

Índice

1. Introducción	3
2. Resumen.....	8
2.1. Compendio.....	9
2.2. Objetivos.....	9
2.3. Síntesis de los trabajos.....	10
□ Ensayo 1. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase I: Control de las mejores condiciones de operación.	10
□ Ensayo 2. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase II: Reducción de las necesidades de aire y rediseño de la instalación de aireación biológica.	11
□ Ensayo 3. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase III: Implementación de un Sistema de Control Integral de la Etapa de Aireación en el Proceso Biológico de Lodos Activados y el Reactor Biológico de Membrana.....	12
2.4. Discusión y Conclusiones.	13
3. Summary.....	18
3.1. Compendium.....	19
3.2. Objectives.	19
3.3. Synthesis of the works.	20
□ Study 1. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase I: Control of the best operating conditions.	20
□ Study 2. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase II: Reduction of air needs and redesign of the biological aeration installation.	21
□ Study 3. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase III: Implementation of an Integral Control System of the Aeration Stage in the Biological Process of Activated Sludge and the Membrane Biological Reactor.....	22
3.4. Discussion and Conclusions.	23

4. Artículos publicados	27
4.1. Referencia completa de los artículos.....	28
4.2. Aportaciones del doctorando en las publicaciones incluidas en la presente tesis doctoral.	30
5. Apéndices	32
5.1. Comunicaciones a congresos derivadas de la presente tesis doctoral.	33
6. Agradecimientos	34

1.Introducción

1. Introducción.

La presente tesis doctoral por compendio consta de tres artículos científicos, publicados en revistas científicas internacionales e interdisciplinarias indexadas en el Journal Citation Reports (JCR 2019), en las categorías de *Environmental Sciences* (Revista Sustainability), *Water Resources-SCI* (Revista Water), e *Instruments & Instrumentation-SCIE* (Revista Sensors). Dichas revistas proporcionan un foro avanzado para los estudios relacionados con la sostenibilidad y el desarrollo sostenible, sobre la ciencia y tecnología del agua, incluyendo la ecología y la gestión de los recursos hídricos, y sobre la ciencia y la tecnología de los sensores, colaborando estrechamente con instituciones gubernamentales y no gubernamentales brindando un servicio que resulta necesario para la ciudadanía.

La evolución histórica en el diseño, operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales va desde un objetivo casi exclusivo de cumplir con los valores límite de descarga impuestos por la normativa para los contaminantes característicos de las aguas residuales urbanas, a introducir, de manera impuesta, en el proceso de diseño los conceptos de consumo energético, sostenibilidad y autosuficiencia como variables importantes.

Este nuevo enfoque para el tratamiento de las aguas residuales, junto con el aumento de la población y el endurecimiento en los requerimientos de las nuevas reglamentaciones para la calidad y el tratamiento de las aguas residuales experimentados en los últimos años, en cumplimiento de la Directiva Europea 91/271/CEE, ha aumentado el número de estaciones de tratamiento de aguas residuales (EDAR) y el interés en ampliar y modernizar las instalaciones existentes. Todo ello ha llevado a un aumento considerable en el consumo de energía en el sector, y por tanto un incremento en los costes de operación, y a crecientes presiones económicas, sociales y administrativas para mejorar la eficiencia energética de las instalaciones. Hay que tener en cuenta aspectos fundamentales tales como el aumento del precio de la electricidad en más del 50% en los últimos 10 años para los consumidores industriales en España, la alta dependencia energética en España y la Unión Europea con la necesidad de importar casi el 75% de la energía consumida, la lenta evolución del ahorro de energía en el sector de suministro y tratamiento de agua, las crecientes exigencias de los reguladores en cuanto a la calidad del agua recuperada

con tendencia a alcanzar niveles de agua potable que requieren la aplicación de tecnologías más complejas y avanzadas, y las exigencias de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. De acuerdo con lo anteriormente comentado, los esfuerzos de las administraciones públicas y las empresas operadoras se centran en conseguir la optimización de los procesos e instalaciones, para mejorar su economía.

En lo que respecta a las aguas residuales urbanas, los costos de la energía suponen más de un tercio de los costos de operación de la planta de tratamiento, correspondiendo el mayor consumo al proceso biológico y en concreto a la etapa de aireación del lecho microbiológico. Por esta razón, resulta fundamental prestar especial atención a la etapa de aireación en un proceso de optimización energética, concretamente a su operación, diseño y control.

Las experiencias desarrolladas, y en las que se basa el trabajo realizado, tienen lugar durante la dirección técnica de la EDAR de San Pedro del Pinatar (Murcia, España) de la doctoranda. Esta EDAR tiene una capacidad de tratamiento de 20.000 m³/día de aguas residuales, e incorpora un sistema de tratamiento biológico por fangos activos (FA) y un reactor biológico de membrana de ultrafiltración (MBR), con importante consumo energético desde su puesta en servicio (ratio energético de la instalación superior al 1,03 kW/m³). El 68% del consumo de energía en el tratamiento biológico por FA y el 53% del consumo de energía en el MBR lo representa la etapa de aireación de lecho biológico. Por esta razón, uno de los principales desafíos era lograr una reducción de los costes de operación en esta instalación, y dado los resultados de éxito conseguidos, se consideró muy interesante el realizar una metodología para la optimización energética de la etapa de aireación biológica aplicable a cualquier instalación de tratamiento de aguas residuales.

La metodología propuesta consta de tres fases diferenciadas de optimización según su alcance: proceso, instalación y sistema de control.

Cada fase se describe independientemente en un artículo científico, para facilitar la comprensión del usuario, dando lugar a un total de tres artículos que constituirían la presente tesis doctoral y que se enumeran a continuación:

1. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase I: Control of the Best Operating Conditions.

