



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y NUCLEAR
MASTER EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

**MODELADO DEL PROCESO DE
ULTRAFILTRACIÓN EN UN
BIORREACTOR DE MEMBRANAS
UTILIZANDO REDES NEURONALES**

TESIS FINAL DE MASTER

AUTORA:

Yeny Minery Carreño Martínez

DIRECTORES:

Dr. José Antonio Mendoza Roca

Dr. José Marcial Gozávez Zafrilla

Valencia, Diciembre de 2009

Tabla de contenido

1. Introducción	4
2. Objetivos	7
3. Antecedentes	8
3.1 Introducción	8
3.2 Evolución histórica de los MBR	10
3.3 Mercado actual y proyecciones	11
3.3.1 Motivación para la implementación de la tecnología de biorreactores de membrana	14
4. Biorreactores De Membrana	15
4.1 Generalidades	15
4.2 Tecnología de membranas	17
4.2.1 Membranas: definición y estructura	17
4.2.2 Materiales y configuración de las membranas	18
4.2.3 Aplicaciones industriales de la UF	20
4.2.3.1 Recuperación de pinturas electroforéticas	20
4.2.3.2 Aplicación al tratamiento de residuos de fluidos de corte acuosos	20
4.2.3.3 Aplicación en la industria láctea	21
4.2.3.4 Aplicación en la industria textil	21
4.2.3.5 Aplicación en la industria de la pulpa y el papel	22
4.2.3.6 Otras aplicaciones en la industria alimentaria	22
4.2.3.7 Ultrafiltración en las industrias farmacéutica, electrónica y petroquímica	23
4.3 Modos de operación en un MBR	23
4.4 Procesos biológicos en la depuración de aguas con fangos activos	24
4.4.1 Microbiología	24
4.4.2 Evolución de los microorganismos	25
4.5 Fundamentos del diseño y operación del proceso de fangos activos	26
4.5.1 Eliminación de materia orgánica	26
4.5.2 Parámetros de diseño	28
4.5.2.1 Carga másica	28
4.5.3 Edad del fango	28
4.5.4 Índice volumétrico de de fangos	29

5. Redes Neuronales Artificiales	30
5.1 Generalidades	30
5.2 Neurona Artificial.....	30
5.3 Red Neuronal Perceptrón Multicapa (RNPM)	32
5.3.1 Algoritmo del aprendizaje supervisado	32
6. Metodología	34
6.1 MBR piloto.....	34
6.1.1 Descripción general.....	34
6.1.2 Características del módulo y las membranas.....	36
6.1.3 Reactivos químicos	36
6.1.4 Estrategia de operación.....	37
6.1.5 Instrumentación.....	38
6.1.6 Análisis de laboratorio	38
6.2 Modelado del Proceso de Ultrafiltración.....	39
7. Resultados Y Discusión.....	43
7.2.1 Rendimiento del proceso biológico y evolución de la PTM	43
7.2.2 Construcción y estudio de la RNA 1	48
7.2.3 Construcción y estudio de la RNA 2	53
8. Conclusiones	55
9. Bibliografía	56

1. INTRODUCCIÓN

El papel fundamental del agua en las actividades humanas y la contaminación antropogénica del recurso hídrico como consecuencia de la incorporación de las aguas residuales a las fuentes de abastecimiento, ha generado desde épocas antiguas el desarrollo de sistemas de almacenamiento, transporte y tratamiento tanto para aguas potables como para aguas de desecho. Los indicios históricos atribuyen a la antigua Grecia la implementación de las primeras técnicas de purificación rudimentarias como son la filtración y el uso de lagunas de aireación [1].

Por otro lado, la correlación entre el agua contaminada y las enfermedades quedó firmemente establecida con la epidemia del cólera de 1854 en Londres. De esta manera la protección de la salud pública fue el propósito original del control de la contaminación presente en el agua. No obstante, en la actualidad, la conservación y protección de los recursos hidráulicos son preocupaciones adicionales [2].

De acuerdo con su procedencia, las aguas residuales se clasifican en urbanas e industriales y su composición está determinada en función de las características presentes en cada población o industria de donde proviene. En particular el agua residual urbana contiene distintos elementos contaminantes entre los cuales se destaca la materia orgánica presente principalmente en las aguas domésticas. Estos compuestos de naturaleza reductora consumen oxígeno y pueden encontrarse de forma coloidal o disuelta. Adicionalmente existe la presencia de elementos de naturaleza inorgánica, desde nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, hasta sustancias tóxicas y peligrosas. La descarga de este tipo de vertidos puede originar problemas medioambientales muy severos. Por ejemplo, la presencia de materia orgánica junto con nutrientes, (nitrógeno y fósforo) puede provocar alteraciones en la microbiota de un sistema, llegándose a producir la eutroficación del medio.

En la actualidad el proceso de fangos activos ocupa un lugar importante en la depuración de las aguas residuales [3]. El fundamento teórico del sistema de fangos activos se basa en la eliminación de la materia orgánica intensificando los procesos biológicos naturales de biodegradación y bioacumulación. Mediante estos procesos la materia orgánica es mineralizada o asimilada por los diferentes grupos microbianos responsables del proceso depurador, para eliminarla posteriormente del agua mediante sedimentación. En la Figura 1 se muestra el esquema general del proceso [6].

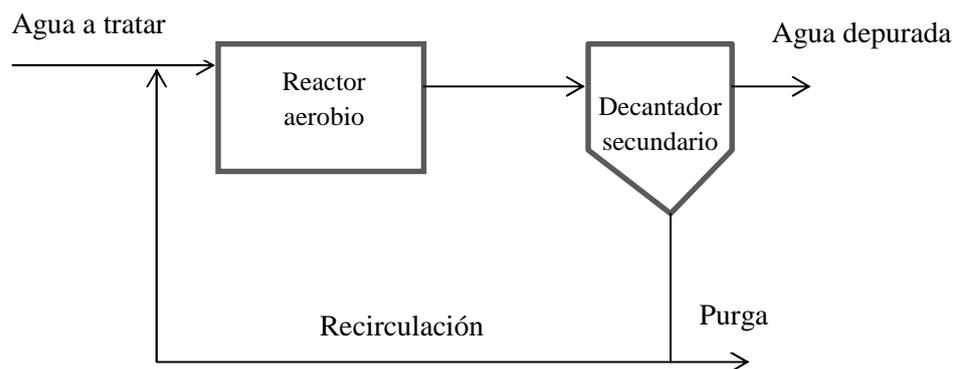


Figura 1. Esquema general del proceso de fangos activos

Debido a la creciente exigencia en el tratamiento de aguas residuales tanto urbanas como industriales y de las necesidades de reutilización, los trabajos de investigación en este campo han estado dirigidos a nuevos sistemas de tratamiento biológicos que sustituyan o aumenten la capacidad de los convencionales sistemas de fangos activos. La sustitución del decantador secundario por un sistema de filtrado constituido por módulos de membranas da lugar al biorreactor de membrana (MBR). La tecnología MBR presenta un gran potencial en el campo de la reutilización debido a la alta calidad de su efluente, libre de bacterias y sólidos. Sin embargo, el alto costo de las membranas y los problemas de ensuciamiento son las principales desventajas para la comercialización e implementación del proceso a gran escala [4].

Los factores que afectan el ensuciamiento de las membranas han sido identificados y clasificados en cuatro grupos: los materiales de las membranas, las características de la biomasa, las características del agua residual y las condiciones de operación. Sin embargo, las complejas interacciones entre estos aspectos dificultan el entendimiento del fenómeno y por tanto el control del proceso [7][8].

El ensuciamiento de la membrana en un MBR es debido a la interacción entre el fluido y la membrana, así un aumento en la presión transmembranal (PTM) evidencia el fenómeno. Al entrar en contacto la membrana con la suspensión biológica se origina la deposición de biosólidos originando una disminución en la carga hidráulica. El ensuciamiento debido a la biopelícula formada en la superficie de la membrana es un ensuciamiento reversible que puede ser recuperado mediante procesos físicos, como contralavados periódicos. Por otro lado, el ensuciamiento debido a la adsorción de la materia disuelta orgánica e inorgánica en el interior de los poros de la membrana y el bloqueo de estos poros debido a la adsorción es considerado un ensuciamiento irreversible que solo puede ser recuperado mediante limpiezas químicas [9].

Por otro lado, los métodos de control de procesos basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA) han experimentado un importante auge en los últimos años gracias a su capacidad para aprender la dinámica de sistemas no lineales. Estos métodos permiten

obtener un modelo de los mismos sin necesidad de disponer de un sistema de ecuaciones que lo represente. Los modelos matemáticos obtenidos a partir de RNAs se caracterizan por su robustez, capacidad de aprendizaje, generalización y tolerancia a fallos. Aplicaciones de RNA para la predicción del ensuciamiento en diversos procesos de membranas se encuentran documentados en la literatura [10][11][12][13].

Así, para éste trabajo de investigación se aborda la predicción de la PTM en un MBR con membranas planas sumergidas susceptibles a contralavados. Este proceso de predicción se realiza utilizando una Red Neuronal Perceptrón Multicapa (RNPM) de tres capas, lo cual permite reducir las unidades y el tiempo de procesamiento. La capacidad de interpolación y extrapolación de las estructuras de las RNAs propuestas utilizando diferentes conjuntos de variables de entrada y datos de operación, son evaluadas analizando los coeficientes de correlación obtenidos para cada topología.

Finalmente y para facilitar la lectura de este documento, los objetivos de esta investigación se presentan en el siguiente capítulo. Una breve introducción a las desventajas referentes al fenómeno de ensuciamiento de las membranas en los MBR, así como la evolución histórica y perspectivas de estos sistemas se describe en el capítulo 3. Por otro lado, en el capítulo 4 y 5 se hace referencia a los fundamentos teóricos de la tecnología MBR y las RNAs. Por último, la metodología, los resultados y las conclusiones de esta investigación se presentan en los capítulos 6, 7 y 8, respectivamente.

2. OBJETIVOS

Los objetivos generales planteados en este trabajo de investigación son los siguientes:

- Modelar el proceso de ultrafiltración en un MBR utilizado para el tratamiento de agua residual urbana utilizando redes neuronales
- Estudiar el potencial de las redes neuronales como herramienta de modelización de este tipo de sistemas

En concreto se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el rendimiento del proceso biológico a través del rendimiento de eliminación de la materia orgánica del agua residual urbana una planta piloto MBR
- Estudiar la evolución de la PTM durante la operación, analizando la incidencia de cada una de las variables de entrada sobre esta variable.
- Determinar estructuras de RNAs más apropiadas para modelar el comportamiento del sistema experimental estudiado

3. ANTECEDENTES

3.1 Introducción

En la actualidad, la tecnología de fangos activos en sus distintas modalidades (convencional, contacto-estabilización, aireación prolongada, etc.), es el método de depuración más ampliamente aplicado a nivel mundial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas [3]. En términos generales esta tecnología consiste en un flóculo biológico compuesto de una gran cantidad de microorganismos (bacterias, levaduras, hongos, algas, protozoos, rotíferos, nemátodos y crustáceos), el cual permanece suspendido en el agua residual mediante agitación o aireación, y es responsable de la eliminación de compuestos contaminantes, principalmente de la materia orgánica carbonosa. La eficacia del proceso biológico depende de dos factores primordiales, la concentración de biomasa en el reactor y la velocidad específica de crecimiento de los microorganismos [5][6].

A diferencia del tratamiento convencional que utiliza procesos de sedimentación para la separación de las fases sólido – líquido, en un MBR el agua depurada se somete a una filtración con membranas permitiendo la retención física tanto del flóculo biológico como de los sólidos en suspensión, dentro del reactor. Esta combinación de la tecnología de membranas con procesos de degradación biológica produce efluentes de alta calidad, clarificados y sustancialmente desinfectados [7]. Otras ventajas que ofrecen los MBRs sobre los tratamientos de aguas residuales convencionales incluyen, construcción de sistemas más compactos, operación del biorreactor con altas concentraciones de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (SSLM), baja producción de fangos, altas eficiencias de eliminación de materia orgánica, así como la reutilización de las aguas residuales tratadas [8].

