOS

- 9) *López Jiménez, A., López Patiño, G.*, (2014) Apuntes del Curso de estaciones de bombeo: la instalación hidráulica y eléctrica (UPV)
- 10) *www.schneider-electric.com*, (2013) Soluciones de eficiencia energética con variación de velocidad
- 11) *es.grundfos.com/*, (2013) Manual de bombeo de aguas residuales
- 12) *www.bombasideal.com/*, (2013), Datos técnicos de hidráulica de bombas

EFICIENCIA EN SOPLANTES

- 13) *www.sulzer.com*, (2013) Catálogo turbocompresor Turbocompresor HST 20
- 14) *www.aerzen.es* (2013) Catálogo soplantes émbolos rotativos
- 15) *Castell, D., García Ventoso, M., Tormos Fibla, I., Ferrer, C., Morenilla, J.J., Bernacer, I., Basiero, A.* (2011) Revista Tecnología del Agua. Artículo técnico: Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías
- 16) *Simón Andreu, P., Lardín Mifsut, C., Abellán Soler, M.*, (2012) Revista Ingeniería Civil 168. Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia
- 17) *Generalitat de Catalunya. Institut Català d'Energia*, (2011) Aplicación del programa de ahorro y eficiencia energética en las instalaciones de saneamiento de aguas residuales de Cataluña

MEJORA EN DIFUSORES

- 18) *Seoane, J.M., López, P., Mesa, R., Matas E., Ponsoda J.M., Rancaño A., Trillo I.* (2009) Limpieza de difusores con ácido fórmico, como herramienta de optimización de un sistema de aireación, en la EDAR de Palma del Río
- 19) *Collado, S., Simón, P., Lardín, C., Abellan, M., Polo, M., Rancaño, A., Laca, A., Díaz, M.* (2012) Transferencia de oxígeno en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales: I.- Necesidades energéticas y suministro de oxígeno
- 20) *www.acciona-agua.es/*, (2013) Optimización energética del tratamiento biológico de la EDAR de Ceutí, control de la aireación mediante un sistema de control adaptativo predictivo experto (ADEX)
- 21) *www.xylemwatersolutions.com/scs/spain/*, (2013) Sistemas de aireación de Alta Eficiencia por burbujas fina de Sanitaire