- Autores: Lozano, A.B., Del Cerro, F., Llorens, M.
- Fecha de publicación: Julio, 2019.
- Revista: Sustainability.
- Volumen: 11
- Páginas: 3919 - 3945
- Categoría del Journal Citation Reports (2019): Este artículo pertenece al número especial "Assessment of Novel Technologies for Improving Energy Efficiency and Waste Minimization". Este número especial pertenece a la sección de "Energy Sustainability" dentro de la categoría *Environmental Sciences*.
- Factor de impacto: 2.576
- Posición: 120/265
- DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su11143919>

2. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase II: Reduction of Air Requirements and Redesign of the Biological Aeration Installation.

- Autores: Lozano, A.B., Del Cerro, F., Llorens, M.
- Fecha de publicación: Abril, 2020.
- Revista: Water.
- Volumen: 12
- Páginas: 1143 - 1164
- Categoría del Journal Citation Reports (2019): Este artículo pertenece al número especial "Design, Operation and Economics of Wastewater Treatment Plan". Este número especial pertenece a la sección de "Wastewater Treatment and Reuse" dentro de la categoría *Water Resources*.
- Factor de impacto: 2.544
- Posición: 31/94
- DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w12041143>

3. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase III: Implementation of an Integral Control System for the Aeration Stage in the Biological Process of Activated Sludge and the Membrane Biological Reactor.
- Autores: Lozano, A.B., Del Cerro, F., Llorens, M.
 - Fecha de publicación: Agosto, 2020.
 - Revista: Sensors
 - Volumen: 20
 - Páginas: 4342 - 4360
 - Categoría del Journal Citation Reports (2019): Este artículo pertenece a la sección de “Chemical Sensors” dentro de la categoría *Instruments & Instrumentation Science*.
 - Factor de impacto: 3.275
 - Posición: 15/64
 - DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s20154342>

La metodología propuesta encaja perfectamente con el nuevo enfoque globalizado basado en el ahorro de energía, la sostenibilidad y la autosuficiencia antes comentado, y contribuye ampliamente con el cumplimiento de los objetivos establecidos por las Naciones Unidas para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fijados para 2030, así como, con las Estrategias Energéticas Europeas fijadas para los años 2020-2030.

2. Resumen

2. Resumen.

2.1. Compendio.

Los artículos que conforman la presente tesis doctoral abordan la recopilación de estudios y ensayos realizados en la EDAR de San Pedro del pinatar (Murcia, España) para conseguir la optimización energética de la etapa más demandante de energía en la EDAR, como es la aireación biológica y, con ello, la reducción de los costes de explotación globales.

Los procedimientos organizados y estructurados dan lugar a una metodología para la mejora de la eficiencia energética de la etapa de reacción biológica de cualquier instalación de tratamiento de aguas residuales, que se concreta en tres fases diferenciadas:

- La primera fase consistió en modificar los criterios de funcionamiento del sistema de tratamiento biológico de fangos activos y membranas de ultrafiltración para gestionar las necesidades de oxígeno del sistema.
- La segunda fase consistió en modificar las condiciones de funcionamiento de los equipos y sistemas de inyección de aire, y en adaptar la instalación de aireación a las condiciones reales de operación, para minimizar las necesidades de aireación y evitar sobreconsumos de energía.
- La tercera fase consistió en definir una nueva estrategia de control e implantación de un sistema de control del proceso, con la que minimizar las desviaciones entre los valores fijados como objetivo y los valores reales de los parámetros a controlar.

De esta forma, se redujeron los consumos energéticos de la instalación en más del 40%.

2.2. Objetivos.

Los objetivos generales de la investigación se establecieron:

- Reducir la demanda energética en la Estación de tratamiento de aguas residuales de San Pedro del Pinatar, para disminuir los costes de explotación y

mejorar su economía, y mejorar el funcionamiento y la estabilidad del proceso.

- Contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, principalmente con el ODS6 e indirectamente a los objetivos del ODS11, ODS12, ODS13, ODS14 y ODS15.

2.3. Síntesis de los trabajos.

En este apartado se recogen las síntesis de los tres ensayos realizados, que incluyen los objetivos, la metodología seguida y los resultados o conclusiones específicas de cada uno de ellos.

- **Ensayo 1. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase I: Control de las mejores condiciones de operación.**

El objetivo del primer trabajo fue minimizar en origen los requerimientos de oxígeno por parte de los microorganismos en el reactor biológico mediante la selección de las mejores condiciones de funcionamiento del reactor biológico. Para ello, se realizó un análisis inicial de la instalación y elementos principales que componen el sistema de aireación de fangos activos para detectar puntos críticos y/o susceptibles de mejora sobre los que actuar y, a continuación, se realizaron ensayos trabajando a distintas concentraciones de sólidos en suspensión totales en el licor mezcla (SSLM) en el reactor FA y ensayos con distintas edades de fango. Los resultados obtenidos permitieron establecer unas condiciones óptimas de trabajo marcadas por la mínima concentración de SSLM que admita el sistema, en función de la carga contaminante recibida, y una edad de fango función de la temperatura, adaptada a los rendimientos previstos.

Por último, se implementó un sistema automático de control para la consecución en el tiempo de las óptimas condiciones de funcionamiento. Por una parte, regulando en tiempo real la cantidad de lodo que debe purgarse del sistema en función de los sólidos en suspensión totales en el reactor FA, con el fin de mantener la edad mínima del lodo requerida para asegurar la nitrificación y la estabilidad del proceso biológico y, por otra

parte, mediante la regulación del flujo de recirculación de fango al reactor en función de los sólidos en suspensión totales medidos en los reactores FA y MBR, garantizando una relación de recirculación mínima para lograr la edad de fango recomendada y mantener una concentración en las cámaras de membranas que no sea demasiado excesiva para evitar la obstrucción y colmatación de las fibras de membranas.