De esta manera los sistemas MBRs se presentan como una opción atractiva para el tratamiento y reutilización de las aguas residuales urbanas e industriales. Esto se evidencia en el acelerado crecimiento de las inversiones en el mercado mundial para la construcción y aumento de capacidad de este tipo de plantas en la última década [7][8].

Sin embargo uno de los mayores inconvenientes del sistema que dificulta su rápida comercialización es el ensuciamiento de las membranas. Este fenómeno genera una disminución en el rendimiento del proceso de filtración, originando una reducción en el flujo de permeado al aumentar el tiempo de operación. La obstrucción de los poros ocasionada por la acumulación de partículas y materia soluble sobre y dentro de la estructura de la membrana, son las causas del ensuciamiento.

Por esta razón una mayor comprensión de los mecanismos de ensuciamiento, así como el desarrollo de métodos más efectivos para controlarlo y minimizarlo son factores

claves para aumentar la competitividad de esta tecnología en relación con los tratamientos convencionales [9][14].

Los recientes estudios sobre los mecanismos de ensuciamiento en un MBR indican que las características del fango tiene un papel fundamental en el ensuciamiento de la membrana. Conocer la dinámica de formación y acumulación de los EPS en la superficie de la membrana es importante para comprender el comportamiento del ensuciamiento en un MBR [15][16]. El término EPS es utilizado como un concepto general e integral de las distintas clases de macromoléculas tales como polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y otros biopolímeros que se han encontrado sobre o fuera de la superficie de la célula y en el espacio intercelular de los agregados microbianos [17]. Como consecuencia de la limitación para la transferencia de oxígeno que existe en la capa formada sobre la superficie de la membrana los microorganismos aeróbicos alojados en ella mueren provocando una liberación de EPS.

Los EPS solubles también llamados SMP se acumulan más fácilmente en la superficie de la membrana como resultado de la baja filtrabilidad del fango en suspensión. Geng y Hall (2007) observaron que el tamaño y distribución del flóculo así como las cantidades de SMP en el licor de mezcla fueron las propiedades más importantes que influyeron significativamente en la tendencia del lodo al ensuciamiento de la membrana, sin embargo el contenido de EPS no presentaba una asociación directa con este fenómeno [18].

Dada la compleja naturaleza de los lodos activados el comportamiento del ensuciamiento en un MBR es más complicado que en la mayoría de las aplicaciones de la tecnología de membranas.

Adicionalmente los parámetros de funcionamiento, como el tiempo de retención hidráulica (TRH), el tiempo de retención de sólidos (TRS), el oxígeno disuelto (OD) y la relación alimento/microorganismos (F/M) no tienen efecto directo sobre el ensuciamiento de la membrana; aunque si determinan las características del fango, por lo tanto la optimización de ellos puede modificar las características de los lodos activados (ver Figura 2).

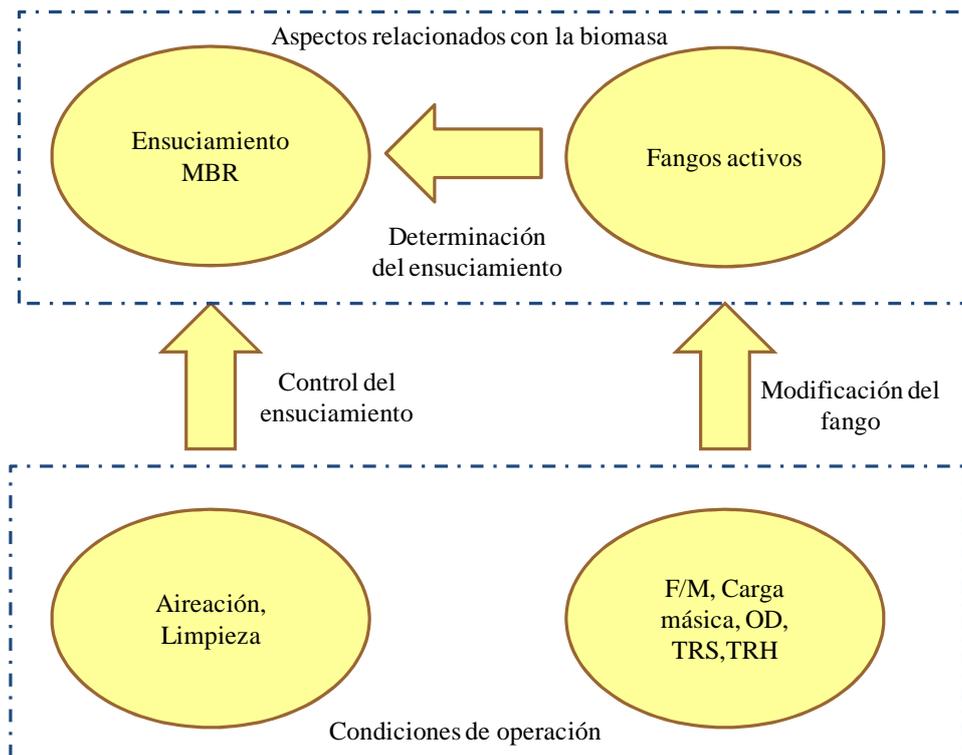


Figura 2. Esquema general de los factores que afectan el ensuciamiento y aquellos que pueden incidir en el control de un MBR (modificado Meng et al, 2009)

3.2 Evolución histórica de los MBR

La tecnología de filtración con membranas como reemplazo del decantador secundario en un proceso de fangos activados fue descrita por primera vez por Smith *et al*, a finales de la década de 1960s[19]. Paralelamente la compañía Dorr-Oliver desarrolló el primer sistema comercial de biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales denominado MST (por sus siglas en inglés Membrane Sewage Treatment). En este sistema el agua residual alimentada al biorreactor era después bombeada de forma continua a un módulo de UF.

En la década de 1970s la tecnología fue comercializada por primera vez en Japón a través de un acuerdo firmado entre las compañías Dorr – Oliver y Sanki Engineering Co LTDA. Para finales de los años 1980 la compañía norteamericana Thetford Systems, actualmente de Zenon Enviroment, lanzó al mercado su versión de un sistema con membrana externa para el tratamiento aeróbico de aguas residuales denominado Cycle-Let®. La firma Zenon Enviroment creada en 1980, a principios de la década de los 1990s desarrolló dos patentes, Zenon's sistema comercial y ZenonGem, para el tratamiento de aguas residuales con membranas sumergibles en el licor de mezcla [20].

En 1989 el gobierno japonés junto con una serie de importantes compañías y a través del programa *Aqua Renaissance* acuerda invertir en el desarrollo de un sistema que fuese compacto y que produjese un efluente de alta calidad, de manera que permitiese la reutilización del agua. La compañía Kubota desarrolló un sistema MBR; en el que una membrana plana estaba inmersa en el biorreactor.

A finales de 1980 Kazuo Yamamoto y sus colaboradores fueron pioneros en el desarrollo de los MBR con membranas sumergibles de fibra hueca [21]. En 1993 Zenon introduce en el mercado su primer módulo de fibra hueca ZeeWed®. En la actualidad la capacidad instalada acumulada de las compañías comercializadoras más importantes como son Zenon y Kubota se ha incrementado exponencialmente con la aparición de la nueva generación de biorreactores con módulos sumergible.

En Europa, la primera planta MBR a escala industrial para el de tratamiento de aguas residuales municipales se construyó en el año 1998 en Porlock (Reino Unido), seguida por las estaciones depuradoras de Büchel y Rödingen en Alemania (1999), y Perthes-en-Gâtinais en Francia (1999). Unos años más tarde, en el 2004, se instaló la planta considerada como la más grande del mundo en Kaarst, Alemania [22].

Actualmente, los sistemas de biorreactores de membrana son usados extensamente en Japón y varias compañías ofrecen esta tecnología el tratamiento y la reutilización del agua de diversos procesos industriales, principalmente en industrias alimentarias y de bebidas en las que son comunes valores elevados de DQO.

En resumen las primeras plantas MBR aparecieron en América del norte a finales de la década de 1970s y en Japón a principios de la década de los 1980s. La introducción en Europa del MBR aerobio se produjo a mediados de los años 1990.

En la actualidad existen más de 2200 plantas MBRs operando en diversas partes del mundo (Ver Figura 3) y muchas otras en fase de proyecto o de construcción. Los países en los que más se ha extendido esta tecnología son Japón y norte América.

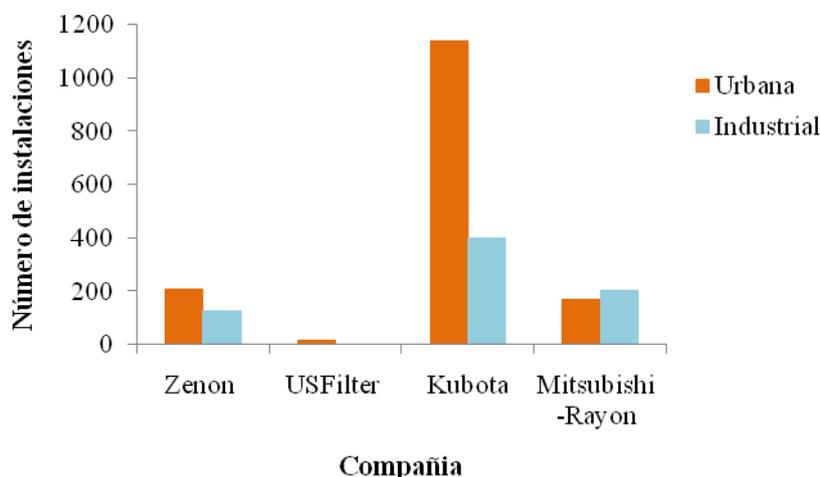


Figura 3. Instalaciones MBR a nivel mundial (modificado Yang et al, 2006)

3.3 Mercado actual y proyecciones

Informes de numerosos analistas indican que el mercado de MBR está experimentando un crecimiento acelerado, y se espera que se mantenga durante la próxima década. El mercado mundial se duplicó en un período de 5 años, desde 2000 hasta un valor de mercado de 217 millones de dólares en 2005, de un valor de alrededor de 10 millones de dólares para 1995. Las previsiones indican que para el año 2012 alcanzará los \$360

millones [23]. Como tal, esta rama está creciendo más rápidamente que el mercado para los equipos de tratamiento de aguas residuales avanzado y que los mercados de otros tipos de sistemas de membranas.

El mercado de los biorreactores de membrana para aplicaciones industriales fue pionero en la década de 1990, mientras que para usos urbanos solo inició su ascenso en 1999 (ver Figura 4). En 2002, el 85% de las instalaciones construidas fueron para aplicaciones industriales. Ambos sectores municipal e industrial presentaron un notable aumento en los años siguientes, correspondientes al éxito comercial y a las numerosas aplicaciones de la tecnología del MBR sumergido, el cual ofrece mucho menores costos de capital y de operación. En los posteriores tres años, la tasa de crecimiento del mercado fue lineal con al lo menos 50 unidades industriales y 20 plantas municipales construidas por año. Se espera que esta tasa de crecimiento se mantenga en los próximos años [22].