De esta forma, se consigue ajustar correctamente la edad del fango en el sistema biológico con la que se controla la velocidad de degradación del sustrato, la concentración de SSLM y la producción de fango, variables relacionadas directamente con los requerimientos de oxígeno por parte de los microorganismos y el consumo energético. Los resultados obtenidos destacan la necesidad de implementar medidas de control en las instalaciones que garanticen las óptimas condiciones de trabajo en el reactor biológico.

➤ **Ensayo 2. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase II: Reducción de las necesidades de aire y rediseño de la instalación de aireación biológica.**

El segundo trabajo recoge los ensayos realizados para minimizar el caudal de aire que es necesario suministrar al reactor biológico y las pérdidas de carga en la instalación, con esto, minimizar los requerimientos de energía. Para ello:

- Se realizaron ensayos en el reactor biológico de la EDAR de San Pedro del Pinatar para mejorar la gestión de la eficiencia en la transferencia de oxígeno (SOTE) desde la fase gaseosa a la fase líquida utilizando una campana extractora *off-gas*. Con ello se consigue:
 - Determinar la edad y estado en el que se encuentran los inyectores de aire, y garantizar el reemplazo de las membranas deterioradas de los difusores.
 - Seleccionar las condiciones óptimas de trabajo de los inyectores de aire o difusores instalados en el reactor biológico (caudal y presión de aire).
 - Estudiar la influencia de las perturbaciones que produce la agitación durante la aireación biológica.
 - Determinar la densidad óptima de difusores a poner en servicio.
- Se llevaron a cabo pruebas hidráulicas para conocer la distribución del flujo en

el interior del reactor biológico mediante herramientas de modelización y simulación basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando el Ansys v13.0.

- Se abordó la reducción de las pérdidas de presión, mediante la limpieza de la línea de aire y difusores con ácido fórmico.
- Se implementó un sistema de control automático de la presión en la línea de aire, para optimizar las presiones de suministro de aire y mantenerlas bajo control en todo momento.
- Se rediseñó la instalación de aireación biológica para adaptarla a las condiciones reales de operación: optimizar la distribución de los flujos a lo largo del reactor biológico y eliminar caminos preferenciales, y adaptar el caudal de aire suministrado al óptimo requerido mediante la instalación de un nuevo equipo de producción de aire más eficiente energéticamente.

Las actuaciones llevadas a cabo consiguieron importantes reducciones en el caudal de aire requerido por los microorganismos en el reactor biológico y una minimización los requerimientos energéticos, pero implicaron inversiones considerables para modificar la instalación, al no ser posible alcanzar el mínimo consumo energético requerido sin abordarlas. Este hecho sugiere que, a la hora de diseñar las instalaciones de depuración, es fundamental adecuar la capacidad de los equipos a la demanda real del sistema, tener en cuenta la modularidad de la instalación, diseñar adecuadamente los sistemas de distribución de aire, etc.

- **Ensayo 3. Metodología para la optimización energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fase III: Implementación de un Sistema de Control Integral de la Etapa de Aireación en el Proceso Biológico de Lodos Activados y el Reactor Biológico de Membrana.**

El tercer trabajo recoge las actuaciones llevadas a cabo en la última fase de la metodología de optimización propuesta para conseguir el control total del proceso de aireación biológica en el reactor biológico FA y MBR, y la consecución en el tiempo de la mejor estrategia para la gestión del proceso e instalación de la aireación en la EDAR, con la que se alcancen los objetivos anteriores. Para ello, se diseñó una estrategia de

control y se implementó un sistema de regulación adaptativo predictivo experto apoyado en el registro de medidas realizadas por sensores estratégicamente instalados y algoritmos matemáticos basados en modelos.

El diseño del sistema de control de la aireación en el reactor biológico FA consistió en:

- Establecer ciclos de aireación fundamentados en la medida de la concentración de iones amonio (N-NH_4^+) y nitrato (N-NO_3^-) contenido en el agua.
- Fijar los criterios de ajuste de la concentración de oxígeno disuelto óptima demandada por los microorganismos en las zonas óxicas, para conseguir los niveles de calidad en el agua requerida en cuanto a concentración de amonio (N-NH_4^+) y nitrato (N-NO_3^-) fijados.
- Implantar los criterios de ajuste de la presión de trabajo en la línea de aire, para conseguir los niveles de oxígeno disuelto requerido en cada cámara de aireación biológica mediante la regulación automática de válvulas de regulación instaladas en la línea de aire.

Por otro lado, la regulación del caudal de aire inyectado en el biorreactor de membrana se basó en la medida del caudal de agua demandado para tratamiento y la regulación cíclica de válvulas automáticas de inyección de aire instaladas en cada casete de membranas de ultrafiltración.

En ambos casos, el sistema de control implementado es capaz de ajustar perfectamente los valores de los parámetros de control a los valores de consigna seleccionados.

Dado los resultados obtenidos, es importante destacar la necesidad de optimizar y abordar cuantas mejoras sean necesarias sobre el sistema de control de cualquier EDAR, ya que éste va a tener una influencia decisiva tanto en el aseguramiento de la calidad del agua obtenida como en la eficiencia energética, debido a que una de sus funciones primordiales es controlar cuando deben estar en marcha los equipos decisivos de proceso y más demandantes de energía.

2.4. Discusión y Conclusiones.

Habida cuenta de la importancia de la reducción energética en las EDARs y dado los resultados de éxito de la metodología propuesta que se ha aplicado para la optimización

del consumo de energía en la EDAR de San Pedro del Pinatar, y la sistemática que se ha seguido en otras instalaciones de depuración con excelentes resultados, se puede discutir y establecer conclusiones siguiendo el orden de las fases de la propuesta metodológica planteada:

FASE I: La mejora en los criterios de gestión del proceso de aireación en la EDAR de San Pedro del Pinatar, basada en seleccionar las condiciones óptimas de funcionamiento del reactor biológico, ha reducido en casi un 20% el consumo de energía en la EDAR, lo cual suponía un 38% de los costes de explotación según el estudio inicial de costes realizado.

La implementación de un sistema de control avanzado de caudal de fango purgado y recirculado contribuye a mantener las condiciones ideales de operación perseguidas, supone un ahorro adicional de energía, además de una gestión más eficiente de los procesos.

- El trabajar a una edad del fango recomendada función directa de la temperatura del reactor biológico, y siempre lo más baja posible y asegurando en todo momento la estabilización del fango biológico, permite un ahorro medio de energía del 7,75% al reducir los requerimientos de oxígeno del sistema en un 13%.
- La implementación de un sistema automático de control de la purga de fango en función de la edad de fango permite una gestión avanzada del proceso y le confiere estabilidad, al evitarse los excesos o defectos en el aporte de oxígeno requerido por los microorganismos al mantenerse en todo momento la concentración adecuada de microorganismos en el reactor biológico.
- La implementación de un sistema automático de control de la recirculación de fango al reactor biológico permite reducir la relación de recirculación en un 50%, lo que supone reducciones del consumo de energía en esta etapa cercanos al 50%, o lo que es lo mismo reducciones globales de energía en torno al 6-8%.
- Con la implementación de los sistemas de control se consigue a su vez ahorro energético por tarificación horaria, al ser posible mediante estos programas el desplazar el consumo energético asociado a las soplantes de aireación y bombes de fangos hacia las tarifas más económicas.

En resumen, partiendo de una instalación con valores de ratio energético superiores al

1,03 kWh/m³, se llega a resultados en torno a 0,83 kWh/m³, un ahorro de costes energéticos de más de 55.000 €/año y una reducción de las emisiones de CO₂ de unos 500 kg/año.

FASE II: El control de los parámetros que influyen directamente en la tasa de eficiencia en la transferencia de oxígeno (SOTE) y la pérdida de energía en el reactor biológico, tales como el caudal de aire inyectado, la pérdida de carga en la red de aire, etc., así como, el empleo de técnicas avanzadas de modelización de flujo dentro del reactor biológico con las que se consigue detectar y corregir deficiencias en la distribución y mezcla de fluidos, permite minimizar en más de un 3% el caudal de aire que es necesario suministrar al reactor.

Los ajustes globales conseguidos en el caudal de aire requerido por los microorganismos en el reactor biológico precisan el rediseño de la instalación de aireación. La incorporación de un nuevo equipo de aireación adaptado a las necesidades reales ofrece unos ahorros máximos de energía en torno al 33%, además de suponer reducciones en los costes de mantenimiento y un aumento en la fiabilidad de la instalación de aireación.

Con todo ello, partiendo de una instalación con nivel de optimización medio, con valores de partida de la relación energética en torno a 0,83 kWh/m³ se consiguen valores en torno a 0,66 kWh/m³, lo que supone una reducción en los requerimientos de energía en el reactor en torno al 20%.

Si se tiene en cuenta que los valores originales del ratio energético de la instalación eran de 1,03 kWh/m³, se acumula un ahorro de costes de explotación de casi 104.000 €/año y una reducción de las emisiones de CO₂ de unos 950 kg/año.

FASE III: La estrategia de control implementada basada en un control de oxígeno disuelto independiente para cada zona de aireación del reactor, con señales de consigna diferentes por zonas y entre reactores, y con regulación de válvulas en una línea del reactor que no afecta al resto del sistema permite:

- Operar con las dos líneas de reactores en marcha, lo que ofrece significativas ventajas desde el punto de vista de explotación, al tener mayor capacidad de actuación frente a un imprevisto, y desde el punto de vista de ahorro energético, al disminuir las pérdidas de carga y la eficacia en la transferencia de oxígeno.

- Una adecuada selección de las consignas de oxígeno puede permitir aumentar la eficacia en la transferencia de oxígeno del sistema. De la misma forma, es fundamental una adecuada consignación de los valores de presión en el colector para que éstos sean lo más bajos posibles y, de esta forma, se minimicen los requerimientos de aire y, por lo tanto, la demanda energética. Seleccionadas adecuadamente las consignas, el sistema de control puede lograr la aireación óptima mediante un ajuste continuo de la apertura de las válvulas y la velocidad de rotación de las soplantes.
- El sistema de control propuesto permite ajustar perfectamente los valores de los parámetros de control a los valores de consigna seleccionados, lo que se traduce en un mejor control del proceso, una mayor estabilidad y ahorros globales de energía.
- Los resultados de explotación obtenidos en cuanto a rendimientos de eliminación de amonio y nitratos en el agua efluente, aseguran valores en el agua de salida de la EDAR inferiores a 1,5 mg/L N-NH₄⁺ y 1–3 mg/L N-NO₃⁻, considerablemente más bajos que los exigidos en la normativa de aplicación. Los rendimientos de depuración de la EDAR se han mantenido y no se han visto afectados negativamente por la implantación de los sistemas de control de la aireación para los tratamientos biológicos FA y MBR. El efluente está libre de sólidos y patógenos, con una producción de agua de calidad óptima para su reutilización.
- El sistema de control implementado para el sistema de aireación de FA, ha permitido afianzar las reducciones energéticas previstas en la fase I y fase II, constatando los resultados de un ahorro energético de más del 20%, conseguido principalmente por control exhaustivo de los procesos de nitrificación y desnitrificación, y por ajuste de la aireación hacia las tarifas eléctricas más económicas.
- Un adecuado control del proceso de aireación del sistema MBR ha permitido reducir los consumos de energía de la planta en más de un 9,3%, al producirse importantes reducciones en el flujo de aire de limpieza de las membranas con la instalación de un variador de velocidad en una de las soplantes y al individualizarse la inyección de aire en cada tren de membranas.