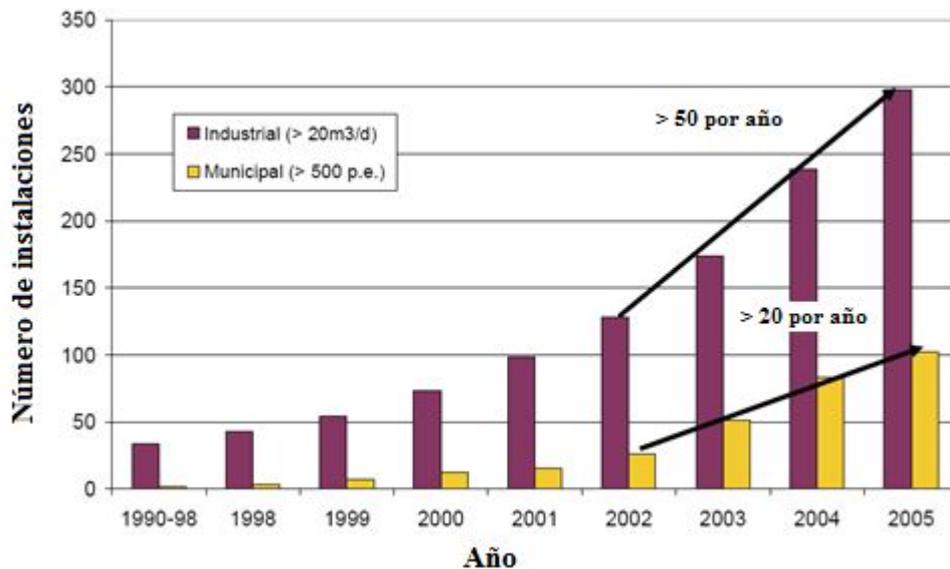


Figura 4. Comportamiento del mercado de MBRs para usos urbanos e industriales (modificado Lesjean, 2008)

En Europa, el mercado de MBR total para los usuarios de sistemas industriales y municipales ha tenido unos costes de € 25,3 millones en 1999 y € 32,8 millones en 2002. Para el año 2004 este mercado se valoró en 57 millones. En la actualidad el mercado europeo está dividido en partes aproximadamente iguales entre Reino Unido /Irlanda, Alemania, Francia, los países bajos y la Península Ibérica [7].

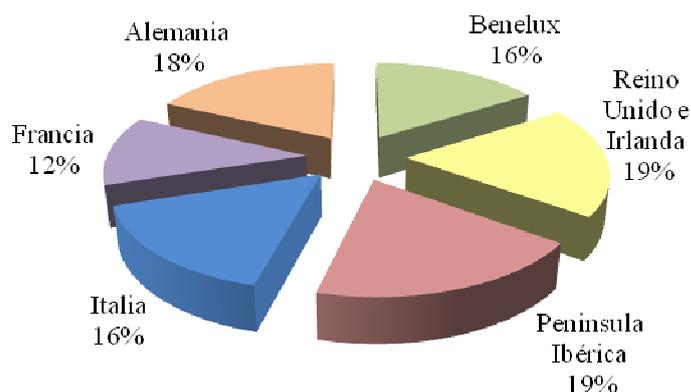


Figura 5. Mercado Europeo de los biorreactores de membrana. (Tomado de Judd, 2007).

En la Figura 6 se presenta el mercado de la UE en términos de los proveedores de sistemas de filtración de MBR. Este gráfico evidencia el predominio de los proveedores de Kubota (Japón) y Zenon (Canadá). Sus tecnologías basadas en módulos de filtración sumergidos han sido un éxito extraordinario desde 2002. En los últimos años, el mercado europeo puede ser visto como un cuasi duopolio de dos proveedores no europeos. En contraste con los exitosos sistemas MBR sumergidos en la década de 1990, las configuraciones proporcionadas por Wehrle, Norit X-Flow, Berghof, Rodia Orelis etc, no experimentan ningún crecimiento significativo en el mercado durante los últimos 3 años.

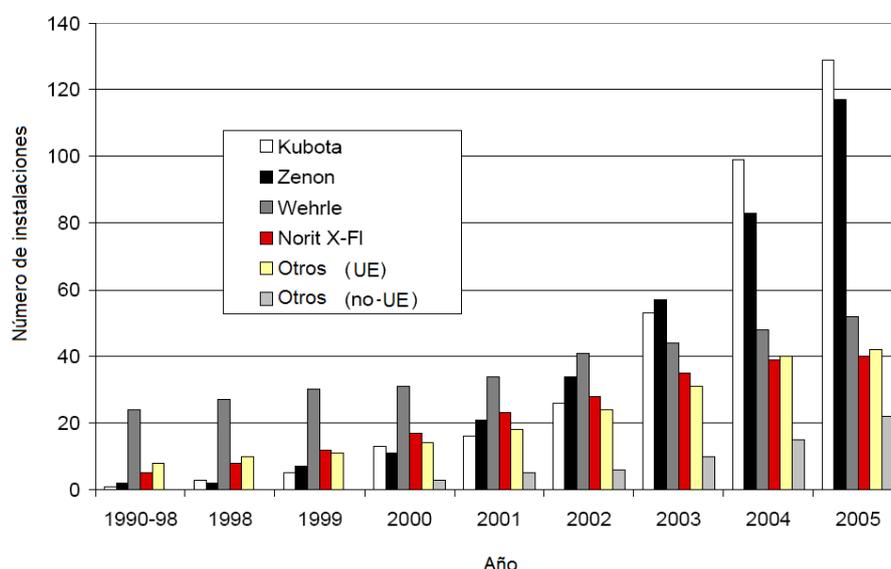


Figura 6. Distribución del mercado mundial de MBR por proveedor (modificado Lesjean, 2008)

Según estudios realizados por Lesjean y Huisjes (2008) el mercado industrial de los MBRs, citado en el documento *BREF* dentro de las mejores tecnologías disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) continuará su crecimiento con la construcción de 50 – 60 plantas por año con una capacidad promedio de 180 m³/d. En el tratamiento de aguas urbanas, aunque la madurez del mercado aún no se ha alcanzado, se espera también un aumento en el número y la capacidad de las plantas. Las plantas de tamaño medio (5000-20000 HE) seguirá siendo el foco de las inversiones para la próxima

década. La modernización de las plantas y la implementación de sistemas híbridos constituirán una parte importante de la demanda, especialmente en Europa central y oriental. Las directivas europeas para la reutilización de agua motivará el uso de MBR en el sur de Europa.

3.3.1 Motivación para la implementación de la tecnología de biorreactores de membrana

Dentro de los factores más importantes que influyen en el mercado de MBR en la actualidad se incluyen:

- a) una legislación más estricta que afecta tanto al tratamiento de aguas residuales urbanas como a los vertidos industriales.
- b) la escasez de agua local
- c) la introducción de incentivos estatales para promover la mejora de la tecnología para el tratamiento de aguas residuales, particularmente para la regeneración y reutilización del agua depurada
- d) reducción de los costes de inversión
- e) aumento en la confianza y la aceptación de la tecnología MBR

4. BIORREACTORES DE MEMBRANA

4.1 Generalidades

La integración de la tecnología de membranas con un reactor biológico da como resultado el sistema MBR. En el campo del tratamiento de aguas residuales hay tres tipos de reactores claramente diferenciables [20]:

1. De separación y retención de sólidos, comúnmente conocidos como reactores de filtración.
2. De aireación sin burbujas, también conocidos como reactores de difusión de gases o simplemente de aireación.
3. De extracción de contaminantes o extractivos.

Generalmente la tecnología de membranas se utiliza como método de sustitución de los procesos de sedimentación en los tratamientos convencionales de depuración, es decir, los sistemas de separación de sólidos, aunque también se puede emplear combinada o separadamente con otros sistemas para conseguir una mejora en la transferencia de gases (como en los aireadores de membrana) o para controlar la concentración de nutrientes y contaminantes en el reactor.

En el presente documento el término MBR hace referencia a los biorreactores de filtración.

En un MBR la membrana puede acoplarse al reactor biológico externamente o de forma interna, sumergiéndola en el propio reactor como se observa en la Figura 7 y la Figura 8.

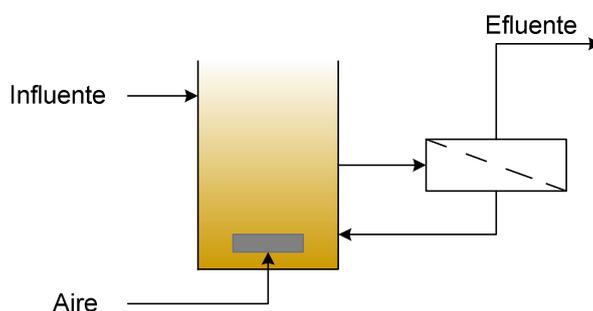


Figura 7. Biorreactor de membrana externa

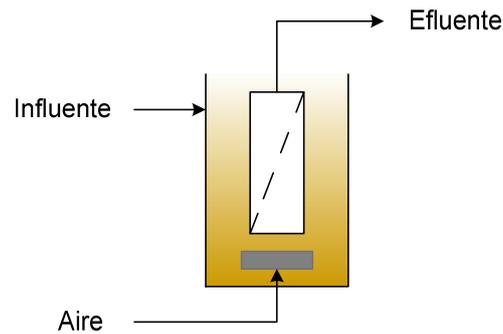


Figura 8. Biorreactor de membrana sumergida

En estos sistemas el afluente (agua a tratar) entra en el biorreactor donde entra en contacto con la biomasa y donde se producen, al igual que en el caso de los fangos activos, las reacciones biológicas que permiten la degradación de la materia orgánica. Posteriormente, tras un periodo de tiempo determinado (TRH) en el que el influente está en contacto con los microorganismos se hace pasar el licor de mezcla a través de una membrana, utilizando como fuerza impulsora la diferencia de presión.

El agua filtrada es descargada del sistema, y constituye el efluente, es decir, el agua depurada.

En el caso del biorreactor con membrana externa, el módulo se sitúa fuera del biorreactor. Debido a esto es necesario bombear el licor de mezcla al exterior del reactor biológico, y después del filtrado, el rechazo se retorna al sistema.

Por otro lado los biorreactores de membrana sumergida son aquellos en los que las membranas están situadas en el interior del biorreactor, en contacto directo con el licor de mezcla. Estos generalmente se encuentran equipados con un sistema de aireación ubicado justo debajo del módulo de membranas con el fin de suministrar aire necesario para el proceso biológico, para la homogenización del contenido del tanque y para la propia limpieza de la membrana.

Los biorreactores de membrana permiten obtener un alto rendimiento de depuración con una mínima producción de lodos. Es una tecnología flexible, lo cual constituye una ventaja debido a las grandes variaciones que presentan de las aguas residuales. Además, son sistemas compactos que permiten un notable ahorro de espacio con respecto a las plantas de fangos activos convencionales.

Como consecuencia de la implementación de membranas sumergidas en el biorreactor, el MBR permite trabajar a elevadas concentraciones de biomasa en el reactor (4-15 g SSLM/l), ya que el rendimiento de separación de biomasa y efluente es mucho mayor eliminando el proceso de recirculación. Otra de las ventajas que presentan estos sistemas es que la óptima calidad del efluente permite eliminar algunos procesos de desinfección o tratamientos terciarios.

4.2 Tecnología de membranas

4.2.1 Membranas: definición y estructura

Una membrana se puede considerar que es una barrera o película que permite la transferencia de determinados componentes de un medio al otro a través de ella y evita o restringe el paso de otros componentes.

El flujo de estas sustancias a través de la membrana está determinado por la fuerza impulsora aplicada. Esta fuerza impulsora puede ser debida a gradientes de concentración, presión, temperatura o potencial eléctrico.

La Tabla 1 recoge los distintos procesos de membrana, clasificándolos según la fuerza impulsora de la separación e incluyendo las abreviaturas con las que se suelen referir los procesos impulsados por la diferencia de presión.