El desarrollo completo de la metodología para la optimización propuesta ha permitido

lograr una reducción de más del 40% en el consumo total de energía de la instalación alcanzando valores finales del ratio energético en torno a 0,61 kWh/m³, lo que supone un ahorro en los costes de explotación de 118.041 €/año y una reducción de las emisiones de CO₂ de unos 1.078 kg/año. Esta estrategia de trabajo resulta ser muy compatible con las políticas energéticas europeas que promueven el ahorro de energía y el desarrollo sostenible.

En términos globales se puede considerar que para un sistema de tratamiento determinado y unas características del agua de entrada, la demanda de consumo de energía eléctrica es fija, no obstante, existen otros condicionantes que agravan esta línea base de consumo energético en las instalaciones, como son: dimensionado de planta y equipos electromecánicos, diseño, criterio de operación seleccionado por el explotador de la EDAR, el mantenimiento realizado a los equipos, el sistema de control implementado, etc. Por esta razón, la metodología de optimización propuesta se aplica a cualquier instalación de depuración contribuyendo en mayor o menor porcentaje a minimizar la discrepancia entre la demanda de energía necesaria para alcanzar los objetivos de calidad exigidos y el consumo real de energía, que debe de ser el objetivo para la correcta gestión de una instalación de depuración.

3. Summary

3. Summary.

3.1. Compendium.

The articles which make up this doctoral thesis deal with the compilation of studies and tests carried out at the WWTP in San Pedro del Pinatar (Murcia, Spain) in order to achieve the energy optimization of the most energy-demanding stage at the WWTP, such as biological aeration and, with it, the reduction of overall operating costs.

The organized and structured procedures give rise to a methodology for improving the energy efficiency of the biological reaction stage of any wastewater treatment facility, in three different phases:

- The first phase consisted in modifying the operating criteria of the biological treatment system for activated sludge and ultrafiltration membranes to manage the oxygen requirements of the system.
- The second phase consisted in modifying the operating conditions of the air injection equipment and systems, and in adapting the aeration installation to the real operating conditions, to minimize the aeration needs and avoid energy overconsumption.
- The third phase consisted of defining a new control strategy and implementing a process control system, with which to minimize the deviations between the target values and the actual values of the parameters to be controlled.

In this way, the energy consumption of the installation was reduced by more than 40%.

3.2. Objectives.

The general objectives of the research were established:

- Reduce the energy demand at the San Pedro del Pinatar Wastewater Treatment Plant, to reduce the operating costs and improve its economy, and to improve the operation and stability of the process.
- Contribute to the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDG), mainly with the SDG6 and indirectly to the objectives of the SDG11, SDG12, SDG13, SDG14 and SDG15.

3.3. Synthesis of the works.

This section contains the summaries of the three trials carried out, which include the objectives, the methodology followed and the specific results or conclusions of each of them.

➤ **Study 1. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase I: Control of the best operating conditions.**

The aim of the first work was to minimize the oxygen requirements of the microorganisms in the biological reactor by means of the selection of the best operation conditions of the biological reactor. For this purpose, an initial analysis of the installation and main elements that compose the activated sludge aeration system was carried out in order to detect critical points and/or susceptible of improvement on which to act, and then tests were carried out working at different concentrations of total suspended solids in the mixed liquor (MLSS) in the active sludge reactor (AS) and tests with different sludge ages. This leads to optimal working conditions marked by the minimum concentration of MLSS that allows the system, depending on the pollutant load received, and a sludge age depending on the temperature, adapted to the expected performance. Finally, an automatic control system was implemented to achieve optimal operating conditions over time. On the one hand, by regulating in real time the amount of sludge to be purged from the system as a function of the total suspended solids in the AS reactor, in order to maintain the minimum sludge age required to ensure nitrification and the stability of the biological process, and on the other hand, by regulating the sludge recirculation flow to the reactor according to the total suspended solids measured in the AS and MBR reactors, ensuring a minimum recirculation ratio to achieve the recommended sludge age and to maintain a concentration in the membrane chambers that is not too excessive to avoid clogging and clogging of the membrane fibers.

In this way, it is possible to correctly adjust the sludge age in the biological system with which the rate of degradation of the substrate, the concentration of MLSS and the sludge production, variables directly related to the oxygen requirements by the microorganisms and the energy consumption, are controlled. The results obtained highlight the need to

implement control measures in the facilities to ensure optimal working conditions in the biological reactor.

➤ **Study 2. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase II: Reduction of air needs and redesign of the biological aeration installation.**

The second work includes the tests carried out to minimize the air flow that needs to be supplied to the biological reactor and the pressure losses in the installation, thus minimizing energy requirements. For this purpose:

- Tests were carried out in the biological reactor of the WWTP of San Pedro del Pinatar to improve the management of the oxygen transfer efficiency at standard condition (SOTE) from the gas phase to the liquid phase using an off-gas extractor hood. This achieves:
 - Determine the age and condition of the air injectors and guarantee the replacement of the deteriorated membranes of the diffusers.
 - Select the optimal working conditions of the air injectors or diffusers installed in the biological reactor (air flow and pressure).
 - Study the influence of the disturbances produced by the agitation during biological aeration.
 - Determine the optimal density of diffusers to be put into service.
- Hydraulic tests were carried out to know the flow distribution inside the biological reactor by means of modeling and simulation tools based on computational fluid dynamics (CFD) using Ansys v13.0.
- The reduction of pressure losses was addressed by cleaning the air line and diffusers with formic acid.
- An automatic airline pressure control system was always implemented to optimize air supply pressures and keep them under control.
- The biological aeration facility was redesigned to adapt it to the real operating conditions: optimizing the distribution of the flows along the biological reactor and eliminating preferential paths, and adapting the air supply to the required optimum by installing new, more energy-efficient air production equipment.