Tabla 1. Fuerzas impulsoras en los procesos de membranas

Proceso	Fuerza impulsora	Flujo principal a través de la membrana
Ósmosis	Diferencia de concentración	Disolvente
Ósmosis inversa (OI) Nanofiltración (NF) Ultrafiltración (UF) Microfiltración (MF)	Diferencia de presión	Disolvente (permeado)
Diálisis	Diferencia de concentración	Sustancias disueltas
Electrodiálisis (ED)	Diferencia de potencial eléctrico	Sustancias iónicas
Permeación de gases	Diferencia de presión	Moléculas de gas

Por otro lado, la permeabilidad selectiva viene determinada por la medida de la partícula, la afinidad química con el material de la membrana y/o la movilidad de los componentes a través de la membrana (movimiento difusivo o convectivo).

Con relación a tamaño de poro las membranas que emplean la diferencia de presión como fuerza impulsora pueden ser clasificadas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las membranas

	Ósmosis inversa (OI)	Nanofiltración (NF)	Ultrafiltración (UF)	Microfiltración (MF)
Membranas	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica Asimétrica
Espesor	150 μm	150 μm	150 – 250 μm	10 – 150 μm
Capa superficial	1 μm	1 μm	1 μm	1 μm
Tamaño de poro	0.002 μm	0.002 μm	0.05 – 0.2 μm	0.2 – 5 μm
Rechazos	HMWC ¹ LMWC ² Cloruro, Sodio, Glucosa, Aminoácidos, Proteínas	HMWC ¹ Mono, di y oligo-sacáridos, aniones polivalentes	Macromoléculas ³ , proteínas, polisacáridos y virus	Partículas, bacterias
Material de membrana	⁴ CA capa delgada	CA capa delgada	Cerámica, ⁵ PSO, CA capa delgada, ⁶ PVDF	Cerámica, ⁷ PP, PSO, PVDF
Módulo de membranas	Tubular, enrolladas en espiral y planas	Tubular, enrolladas en espiral y planas	Tubular, enrolladas en espiral, fibra hueca y planas	Tubular, fibra hueca y planas
Presión de trabajo	15 – 150 bar	5 – 35 bar	1 – 10 bar	2 bar

¹HMWC- (compuestos de alto peso molecular); 100,000 a 1 millones de moles/g

²LMWC (compuestos de bajo peso molecular): 1,000 a 100,000 moles/g

³Macromoléculas: 1 millón moles/g

⁴CA- acetato de celulosa; ⁵PSO-polisulfona; ⁶PVDF- polivinil difluoruro; ⁷PP-polipropileno

4.2.2 Materiales y configuración de las membranas

Las membranas que se utilizan en los MBRs son de ultrafiltración y microfiltración, que en cuanto a su composición, cumplen los siguientes requisitos:

1. Inertes
2. Fáciles de limpiar y regenerar y deben ser resistentes a los agentes químicos y a las presiones y temperaturas elevadas.
3. Tener una distribución de poros uniforme y elevada porosidad
4. Neutras o presentar una carga negativa para evitar la adsorción de microorganismos
5. Duraderas y fáciles de sustituir

Principalmente existen dos tipos de materiales que suelen utilizarse en el tratamiento de aguas residuales, las membranas cerámicas y las poliméricas. Las membranas cerámicas suelen tener mayor estabilidad química, mecánica y térmica que las membranas poliméricas, sin embargo presentan son muy frágiles, por lo que la mayoría de las empresas que comercializan membranas destinadas a tratamiento de aguas residuales utilizan membranas poliméricas

Las membranas poliméricas de uso común en los biorreactores de membrana son las de polifluoruro de vinilideno (PVDF), polietersulfonas (PES), polietileno (PE) y polipropileno (PP). Estas membranas normalmente son hidrofílicas para evitar un ensuciamiento rápido de la membrana, aunque algunos de los materiales de fabricación son hidrofóbos, como pueden ser el PVDF y el PP, a los cuales se les aplica un tratamiento químico especial en su manufactura para garantizar que la superficie de la membrana sea hidrofílica.

Actualmente existen seis configuraciones principales en los procesos de membrana existiendo diferencias prácticas con beneficios y limitaciones distintas. Las configuraciones listadas a continuación están basadas en geometrías plana y cilíndrica.

1. Placa plana
2. Fibra hueca
3. Multitubular
4. Tubo capilar
5. Filtro de pliegues
6. Espiral

Los tipos de membranas más empleadas en los MBR son las de fibra hueca y placa plana (Figura 9). Aunque su geometría, hidrodinámica, configuraciones espaciales y propiedades mecánicas son distintas, los rendimientos obtenidos en estudios comparativos no presentan diferencias significativas entre ambas membranas en términos de eficiencias obtenidas.

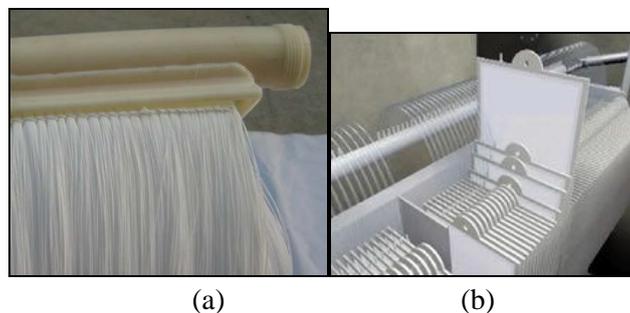


Figura 9. Principales configuraciones de membranas para MBR. Membranas de fibra hueca (a) y placa plana (b).

4.2.3 Aplicaciones industriales de la UF

Son muchas las industrias que han aplicado esta tecnología para el tratamiento de sus efluentes. A continuación se comentan las de mayor importancia.

4.2.3.1 Recuperación de pinturas electroforéticas

Se aplica en las industrias del automóvil y de los electrodomésticos. Los componentes pintados emergen del tanque de electropintado con un exceso de pintura que es retirado mediante un lavado. El agua de lavado, que contendrá 1-2% de pintura, es conducida de nuevo al tanque, diluyendo así la disolución original de pintura. La misma cantidad de disolución que es devuelta al tanque se pasa a través de un módulo de UF, reutilizando tanto el agua de lavado como la pintura.

Por otra parte, la ultrafiltración se aplica al agua residual de la última cámara de lavado de las piezas pintadas, de forma que se obtiene una corriente concentrada de pequeño caudal (el 20% del caudal de la alimentación), que podría ir a la zona de tratamiento de fangos, y otra diluida (el 80% del caudal de alimentación) que, tras ser tratada en la instalación de desmineralización, se aprovecharía reutilizándola en el proceso.

Se suelen utilizar tanto módulos tubulares como planos y membranas de acetato de celulosa o membranas de carácter catiónico de copolímero de poliacrilonitrilo.

4.2.3.2 Aplicación al tratamiento de residuos de fluidos de corte acuosos

La utilización de los fluidos de corte acuosos, denominados popularmente "taladrinas" en la industria del metal, está ampliamente extendida en los procesos de mecanizado, rectificado y laminado. Estos fluidos favorecen la efectividad de estas operaciones a través de una acción lubricante y refrigerante que provoca un aumento de la vida de la herramienta, un mejor acabado superficial de la pieza mecanizada y una evacuación de las virutas.

Los fluidos de corte, tras ser almacenados, en la cual se decantan las partículas, pasan posteriormente a un separador, donde se eliminan los aceites y grasas libres. Tras ello, el fluido se pasa a través de un filtro para eliminar las partículas que no hayan sedimentado. El filtrado es enviado a la unidad de UF, donde se realiza la separación de fases. La fase orgánica retorna al proceso y la fase inorgánica (permeado acuoso) es vertida. Cuando la fase orgánica ha llegado a una cierta concentración se envía a la zona de almacenamiento de concentrados, los cuales serán retirados por un gestor autorizado que podrá tratarlos en una planta de recuperación energética.

También se ha estudiado la aplicación de la ultrafiltración de efluentes generados en los trenes de laminación en frío de una industria siderúrgica, anteponiendo una etapa de coagulación-floculación a la de ultrafiltración, en la cual se utilizan membranas de polisulfona y poiletersulfona.

4.2.3.3 Aplicación en la industria láctea

Son numerosas las aplicaciones que se han encontrado de las membranas de UF en la industria láctea, pero la más importante se encuentra en la fabricación de queso.

Tradicionalmente el queso se obtiene transformando la leche en un gel mediante coagulación enzimática. El líquido intersticial del gel se exuda progresivamente por sinéresis. Durante este proceso se concentran los principales componentes del gel (grasas y proteínas) y el queso adquiere la forma y composición deseadas. Sin embargo, los fabricantes de quesos no controlan los factores de los que depende el drenaje del suero y los quesos tradicionales son heterogéneos en su composición, calidad y peso. Para eliminar esta heterogeneidad se ha de controlar la cantidad de agua, lactosa y minerales antes de la coagulación. Esto se realiza haciendo pasar la leche por membranas de UF. El concentrado es el líquido que se coagulará para la fabricación del queso y que tendrá prácticamente su misma composición.

Otras aplicaciones de la UF en la industria láctica son la producción de concentrados de proteínas de suero, concentración de leche en la granja para reducir costes de transporte, etc.

En estas aplicaciones alimentarias se tiende al uso de membranas inorgánicas, pues permiten trabajar con unas condiciones totalmente higiénicas, las cuales se exigen en la manipulación de alimentos.

4.2.3.4 Aplicación en la industria textil

En esta industria se utiliza la UF principalmente para la recuperación de productos de encolado y recuperación de colorantes.

a) Recuperación de productos de encolado.

Para aumentar el rendimiento de los telares y evitar roturas se encolan los hilos de urdimbre antes de tejer. Los productos de encolado recubren las fibrillas del hilo formando una fina película alrededor de la urdimbre. Una vez efectuada la operación de tisaje y antes de los procesos de tintura y acabado, los productos de encolado deben eliminarse del hilo.

El mayor campo de aplicación de las membranas en la industria textil actualmente es para recuperar estos productos de las aguas de la operación de desencolado. Los productos de encolado más utilizados son féculas, carboximetil celulosa (CMC), poliácridatos y alcohol de polivinilo (PVA). Todos estos productos se pueden recuperar por UF, sin embargo unos son más adecuados que otros para su reutilización.

b) Recuperación de colorantes.

La aplicación de membranas a la recuperación de colorantes que más éxito ha alcanzado es la recuperación del índigo. El índigo se emplea para teñir algodón para pantalones vaqueros en lo que se denomina tintura Denim.

Desde hace unos años existen industrias que recuperan el agua de lavado mediante UF con membranas orgánicas. Debido a que es un colorante con poco agotamiento, durante el lavado se pierde el 5-10% del colorante empleado en la tintura. Un ejemplo de aplicación exitosa lo proporciona T.I.A., industria perteneciente a U.C.O., el mayor grupo textil belga, que produce cerca del 25% de pantalones vaqueros del continente. Las pérdidas de índigo ascendían a 150000 kg/año. Esta industria ha sido la primera en recuperar el índigo con excelentes resultados.

4.2.3.5 Aplicación en la industria de la pulpa y el papel

En la producción de celulosa por el proceso Kraft, la planta de blanqueo es la causante de los mayores problemas de contaminación. Esta operación tiene como objetivo eliminar la lignina residual de las suspensiones de celulosa por medio de la adición de cloro, bien sea en forma de Cl_2 o de ClO_2 . Como consecuencia de ello, se erige este proceso como fuente de sustancias organocloradas muy resistentes a la biodegradación.

Los compuestos fuertemente coloreados se concentran principalmente en la primera etapa de extracción de álcali. Este efluente puede ser tratado con membranas de ultrafiltración. Sin embargo, para eliminar la mayor parte de sustancias organocloradas se ha de recurrir a la NF, ya que debido a su tamaño no pueden ser retenidas por las membranas de UF. El emplear una técnica u otra será función del rendimiento de eliminación de organoclorados requerido.

La NF desplaza también a la UF cuando se sustituye el empleo de cloro por el ozono (O_3). El ozono es un oxidante muy potente, dando como productos de oxidación sustancias de menor peso molecular que las obtenidas a partir de la cloración, con lo cual la separación de esas sustancias del baño residual se habrá de realizar con membranas de NF.

4.2.3.6 Otras aplicaciones en la industria alimentaria

La deshidratación de algunos productos alimenticios puede ser llevada a cabo por UF a costes más bajos que los que ocasionarían los métodos tradicionales, tales como la evaporación o el secado por congelación, y además sin la pérdida de compuestos aromáticos volátiles o del deterioro en aromas que a menudo acompaña a los métodos de concentración por evaporación.

Otra aplicación concreta de la ultrafiltración en la industria alimentaria la encontramos en el sector vinícola. En concreto, mediante ultrafiltración se consigue regular la concentración de polifenoles sin variar la concentración de azúcares. Este es un problema de gran interés industrial en el caso del vino blanco.

4.2.3.7 Ultrafiltración en las industrias farmacéutica, electrónica y petroquímica

En la industria farmacéutica una aplicación muy aprovechable de la UF es el aislamiento, concentración y purificación de sustancias activas biológicamente tales como enzimas, virus, proteínas específicas y ácidos nucleicos.

Otra aplicación interesante es la filtración estéril de agua, disoluciones usadas en transfusiones intravenosas o en la preparación de productos farmacéuticos. Una aplicación similar es la producción de agua ultralimpia usada en la industria de semiconductores.

Tanto para la eliminación de virus en particular como para la desinfección del agua en general la UF compite con la MF.

La aplicación de la UF para la recuperación de látex de las aguas residuales de plantas químicas se ha estudiado recientemente. El tratamiento de emulsiones de látex residuales permite no sólo un control de la contaminación sino también la recuperación de un valioso subproducto. En concreto, se obtuvieron buenos resultados con membranas de poliacrilonitrilo (PAN) sintetizadas en el laboratorio de investigación de los referidos autores.

También se ha llevado a cabo la ultrafiltración micelar de fenol mediante membranas orgánicas. El fenol, debido a su tamaño, no puede ser separado por ultrafiltración. Por medio de tensioactivos se puede conseguir la formación de micelas que hacen posible la separación del fenol.

4.3 Modos de operación en un MBR

En cuanto al modo de operación en los procesos de membrana, existen dos formas de realizar el filtrado: trabajar a PTM constante, o a un caudal constante. Si se trabaja a presión constante el caudal que se puede filtrar a través de una misma superficie de membrana disminuirá a medida que la membrana sufre un ensuciamiento.

De otro modo, al trabajar caudal constante al producirse el ensuciamiento de la membrana irá a aumentando la PTM.

Lo recomendable es trabajar a caudal constante, lo que es igual a mantener una carga hidráulica constante, debido a que si el sistema se opera a PTM constante se podrá llegar a un nivel de ensuciamiento tal que puede dejar de ser recuperable con las limpiezas químicas. Por otro lado cuando la condición de trabajo es caudal constante las limpiezas pueden ser programadas en función del ensuciamiento de la membrana que es directamente proporcional al aumento de la PTM, evitando así un ensuciamiento irreparable, alargando la vida útil de la membrana.

4.4 Procesos biológicos en la depuración de aguas con fangos activos

4.4.1 Microbiología

Como ya se ha indicado, en la depuración biológica de aguas residuales intervienen diferentes tipos de microorganismos. Los más comunes que se pueden encontrar en los sistemas de fangos activos son:

- a. Rotíferos
- b. Protozoos
- c. Hongos
- d. Bacterias
- e. Algas
- f. Cianobacterias

Estos microorganismos consumen la materia orgánica del agua residual para utilizarla en sus reacciones metabólicas. Estas reacciones metabólicas pueden ser:

- Catabólicas: Son las reacciones metabólicas en las que sustancias complejas se transforman en otras sustancias más sencillas con la finalidad de obtener energía.
- Anabólicas: Son las reacciones metabólicas en las que se forman sustancias complejas a partir de otras más sencillas para producir nuevo material celular.

Según la naturaleza de las reacciones catabólicas con las que se sustentan, estas especies se pueden clasificar en:

- Autótrofos: Son aquellos capaces de sintetizar su alimento sin fuente orgánica de carbono. Para ello requieren agua, CO₂, sales minerales y energía. Dependiendo de cuál sea su fuente de energía se puede hablar de:
 - Fotosintéticos, si la obtienen de la luz solar.
 - Quimiosintéticos: si la obtienen por oxidación de materia inorgánica.
- Heterótrofos: Son aquellos que requieren una fuente orgánica de carbono para su desarrollo.

Según la forma en la que obtengan la materia orgánica se puede hablar de organismos:

- ✓ Holozoicos: Aquellos con aparato digestivo completo
- ✓ Saprófitos: Aquellos que absorben la materia orgánica directamente por su membrana celular. La mayoría de los microorganismos responsables de la depuración de las aguas son de este tipo.
- ✓ Parásitos: Su nutrición depende de otro ser vivo.

Otro criterio de clasificación de estos microorganismos es su relación con el oxígeno molecular. Según este criterio pueden ser:

- Aerobios: Aquellos que utilizan el oxígeno atmosférico.
- Anaerobios: Los organismos que se desarrollan en ausencia de oxígeno molecular.
- Facultativos: Aquellos capaces de vivir tanto en ausencia como en presencia de O₂.

De acuerdo a su nivel de desarrollo los microorganismos se pueden clasificar en:

- Organismos procariotas, poco desarrollados, sin membrana nuclear, y por lo tanto, sin núcleo celular diferenciado. Tienen un único cromosoma desnudo y carecen de orgánulos celulares ligados a membranas, como los cloroplastos o las mitocondrias.
- Organismos eucariotas, más evolucionados y más complejos, con un núcleo celular diferenciado.

4.4.2 Evolución de los microorganismos

El crecimiento de los microorganismos en el seno del reactor depende de múltiples factores. El control de estos factores se hace indispensable para mantener las poblaciones de microorganismos. Por regla general, la evolución de la población de microorganismos en el reactor sigue las siguientes fases que componen la curva de crecimiento que se repiten periódicamente:

- *Fase de retardo*: representa el tiempo requerido para que los organismos se aclimaten a las condiciones ambientales.
- *Fase de crecimiento logarítmico*: representa la capacidad de los microorganismos de procesar el sustrato.
- *Fase estacionaria*: la población permanece estacionaria. Las razones que se apuntan para este fenómeno son:
 1. Que los microorganismos han agotado el sustrato o nutrientes necesarios para el crecimiento.
 2. Que el crecimiento de nuevas células se nivela por la muerte de células viejas.
- *Fase de muerte logarítmica*: Durante esta fase, la tasa de muerte de bacterias excede la producción de células nuevas. Puede presentarse el fenómeno llamado lisis, según el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden con objeto de proporcionar alimento a las células existentes.

Las fases mencionadas hacen referencia a una única población de microorganismos. Sin embargo, las unidades de tratamiento biológico se componen de ecosistemas complejos con diferentes especies, cada una con su curva de crecimiento particular.

Estas especies de microorganismos están relacionadas entre sí de diversa manera. Algunas poblaciones crean relaciones simbióticas o simplemente se benefician unas de la actividad de las otras. Otras entran en competencia, y muchas otras forman parte de la cadena trófica de especies presentes.

De esta manera la posición y forma de una curva particular de crecimiento de cada especie en el sistema, en función del tiempo depende, no solo de los nutrientes disponibles, también de factores ambientales como temperatura, pH y concentración de oxígeno. Además, de la presencia y concentración en otras especies también es un factor importante.

En la Figura 10 se observa el comportamiento de las diferentes especies en un reactor biológico, de tal manera que las bacterias se alimentan de la materia orgánica del vertido, los protozoos se alimentan de las bacterias y la población de bacterias va disminuyendo tanto por un proceso de muerte natural, como por alimentar a los protozoos. De esta forma el proceso biológico de degradación y consumo de las aguas residuales depende de una sucesión interrelacionada de especies.

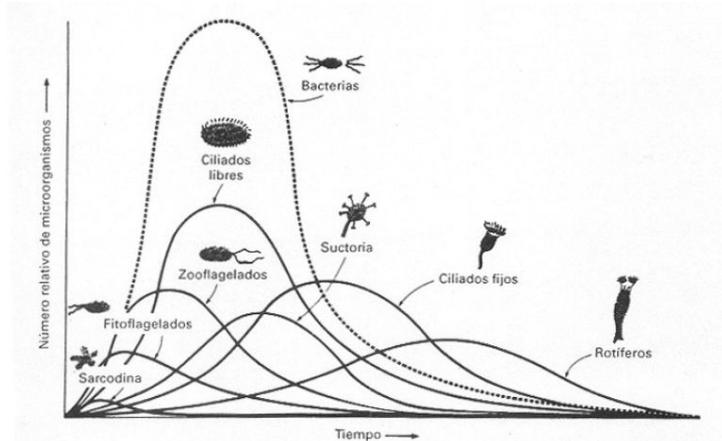


Figura 10. Evolución de diferentes especies en un reactor biológico de fangos activos, Metcalf&Eddy, 1995

4.5 Fundamentos del diseño y operación del proceso de fangos activos

La cinética de Monod puede ser usada para el diseño del tratamiento biológico, en este caso el sustrato limitante es la materia carbonosa. Utilizando las ecuaciones que describen el comportamiento cinético y un balance de masa del sistema se define la velocidad de degradación del sustrato, el crecimiento de la biomasa y la producción de fangos. A continuación se presentan los principales parámetros de diseño para el tratamiento biológico de un sistema de fangos activos.

4.5.1 Eliminación de materia orgánica

El proceso de fangos activos tradicional se desarrolla en un reactor aerobio operado en forma continua, al que se recirculan los microorganismos para que en el reactor se encuentre una concentración suficiente de los mismos con el fin de obtener un alto rendimiento de depuración. Al cociente Q_r/Q_f se le denomina relación de reciclado (r). En la Figura 11 se presenta un diagrama de flujo del proceso.

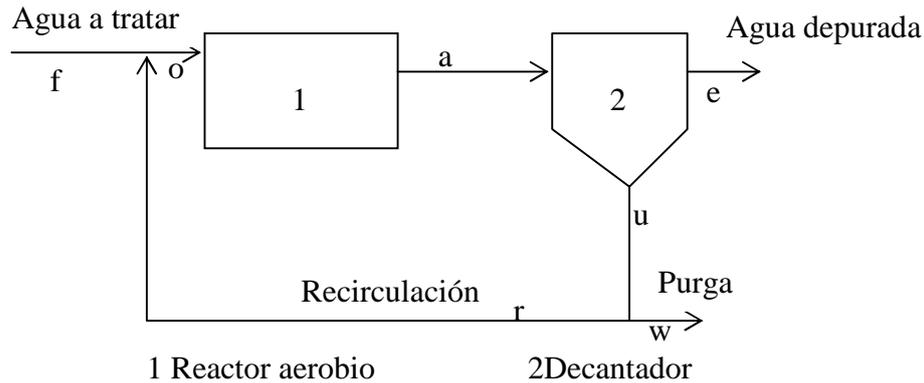


Figura 11. Esquema general del proceso de fangos activos

Es necesario aclarar que el agua a depurar que entra al proceso de fangos activos ha sido pretratada para separar del agua residual bruta los sólidos de mayor tamaño. En muchas ocasiones, tras el pretratamiento se somete al agua residual a un tratamiento primario en el que mediante un decantador (primario) se separan por gravedad sólidos en suspensión que han superado el pretratamiento. Por ello, a la hora de diseñar la instalación de fangos activos se supondrá una reducción de la Demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y los sólidos suspendidos (SS), con respecto a los valores iniciales en cabecera de planta, que será función del tiempo de residencia del agua residual en el decantador primario.