The actions carried out achieved significant reductions in the air flow required by the microorganisms in the biological reactor and a minimization of energy requirements, but involved considerable investment to modify the installation, as it was not possible to achieve the minimum energy consumption required without addressing them. This fact suggests that, when designing the purification installations, it is fundamental to adapt the capacity of the equipment to the real demand of the system, to take into account the modularity of the installation, to adequately design the air distribution systems, etc.

➤ **Study 3. Methodology for energy optimization in wastewater treatment plants. Phase III: Implementation of an Integral Control System of the Aeration Stage in the Biological Process of Activated Sludge and the Membrane Biological Reactor.**

The third work includes the actions carried out in the last phase of the proposed optimization methodology to achieve full control of the biological aeration process in the AS and MBR biological reactor, and the achievement in time of the best strategy for process management and aeration installation in the WWTP, with which the previous objectives are achieved. To this end, a control strategy was designed, and an adaptive predictive expert regulation system was implemented, supported by the recording of measurements made by strategically installed sensors and mathematical algorithms based on models.

The design of the aeration control system in the AS biological reactor consisted of:

- Establish aeration cycles based on the measurement of the concentration of ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ions contained in the water.
- Set the criteria for adjusting the optimum dissolved oxygen concentration demanded by the microorganisms in the oxic zones, in order to achieve the required water quality levels in terms of ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentration.
- Implement the criteria for adjusting the working pressure in the air line, in order to achieve the levels of dissolved oxygen required in each biological aeration chamber by means of the automatic regulation of regulation valves installed in the air line.

On the other hand, the regulation of the air flow injected in the membrane bioreactor was based on the measurement of the water flow demanded for treatment and the cyclic regulation of automatic air injection valves installed in each ultrafiltration membrane cassette.

In both cases, the implemented control system can perfectly adjust the values of the control parameters to the selected set points.

Given the results obtained, it is important to highlight the need to optimize and address as many improvements as necessary to the control system of any WWTP, as this will have a decisive influence both on ensuring the quality of the water obtained and on energy efficiency, given that one of its primary functions is to control when the decisive process and most energy-demanding equipment should be in operation.

3.4. Discussion and Conclusions.

Given the importance of energy reduction in the WWTPs and given the successful results of the proposed methodology that has been applied for the optimization of energy consumption in the WWTP of San Pedro del Pinatar, and the systematic approach that has been followed in other treatment facilities with excellent results, it is possible to discuss and establish conclusions following the order of the phases of the proposed methodology:

PHASE I: The improvement in the management criteria of the aeration process in the WWTP of San Pedro del Pinatar, based on selecting the optimum operating conditions of the biological reactor, has reduced the energy consumption in the WWTP by almost 20%, which was 38% of the operating costs according to the initial cost study carried out.

The implementation of an advanced control system for the flow of purged and re-circulated sludge contributes to maintaining the ideal operating conditions sought, and represents additional energy savings, as well as more efficient management of the processes.

- Working at a recommended sludge age as a direct function of the biological reactor temperature, and always as low as possible and ensuring the stabilization of the biological sludge at all times, allows an average energy saving of 7.75%

by reducing the system's oxygen requirements by 13%.

- The implementation of an automatic control system for the sludge purge according to the sludge age allows an advanced management of the process and confers stability to it, by avoiding the excesses or defects in the oxygen supply required by the microorganisms by maintaining at all times the adequate concentration of microorganisms in the biological reactor.
- The implementation of an automatic system for controlling the recirculation of sludge to the biological reactor allows the recirculation ratio to be reduced by 50%, which means reductions in energy consumption at this stage of around 50%, or in other words, overall energy reductions of around 6-8%.
- With the implementation of the control systems, energy savings are also achieved through the tariff system, as it is possible through these programs to displace the energy consumption associated with the aeration blowers and sludge pumps towards the more economical tariffs.

In summary, starting from an installation with energy ratio values higher than 1.03 kWh/m³, results are reached around 0.83 kWh/m³, an energy cost saving of more than 55,000 euros/year and a reduction of CO₂ emissions of about 500 kg/year. PHASE II: The control of the parameters that directly influence the efficiency rate in the transfer of oxygen (SOTE) and the loss of energy in the biological reactor, such as the injected air flow, the pressure drop in the air network, etc., and the use of advanced flow modeling techniques within the biological reactor with which it is possible to detect and correct deficiencies in the distribution and mixing of fluids, allows minimizing the air flow that is necessary to supply the reactor by more than 3%.

The global adjustments achieved in the air flow required by the microorganisms in the biological reactor require the redesign of the aeration installation. The incorporation of new aeration equipment adapted to the real needs offers maximum energy savings of around 33%, as well as reductions in maintenance costs and an increase in the reliability of the aeration installation.

With all this, starting from an installation with an average optimization level, with starting values of the energy ratio around 0.83 kWh/m³, values around 0.66 kWh/m³ are achieved, which means a reduction in the energy requirements in the reactor of around 20%.

If it is considered that the original values of the energy ratio of the installation were 1.03 kWh/m³, a saving in operating costs of almost 104,000 euros/year and a reduction in CO₂ emissions of about 950 kg/year are accumulated.