Se denomina **licor de mezcla** a la mezcla de fangos (flóculos de microorganismos) y aguas residuales, contenidos en el reactor biológico aireado, durante el sistema de tratamiento de fangos activos.

Los **SSLM** están constituidos por los microorganismos presentes en el reactor que son los responsables de la degradación de la materia orgánica, y los sólidos en suspensión que no han decantado en la etapa anterior, o sea en el decantador primario.

Para determinar los sólidos en suspensión en el licor de mezcla se realiza un ensayo de filtración de una muestra tomada del reactor, siendo los sólidos en suspensión aquellos que no pasan a través del filtro.

Los SSLM se dividen en volátiles (SSVLM) y no volátiles (SSNVLM) Para determinar la característica de volatilidad de los sólidos en suspensión ya determinados mediante el ensayo de filtración se realiza una combustión a 550°C . Así se pueden clasificar los sólidos en suspensión en:

- **Minerales o inorgánicos:** son los inertes, no se degradan en la combustión. Permanecen como cenizas a 550°C .
- **Volátiles.** Son aquellos que se degradan en la combustión. Se calculan por diferencia entre los sólidos en suspensión totales y los minerales. Es la fracción orgánica.

$$SSLM = SSVLM + SSNVLM$$

4.5.2 Parámetros de diseño

4.5.2.1 Carga másica

La carga másica representa la DBO_5 que llega diariamente al tratamiento biológico en relación con la masa de fangos en el reactor. Se define como la cantidad de DBO_5 en la alimentación del reactor por kg de SSLM por día:

$$C_M = \frac{DBO_{5f} \cdot Q_f}{SSLM \cdot V} \equiv \frac{kg DBO_5}{kg SS \cdot dia}$$

siendo,

DBO_{5f} = concentración de DBO soluble de la alimentación inicial (kg/m^3)

Q_f = caudal de la alimentación inicial ($m^3/día$)

$SSLM$ = sólidos en suspensión en el licor de mezcla (kg/m^3)

V = volumen del reactor (m^3)

4.5.3 Edad del fango

Se define edad del fango como el tiempo calculado necesario para la extracción de la totalidad de fangos de los depósitos del proceso (excluyendo los presentes en clarificadores y zonas anaerobias e incluyendo los presentes en zonas aerobias y anóxicas) con un ritmo de extracción constante y teniendo en cuenta los sólidos en suspensión en el efluente.

La edad del fango representa, por tanto, la relación expresada en días, entre la masa de fangos en el reactor y la masa de fangos eliminada de la instalación diariamente. Este parámetro da una idea acerca del tiempo de retención de los microorganismos en la instalación, ya que los microorganismos siguen un ciclo desde que son decantados y recirculados al reactor, hasta que salen por la corriente de purga.

Si se tiene en cuenta la simplificación previamente realizada, es decir, que la concentración de microorganismos en la alimentación es nula, entonces se puede expresar la edad del fango (días) como:

$$\theta = \frac{SSLM \cdot V}{Q_w \cdot SS_w + Q_e \cdot SS_e}$$

con

$SSLM$ en kg/m^3

V en m^3

Q_w y Q_e en m^3/d

SS_w y SS_e en kg/m^3

Si se considera que se puede despreciar la cantidad de microorganismos que salen con el efluente depurado, tendríamos entonces:

$$\theta = \frac{SSLM \cdot V}{Q_w \cdot SS_w}$$

Para calcular la cantidad de fangos extraída por la purga (en kg/d), hay que tener en cuenta que dicha cantidad es precisamente la producción neta de fangos, la cual llamaremos ΔX .

$$\Delta X = Q_w \cdot X_w$$

La edad del fango es un parámetro muy útil para el diseño, sobre todo en instalaciones con nitrificación–desnitrificación.

Si denominamos P_e (producción específica de fangos) a la producción de fangos por kg de DBO_5 en la alimentación (kgSS/kg DBO_5), entonces,

$$C_M = \frac{1}{P_e \cdot \theta}$$

4.5.4 Índice volumétrico de de fangos

El índice volumétrico de fangos se define como el volumen en mililitros ocupado por 1 g de SSLM, expresado en peso seco, después de sedimentar durante 30 minutos en una probeta graduada de 1.000 mL. Al índice volumétrico de fangos también se le denomina índice de Mohlman.

$$IF = \frac{\text{mL ocupados por 1 L de fango}}{SSLM}$$

Al ensayo de decantación durante 30 minutos de 1 L de agua residual se le denomina abreviadamente V_{30} .

Este parámetro sirve para comprobar la correcta sedimentabilidad de los fangos y es de gran importancia para el diseño del decantador secundario. Valores por encima de 100 mL/g pueden significar problemas de decantabilidad.

5. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

5.1 Generalidades

Los modelos de computación cognitiva o redes neuronales artificiales (RNAs) son abstracciones matemáticas de la estructura del sistema nervioso, desarrollados para emular el funcionamiento de los sistemas neuronales biológicos. Este modelo se basa en el óptimo tratamiento que realizan los millones de procesadores elementales (neuronas) que conforman el cerebro, a la información masiva, imprecisa y distorsionada proveniente del mundo real.

El objetivo de reproducir estas estructuras neurobiológicas, es la construcción, de sistemas de procesamiento con paralelismo de cálculo, memoria distribuida y adaptabilidad al entorno, mediante la interconexión de unidades de procesamiento virtuales. Los modelos matemáticos obtenidos a partir de RNAs se caracterizan por su robustez y, capacidad de aprendizaje, generalización y tolerancia a fallas.

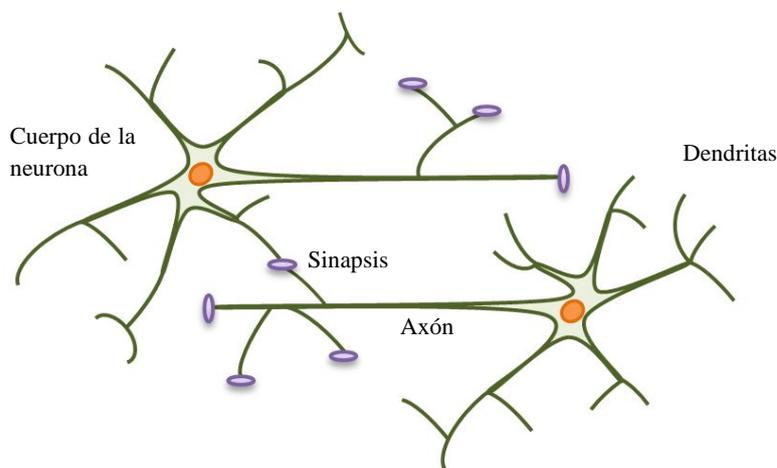


Figura 12. Neuronas biológicas

5.2 Neurona Artificial

Una red neuronal artificial (RNA) es fundamentalmente, un sistema reticular constituido por estructuras paralela que contienen procesadores elementales, llamados nodos o neuronas, dispuestos en capas e interconectados a través de enlaces con diferentes pesos numéricos asociados a cada elemento. Que simula el funcionamiento neurológico del cerebro a una menor escala a través de modelos matemáticos.

En la Figura 13 se representa el comportamiento de una neurona artificial j . Aquí los tres componentes principales de una neurona biológica, las dendritas, el cuerpo de la célula o soma, y el axón, se encuentran claramente definidos. Las señales de entrada

son representadas por las variables x_1, x_2, \dots, x_n , las cuales están asociadas a pesos que son representados por las variables w_{ij} , estos determinan el nivel de influencia de un elemento sobre otro.

El parámetro de sesgo θ , conocido como *bias*, puede ser considerado como un peso sináptico ($w_0 = \theta$), asociado a una dendrita que recibe siempre el estímulo $x_0 = 1$. Este término proporciona un grado de libertad adicional y no siempre es incluido en los modelos neuronales.

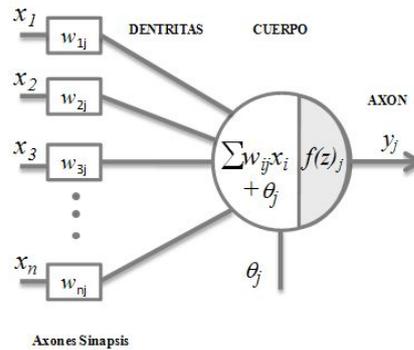


Figura 13. Esquema para una unidad de procesamiento

El cuerpo de la neurona se representa como un sumador lineal de los estímulos externos z_j , seguido de una función $y_j = f(z_j)$. La función $f(z_j)$ es llamada la función de activación, y es la que utiliza la suma de estímulos para determinar la actividad de salida de la neurona.

La función de salida para la neurona j esta dada por:

$$y_j(t) = f\left(\sum_i^n w_{ij}x_i + \theta_j\right)$$

En la Figura 14 se muestra el recorrido de un conjunto de señales que entran a una neurona.

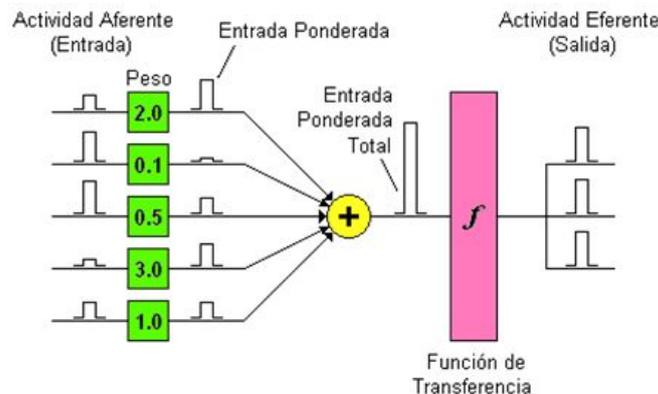


Figura 14. Procesos de una Neurona

5.3 Red Neuronal Perceptrón Multicapa (RNPM)

La RNA utilizada para el desarrollo del programa se denomina RNPM. Este modelo neuronal estático se caracteriza por ser unidireccional con conexiones hacia adelante (feedforward), es decir, carece de neuronas con conexiones a otras neuronas de una misma capa, conexiones hacia neuronas de capas anteriores o conexiones hacia ellas mismas. En una RNPM el número de capas ocultas puede ser mayor o igual que uno, y difiere de la Red Neuronal Perceptrón (RNP) debido a que los nodos usan una función de activación no lineal [24].

La arquitectura de la RPNM, basada en la red feedforward, dispone de 3 tipos de capas (Ver Figura 15):

- La capa de entrada: receptora de la información desde el exterior
- Las capas ocultas: generadoras de las funciones de asociación entre la entrada y la salida
- La capa de salida: buffer de salida, entrega las predicciones de la red neuronal.

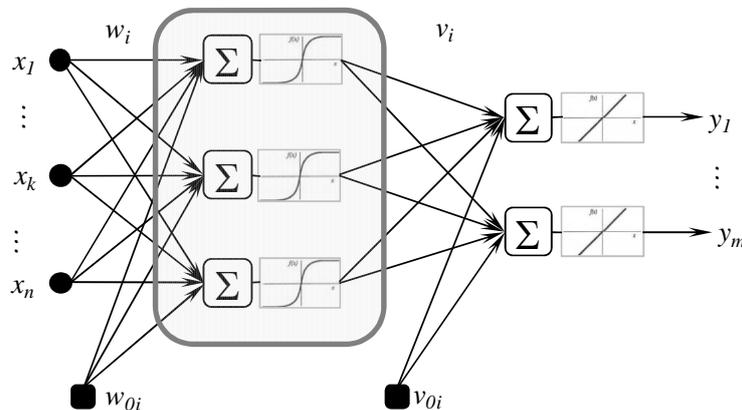


Figura 15. Esquema de una RPNM

5.3.1 Algoritmo del aprendizaje supervisado

Generalmente una red neuronal con aprendizaje supervisado es creada en dos fases comúnmente referenciadas como; fase de entrenamiento y fase de validación del modelo. Para esto las parejas de datos (x_i, y_i) se dividen en tres diferentes grupos, uno de entrenamiento, otro de validación y un último grupo de prueba.