PHASE III: The control strategy implemented based on an independent dissolved oxygen control for each aeration zone of the reactor, with different set point signals per zone and between reactors, and with valve regulation in one line of the reactor that does not affect the rest of the system allows:

- Operate with both reactor lines running, which offers significant advantages from an operational point of view, as it has a greater capacity to act in the event of an unforeseen event, and from an energy saving point of view, as it reduces pressure losses and oxygen transfer efficiency.
- An adequate selection of oxygen set points can allow an increase in the efficiency of the system's oxygen transfer. In the same way, it is fundamental to have an adequate setting of the pressure values in the collector so that these are as low as possible, and in this way the air requirements and, therefore, the energy demand are minimized. Once the setpoints have been properly selected, the control system can achieve optimum aeration by continuously adjusting the valve opening and the blower rotation speed.
- The proposed control system allows perfect adjustment of the control parameter values to the selected set points, resulting in better process control, increased stability, and overall energy savings.
- The operating results obtained in terms of ammonium and nitrate removal performance in the effluent water, ensure values in the WWTP output water below 1.5 mg/L NH₄⁺-N and 1-3 mg/L NO₃⁻-N, considerably lower than those required by the applicable regulations. The purification performances of the WWTP have been maintained and have not been negatively affected by the implementation of the aeration control systems for biological treatments AS and MBR. The effluent is free of solids and pathogens, with a production of water of optimal quality for reuse.
- The control system implemented for the AS aeration system, has managed to consolidate the energy reductions foreseen in phase I and phase II, confirming the results of an energy saving of more than 20%, achieved mainly by exhaustive

control of the nitrification and denitrification processes, and by adjustment of the aeration towards the most economic electrical tariffs.

- An adequate control of the aeration process of the MBR system has allowed to reduce the energy consumption of the plant by more than 9.3%, as important reductions in the cleaning air flow of the membranes have been achieved with the installation of a variable speed drive in one of the blowers and by individualizing the air injection in each membrane train.

The complete development of the methodology for the proposed optimization has made possible to achieve a reduction of more than 40% in the total energy consumption of the installation, reaching final values of the energy ratio of around 0.61 kWh/m³, which means a saving in operating costs of 118,041 euros/year and a reduction in CO₂ emissions of around 1,078 kg/year. This working strategy turns out to be very compatible with the European energy policies that promote energy saving and sustainable development.

In global terms, it can be considered that for a given treatment system and some characteristics of the input water, the demand for electrical energy consumption is fixed. However, there are other conditioning factors that aggravate this base line of energy consumption in the installations, such as: dimensioning of the plant and electromechanical equipment, design, operating criteria selected by the operator of the WWTP, the maintenance carried out on the equipment, the control system implemented, etc. For this reason, the proposed optimization methodology is applied to any treatment facility contributing in a greater or lesser percentage to minimize the discrepancy between the energy demand required to achieve the required quality objectives and the actual energy consumption, which should be the objective for the proper management of a treatment facility.

4. Artículos publicados

4. Artículos publicados.

4.1. Referencia completa de los artículos.

▪ **Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase I: Control of the Best Operating Conditions.**

- Revista: Sustainability
- Abstract: Abstract: Most purification systems work correctly from the point of view of water quality; purification, like any industrial process, must also be carried out with a minimization of costs. The overall project examined the potential benefits of using a recommended methodology for process evaluation and energy optimization in the aeration stage of activated sludge in the biological reactor at wastewater treatment plants (WWTP), which accounts for more than 44% of total operating costs. This energy control methodology encompasses the process, the installation and the control system. These three phases are examined in separate articles to make it easier to guide the user in the arduous task of optimizing energy of the WWTP from start to finish. This article focuses on Phase I of the methodology, the stage in charge of selecting the correct variables to control the best process conditions in the activated sludge system of the WWTP. Operating conditions that are a function of the recommended sludge age are influenced by exogenous factors such as temperature. The implementation of a real-time control system of the selected process variables, adapted to the needs, achieves reductions in the overall energy consumption of the installation, in this phase alone, of more than 15%, by reducing the oxygen requirements of the system and the recirculation ratios.
- URL: <http://dx.doi.org/10.3390/su11143919>

- **Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase II: Reduction of Air Requirements and Redesign of the Biological Aeration Installation.**
 - Revista: Water
 - Abstract: Phase I of the proposed energy optimization methodology showed how the selection of best management criteria for the biological aeration process, and the guarantee of its control at the wastewater treatment plant (WWTP) in San Pedro del Pinatar (Murcia, Spain) produced reductions of around 20% in energy consumption by considerably reducing the oxygen needs of the microorganisms in the biological system. This manuscript focused on phase II of this methodology, which describes the tools that can be used to detect and correct deviations in the optimal operating points of the aeration equipment and the intrinsic deficiencies in the installation, in order to achieve optimization of the oxygen needs by the microorganisms and improve the efficiency of their transfer from the gas phase to the liquid phase. The objectives pursued were: (i) to minimize the need for aeration, (ii) to reduce the pressure losses in the installation, (iii) to optimize the air supply pressures to avoid excessive energy consumption for the same airflow, and (iv) to optimize the control strategy for the actual working conditions. The use of flow modeling and simulation techniques, the measurement and calculation of air transfer efficiency through the use of off-gas hoods, and the redesign of the aeration facility at the San Pedro del Pinatar WWTP were crucial, and allowed for reductions in energy consumption in Phase II of more than 20%.
 - URL: <http://dx.doi.org/10.3390/w12041143>

- **Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase III: Implementation of an Integral Control System for the Aeration Stage in the Biological Process of Activated Sludge and the Membrane Biological Reactor.**
 - Revista: Sensors

- Abstract: The proposed methodology for optimizing energy efficiency, based on good management of the aeration process through the implementation of an appropriate control strategy, achieved reductions of more than 40% in energy consumption at the San Pedro del Pinatar Wastewater Treatment Plant (WWTP) (Murcia, Spain). Phases I and II of this methodology managed to reduce the oxygen needs of the microorganisms in the biological system, optimize the efficiency of oxygen transfer to the biological reactor and redesign the installation to correct abnormal energy loss situations. In addition, we established the basis for Phase III, which implemented a control strategy to achieve stable values close to the setpoints of the fundamental operating parameters of the aeration process. The control system is based on the measurements recorded by strategically installed sensors and mathematical algorithms based on models, achieving an expert adaptive-predictive system that regulates aeration both in the biological stage by activated sludge and the aeration of the installed ultrafiltration membrane system. The objectives were: (i) to achieve automatic execution of the best management strategy; (ii) to reduce the energy demand; (iii) to improve the operation and stability of the process; (iv) to reduce operating costs; and (v) to contribute to the fulfillment of the sustainable development objectives.
- URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s20154342>

4.2. Aportaciones del doctorando en las publicaciones incluidas en la presente tesis doctoral.

Dña. Ana Belén Lozano Avilés, doctoranda bajo el Programa de doctorado en Química básica y aplicada, expone que su labor en los siguientes artículos científicos ha sido:

- **Lozano, A.B.**; Del Cerro, F.; Llorens, M. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase I: Control of the Best Operating Conditions. Sustainability, 2019, 11, 3919 - 3945.
- Contribución del Autor en las tareas de: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, búsqueda bibliográfica, tratamiento de datos,

preparación del borrador original para la publicación y revisión del escrito para edición.

- **Lozano, A.B.;** Del Cerro, F.; Llorens, M. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase II: Reduction of Air Requirements and Redesign of the Biological Aeration Installation. *Water*, 2020, 12, 1143 - 1164.
 - Contribución del Autor en las tareas de: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, búsqueda bibliográfica, tratamiento de datos, preparación del borrador original del escrito y revisión del escrito para edición.
- **Lozano, A.B.;** Del Cerro, F.; Llorens, M. Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase III: Implementation of an Integral Control System for the Aeration Stage in the Biological Process of Activated Sludge and the Membrane Biological Reactor. *Sensors*, 2020, 20, 4342 - 4360.
 - Contribución del Autor en las tareas de: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, búsqueda bibliográfica, tratamiento de datos, preparación del borrador original del escrito, revisión y edición del manuscrito, y visualización.

5. Apéndice

5. Apéndices.

5.1. Comunicaciones a congresos derivadas de la presente tesis doctoral.

Lozano, A.B.; Llorens, M.; Del Cerro, F. Metodología para la optimización energética en instalaciones de depuración de aguas residuales. IV Jornadas Doctorales, 05/2018. Escuela Internacional de Doctorado, Universidad de Murcia, Murcia (España). Póster

Lozano, A.B.; Llorens, M.; Del Cerro, F. Optimización energética de la etapa de aireación en reactores biológicos. IV Encuentro de Ingeniería de la Energía del Campus Mare Nostrum. Congreso Interdisciplinar de Jóvenes Investigadores, 09/2018. Facultad de Químicas, Universidad de Murcia, Murcia (España). Comunicación oral

Lozano, A.B.; Llorens, M.; Del Cerro, F. Metodología para la optimización energética en instalaciones de depuración de aguas residuales: Implementación de la Estrategia de control. II Congreso Interdisciplinar de Jóvenes Investigadores, 10/2018. Facultad de Educación, Universidad de Murcia, Murcia (España). Póster

Lozano, A.B.; Llorens, M.; Del Cerro, F. Reduction of air requirements and redesign of the biological aeration system. I Symposium on Chemical and Physical Sciences for Young Researchers, 10/2020. Facultad de Químicas, Universidad de Murcia, Murcia (España). Aceptado para su presentación como póster

6. Agradecimientos

6. Agradecimientos.

Los ensayos que conforman la presente tesis doctoral fueron posibles gracias al equipo de operadores que conforman la plantilla de explotación de esta instalación (Juan, Bartolo, Jose María, Jose Carlos, Paco, etc.). A todos estos profesionales les agradezco su apoyo, sus aportaciones e ideas, sus enseñanzas y por hacer posible el trabajo en equipo. ¡Nunca olvidaré las experiencias vividas!

Mi sincero agradecimiento a los miembros de la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (ESAMUR), y especialmente a D. Pedro J. Simón Andreu, director técnico del ESAMUR, por permitir el uso de toda la información obtenida en los ensayos llevados a cabo para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Pedro del Pinatar, información que ha sido crucial para la realización de esta tesis.

A mis directores, Dra. Mercedes Llorens Pascual del Riquelme y Dr. Francisco del Cerro Velázquez, por confiar en mi dándome la oportunidad de iniciar y terminar con éxito este nuevo reto, sin cuyo esfuerzo, implicación y colaboración no hubiera sido posible.

A mis amigas y amigos por vuestra compañía, cariño y apoyo, ayudándome a desconectar de los quehaceres y obligaciones del día a día.

A mi familia, especialmente a mis padres, hermanas, cuñados y preciosas sobrinas, parte indispensable de mi vida y mi ejemplo a seguir en todo momento, por su apoyo incondicional, por quererme, ayudarme y darme fuerzas en todo momento.

A Jose Luís, que es la suerte a mi lado, por tu sonrisa incondicional a pesar de los momentos difíciles y por tu amor infinito y sincero, que son las pilas que energizan mi mecanismo. Gracias por motivarme y ayudarme a ser la mejor versión de mí misma.

Y no quiero olvidar a nuestra perra Kira, fiel e incondicional compañera en largas sesiones de escritura.

A todos, GRACIAS, porque sin vosotros esta tesis no hubiera sido posible.