El primer grupo se utiliza para ajustar gradualmente los pesos y sesgo (*bias*). Normalmente los valores iniciales de estos parámetros son aleatorios.

Durante la fase de entrenamiento la muestra, que contiene tanto los datos de entrada como los de salida del sistema (objetivo), es procesada para optimizar las salidas de la red en orden de minimizar el error entre los valores objetivos y las salidas del modelo. Uno de los algoritmos de aprendizaje más utilizados es el *backpropagation*, basado en la generalización de la regla de aprendizaje de *Widrow-Hoff* que minimiza el error cuadrático medio. Este tipo de red neuronal utiliza el método de retropropagación, en el

cual el aprendizaje de un conjunto predefinido de entradas y salidas, emplea un ciclo de propagación (Figura 16).

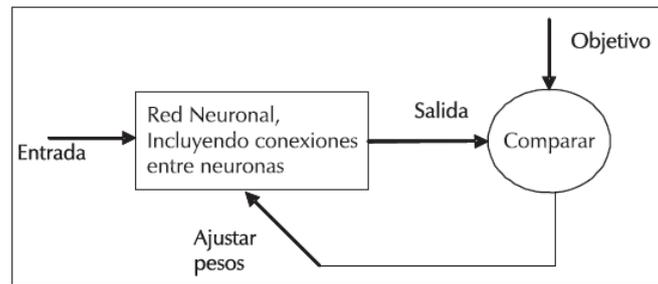


Figura 16. Entrenamiento de una RNA

Finalmente la fase de validación tiene por objeto verificar que la arquitectura de la red propuesta es capaz de modelar adecuadamente el fenómeno que se está simulando. En esta fase se emplean los conjuntos de datos restantes.

6. METODOLOGÍA

La fase experimental del proyecto se llevó a cabo en un MBR piloto instalado en una Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas (EDARU). Durante los cinco meses de operación se realizó el seguimiento de parámetros como SSLM, DQO, DBO, PTM, etc., con el fin de evaluar el rendimiento del proceso biológico y el ensuciamiento de la membrana.

El modelado del proceso de ultrafiltración fue estudiado utilizando las *Toolbox* de Matlab para redes neuronales (The MathWorks Inc., USA).

A continuación se presenta una descripción del sistema MBR, indicando las características de las membranas, la estrategia de operación del biorreactor y los análisis químicos realizados. En lo referente al modelado de la ultrafiltración, el algoritmo de cada uno de los programas desarrollados e implementados es también descrito.

6.1 MBR piloto

6.1.1 Descripción general

La planta piloto consta básicamente de un reactor biológico dividido en dos compartimentos, uno exclusivo para la aireación y otro de filtración, un módulo de ultrafiltración sumergido BC10-10 (BIO-CEL®) con 10 m² de superficie activa y un tanque de almacenamiento para el permeado (Figura 17 y 16).

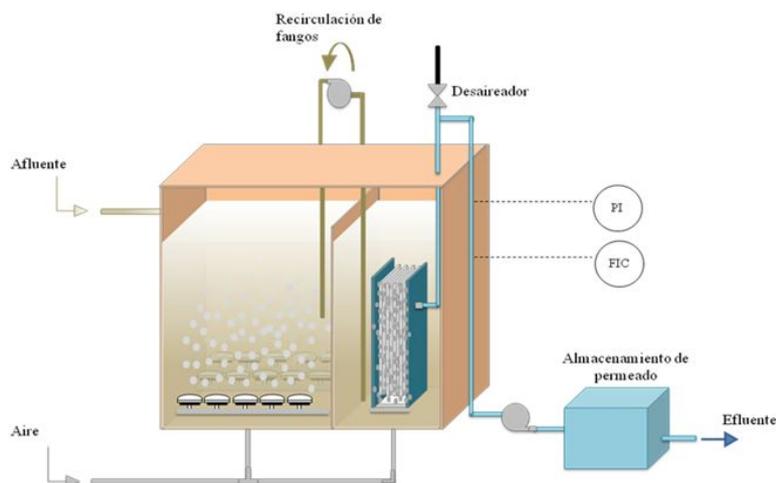


Figura 17. Configuración del biorreactor de membrana



Figura 18. Planta piloto instalada en la EDARU

El reactor biológico tiene un volumen total de 1.05 m^3 y está provisto de dos soplantes, que suministran el aire a los depósitos y ocho bombas para las operaciones de alimentación, bombeo de fangos del reactor aerobio al de membranas, purga de fangos, dosificación de antiespumante, ácido y base, filtración y contralavado. La Figura 19 es una fotografía del compartimiento de aireación del reactor.



Figura 19. Reactor aerobio

La recirculación del reactor de membranas al aerobio se efectúa por gravedad.

El mantenimiento de las membranas se realiza in situ mediante ciclos de limpieza físicos y químicos. Para la limpieza física se llevan a cabo ciclos de filtración y relajación y se efectúan contralavados periódicos utilizando el permeado almacenado. En la limpieza química se realizan contralavados en serie con una disolución de hipoclorito sódico.

La potencia para el funcionamiento de la planta se encuentra próxima a 5 kW.

6.1.2 Características del módulo y las membranas

El módulo de membranas BC10-10 está compuesto por membranas de ultrafiltración flexibles con relleno espaciador libre, con un tamaño de poro de 0.04 micras (150 kDa de corte molecular); el material de la capa activa es de polietersulfona (PES). Este módulo tiene unas dimensiones de 1230 mm de alto por 350 mm de ancho y 256 mm de largo.

El sistema de difusión para la aireación se incluye en el propio módulo y está ubicado en la parte inferior de las membranas.

En la fotografía de la Figura 20 se pueden observar las membranas dispuestas en el módulo fabricado en PVC y acero inoxidable, y sumergidas en el compartimiento de filtración.



Figura 20. Disposición del Módulo de membranas BC10-10.

La Tabla 3 muestra las condiciones de operación recomendadas por el fabricante para el correcto funcionamiento de las membranas.

Tabla 3. Valores a considerar en el funcionamiento de las membranas

Presión transmembranal de trabajo (PTM) (mbar)	< 400
Presión de contralavado (mbar)	< 150
Sólidos en suspensión en el licor de mezcla (g/L)	< 12
Temperatura de operación (°C)	5 - 55
Rango de pH	2 - 11
Resistencia al cloro (ppm·h)	100000

Con el fin de evitar el paso de partículas de gran tamaño al sistema, la planta cuenta con un filtro de malla de 3 mm de luz de paso instalado en la línea de alimentación.

6.1.3 Reactivos químicos

Tal y como se ha comentado anteriormente, la planta dispone de bombas dosificadoras preparadas para la adición de ácido, base y antiespumante. Teniendo en cuenta que el

agua residual que ingresa a la EDARU presenta un pH promedio de 7.5, no fue necesario realizar ajustes durante el tiempo de operación de la planta. .

Por el contrario, la dosificación de antiespumante es casi siempre necesaria en la puesta en marcha de la planta pues la experiencia demuestra que se presenta formación de espumas. Es muy importante que dicho antiespumante no contenga silicona, por ser este un producto incompatible con la membrana.

6.1.4 Estrategia de operación

El MBR funciona de forma cíclica. A continuación se definen una serie de términos necesarios para entender el funcionamiento de la planta.

- *Periodo de filtración.* Es el tiempo durante el cual las membranas se encuentran filtrando de modo ininterrumpido.
- *Periodo de relajación.* Es el tiempo durante el cual no se realiza filtración, permaneciendo el módulo aireado. Dicha aireación nunca se suspende, de forma que actúa tanto en la filtración como en la relajación de las membranas.
- *Contralavado.* consiste en bombear permeado desde el depósito, obtenido previamente en la filtración, hasta el lado de la alimentación de las membranas. La presión de operación para ello no ha de sobrepasar los 150 mbar.

La Figura 21 explica un ciclo normal de funcionamiento de 10 minutos, en el que los 8 primeros son de operación y los 2 siguientes de relajación.



Figura 21. Operación de un ciclo normal

De acuerdo con la estrategia de operación de la planta, cada hora (1 hora = 6 ciclos) el último ciclo normal de funcionamiento modifica el periodo de relajación de la siguiente manera: primero reduce el tiempo de relajación a 30 segundos, después efectúa una desaireación durante los siguientes 30 segundos, seguidamente se produce un contralavado de 30 segundos, y finaliza con un periodo de relajación de 30 segundos, tal como se muestra en la Figura 22.



 30 s de relajación + 30 s de desaireación + 30 s de contralavado + 30 s de relajación

* Ciclo N° 6

** Ciclo N° 1

Figura 22. Modificación de ciclo para contralavado

La aireación recomendada por los fabricantes para el tanque de membranas es de $0.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Como la superficie de membrana es de 10 m^2 , el caudal de aire a suministrar es de $6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Aún operando en forma cíclica y satisfaciendo siempre las necesidades de aire antes referidas, la presión PTM de trabajo aumenta con el tiempo de operación debido a fenómenos de ensuciamiento irreversible. Es entonces cuando se debe proceder a una limpieza química de mantenimiento. En un principio, el umbral a partir del cual se ha de realizar limpieza química para estas membranas es de 400 mbar, siendo éste un valor demasiado alto de acuerdo con experiencias previas realizadas con membranas orgánicas. Por lo tanto se ha establecido un nuevo valor umbral de 200 mbar.

La limpieza química de mantenimiento se realiza mediante contralavado con hipoclorito sódico.

Durante el periodo de operación de la planta se efectuaron 2 limpiezas químicas de mantenimiento con hipoclorito sódico. Cabe mencionar que las limpiezas, ácida y química intensiva, no fueron realizadas.

6.1.5 Instrumentación

La instrumentación de la planta permite la medición de los caudales tanto de las corrientes de agua como de aire, así como la concentración de oxígeno disuelto en el reactor aerobio.

El equipamiento incluye también sondas de pH, de temperatura y de nivel a diferentes alturas en los dos tanques.

La PTM se mide mediante dos sensores de presión en el lado del permeado de las membranas. El autómata no poseía un sistema de adquisición de datos que permitiera observar de forma continua la evolución con respecto al tiempo de la PTM. Por tanto, los datos utilizados proceden de los registros en el display en momentos puntuales. El dato de PTM fue tomado siempre en el último minuto (min 8) del primer ciclo normal de funcionamiento a la misma hora cada día. Eventualmente se tomaron los registros de la evolución de la presión para ciclos aleatorios.

6.1.6 Análisis de laboratorio

Para evaluar el rendimiento del biorreactor se realizaron una serie de análisis de laboratorio a muestras tomadas tanto en el afluente y efluente de la planta, como en el reactor biológico. La Tabla 4 muestra los diferentes parámetros con su respectiva frecuencia de análisis.

Tabla 4. Frecuencia de análisis de laboratorio

Punto de muestreo	Parámetro	Método	Frecuencia de análisis
Reactor Biológico	SSLM	Método gravimétrico - UNE 872:1996 Determinación de los sólidos en suspensión	1/día
	Índice volumétrico de fangos.	Método volumétrico – UNE-EN 14702-1:2007 Caracterización de lodos. Propiedades de sedimentación. Parte 1: Determinación de la sedimentabilidad	1/día
	Sólidos sedimentables (V30)	Método volumétrico – UNE 77032:2002 Determinación de los sólidos decantables	1/día (desde el día 32)
Alimento y permeado	pH		1/día
	DQO	Método fotométrico – kit de ensayo Spectroquant®	1/día
	DBO ₅	Método respirométrico -	1/semana (durante 9 semanas)
	Nitrógeno	Método fotométrico - kit de ensayo Spectroquant®	12/T.O.**
	Fósforo	Método fotométrico - kit de ensayo Spectroquant®	11/ T.O.
	Escherichia Coli	Método de filtración por membranas - UNE-EN ISO 9308-1:2001 Detección y recuento de <i>Escherichia coli</i> y de bacterias coliformes	1/ día

**T.O.: Tiempo de Operación

6.2 Modelado del Proceso de Ultrafiltración

Para la predicción de la PTM en un MBR se implementaron dos Redes Neuronales Perceptrón Multicapa (RNPMs) (ver Tabla 5). La programación se realizó sobre la plataforma de MatLab utilizando las *Toolbox* disponibles para redes neuronales (Matlab Neural Network Toolbox v. 6.0.2).

Tabla 5. Generalidades de las RNPMs

Nombre de la RNPM	Capacidad de extrapolación	Capacidad de interpolación	Datos de entrenamiento	Criterio de selección
RNA 1	Baja	Alta	Todos los periodos de operación.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coeficiente de Pearson global. 2. Cantidad de unidades de procesamiento en la capa de entrada y la capa oculta.
RNA 2	Alta	Media	1er periodo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coeficiente de Pearson para el 1er y 2do periodo. 2. Cantidad de unidades de procesamiento en la capa oculta.

Las RNPMs empleada para la modelización constaron de tres capas, una de entrada, seguida de una capa oculta y por último la capa de salida. El programa utiliza el 60% de los datos de los periodos seleccionados para la fase de entrenamiento y los restantes para la validación y prueba del modelo. Los pesos iniciales fueron asignados aleatoriamente en el intervalo de $(-0.5,+0.5)$.

El algoritmo de optimización utilizado para minimizar el error cuadrático medio (ECM) durante el entrenamiento fue Levenberg–Marquardt y el criterio de *early stopping*. Las funciones de activación utilizadas fueron la función de transferencia sigmoideal tangencial para la capa oculta y la función de transferencia lineal en la capa de salida.

Como entradas al modelo se seleccionaron variables operativas que pueden interferir en el ensuciamiento de la membrana y que normalmente son monitoreadas en el tratamiento de aguas residuales urbanas con tecnología MBR. Estos parámetros son: los SSLM, el flujo de permeado, la frecuencia de contralavado, el tiempo modificado de acuerdo con los ciclos de operación (ver Figura 23), la temperatura, los contralavados químicos realizados y el tiempo total de operación. Teniendo en cuenta que el ensuciamiento en la membrana se produce por la acumulación de sólidos y su espesor se incrementa con el paso del tiempo durante la filtración, los estados anteriores de ensuciamiento correspondientes a diferentes retardos ($PTM_0(t-1)$, $PTM_1(t-2)$, $PTM_2(t-3)$, $PTM_3(t-4)$) fueron también incluidos como entradas. La salida del modelo fue la PTM.

En la Figura 24 se presentan el algoritmo general utilizado relacionado con algunos comandos del programa, utilizado en el modelado de la RNPM estática de tres capas.

	Tiempo de operación (min)	Tiempo modificado (min)	
	600		Relajación
Ciclo 1	621	1	Filtración
	⋮	⋮	
	628	8	
	609		Relajación
	610		
Ciclo 2	621	11	Filtración
	⋮	⋮	
	628	18	
	618.5		Relajación
	619		Desaireación
	619.5		Contralavado
	620		Relajación
Ciclo 1	621	1	Filtración
	⋮	⋮	
	628	8	

Figura 23. Tiempo modificado para un contralavado cada 2 ciclos a las 10 h de operación

Tabla 6. Variables operativas de entrada al modelo

Variable	Min	Max
SSLM ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	3780	12060
Flujo de permeado ($\text{l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	8	20
Frecuencia de contralavado (numero de ciclo)*	1	10
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	20.5	29.7
Contralavados químicos	0	2

* 1 ciclo = 8 minutos de filtración y 2 minutos de relajación.

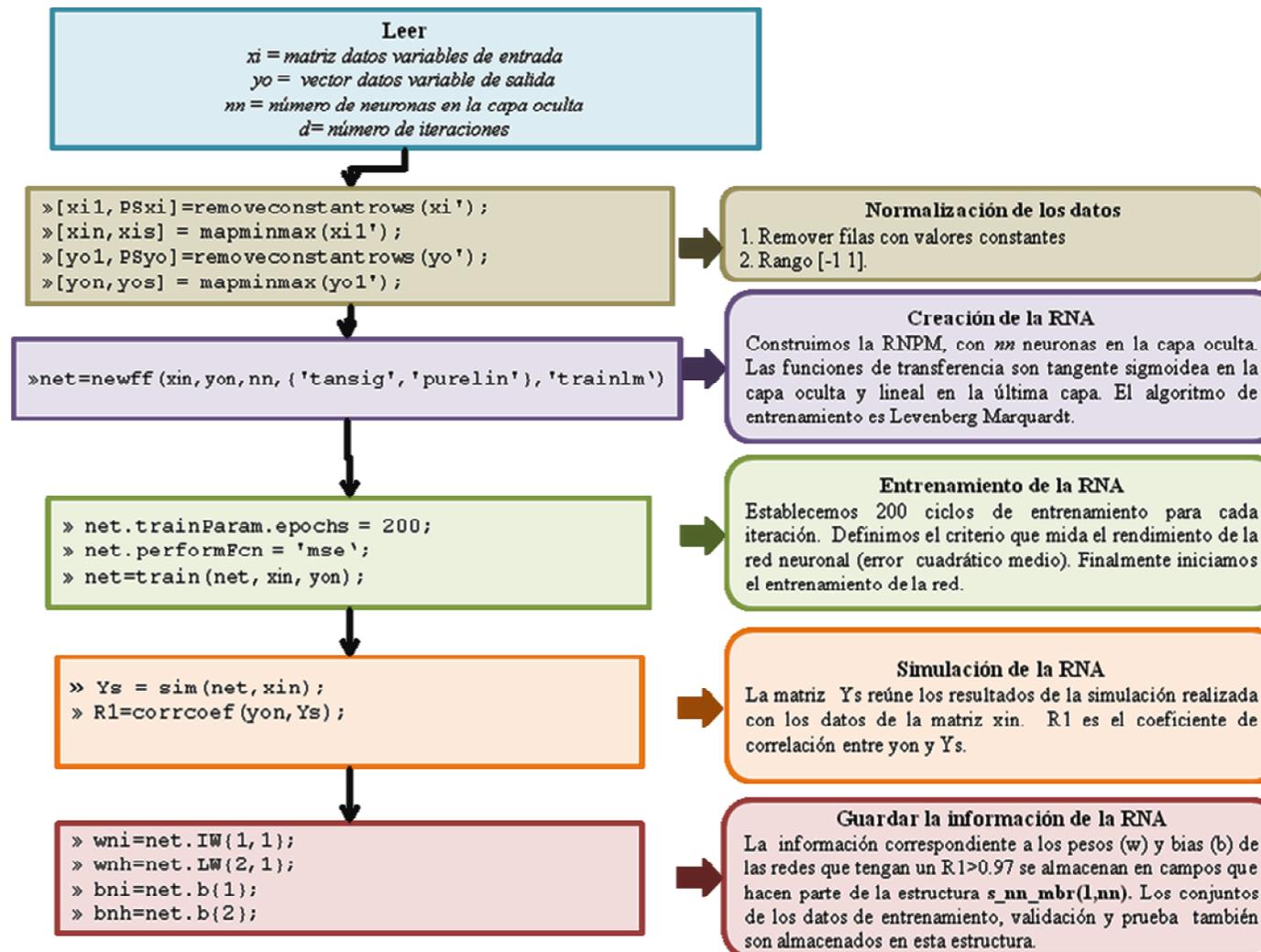


Figura 24. Algoritmo para la RNPM estática de tres capas

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la etapa de experimentación y la arquitectura de la RN obtenida en la modelización del proceso de membranas en un MBR son expuestos en este capítulo. Inicialmente se analizará el rendimiento del proceso biológico y la evolución de la PTM del sistema, seguidamente se presentarán los resultados de los modelos derivado de la aplicación de la RNPM a la ultrafiltración que se lleva a cabo en el biorreactor.

7.2.1 Rendimiento del proceso biológico y evolución de la PTM

Para estudiar el rendimiento del sistema se diferenciaron cuatro periodos, los tres primeros separados por dos contralavados químicos efectuados con hipoclorito sódico y el último que corresponde a la fase final donde la membrana fue sometida a condiciones de operación extremas (Tabla 7). A continuación se mencionan los aspectos más relevantes observados en cada uno de los periodos.

Tabla 7. Duración de los periodos de operación del sistema MBR

Periodo	Número de días	Fecha
1	45	05/05/08 – 18/06/08
2	39	19/06/08 – 27/07/08
3	49	27/07/08 – 14/08/08
4	11	14/08/08 – 25/08/08

Primer periodo de operación

En este periodo la puesta en marcha del sistema origina un estado transitorio inicial, caracterizado por inestabilidades en el proceso de biodegradación de la materia orgánica. Después de la segunda semana desaparece con la operación continua del sistema y se produce un ensuciamiento irreversible de la membrana; adicionalmente las incidencias de la puesta en marcha, con alguna parada inesperada ocasionada por el descebado de la bomba de alimentación, incrementan el ensuciamiento. En este primer periodo también se presentaron importantes episodios de espumas.

El objetivo para este primer periodo fue alcanzar condiciones estacionarias a concentraciones de los SSLM de alrededor de 7000 mg/L.

El rendimiento de eliminación de DQO promedio para el primer periodo de operación fue de 93%.

No se presentan variaciones considerables en el flujo de permeado.
Se presentaron variaciones en los ciclos de limpieza física.

Segundo periodo de operación

Al iniciar el periodo se establece la frecuencia de contralavado constante (1 contralavado cada 6 ciclos). Por otro lado, de la segunda a la quinta semana de operación, el flujo de permeado se incrementa a valores entre 200 – 250 L/h.

Adicionalmente se presentan variaciones considerables en la concentración de los SSLM, y el rendimiento de eliminación de DQO es mayor al 95%.

Tercer periodo de operación

Las altas concentraciones de SSLM (9000 mg/L) y los bajos flujos de permeado (150 L/h) caracterizan este periodo. El promedio de eliminación de DQO se incrementa hasta una valor de 97.2%.

Cuarto periodo de operación

En este periodo de tiempo se somete al reactor a condiciones extremas, por tratarse de los últimos días de operación: Caudales hasta 300 L/h y concentraciones de SSLM de 12000 mg/L.

El promedio de eliminación de DQO en este periodo se mantuvo en el 97%.

La Figura 25, la Figura 26 y la Figura 27 muestran las medidas de los diferentes parámetros durante la operación de la planta piloto.

Los resultados de los análisis microbiológicos de Coliformes Totales (C. T.) y Escherichia Coli (E. Coli) realizadas en las muestras tomadas en las corrientes de alimentación y permeado demostraron una adecuada retención por las membranas de E.Coli y una notable reducción de los C. T. (Tabla 8). La cuantificación de coliformes se realizó utilizando el método de filtración en membrana de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 9308-1.

Tabla 8. Recuento microbiológico de Coliformes Totales y Escherichia Coli

Fecha	Corriente	E. Coli UFC/100ml	C. T. UFC/100ml
17/07/08	Alimento	$2.9 \times 10^6 - 3.0 \times 10^6$	10×10^6
	Permeado	0	63 – 68
17/07/08	Alimento	$6.0 \times 10^6 - 8.0 \times 10^6$	$47 \times 10^6 - 43 \times 10^6$
	Permeado	0	5 – 140

Figura 25. Evolución de la PMT y el caudal de permeado durante la operación del MBR

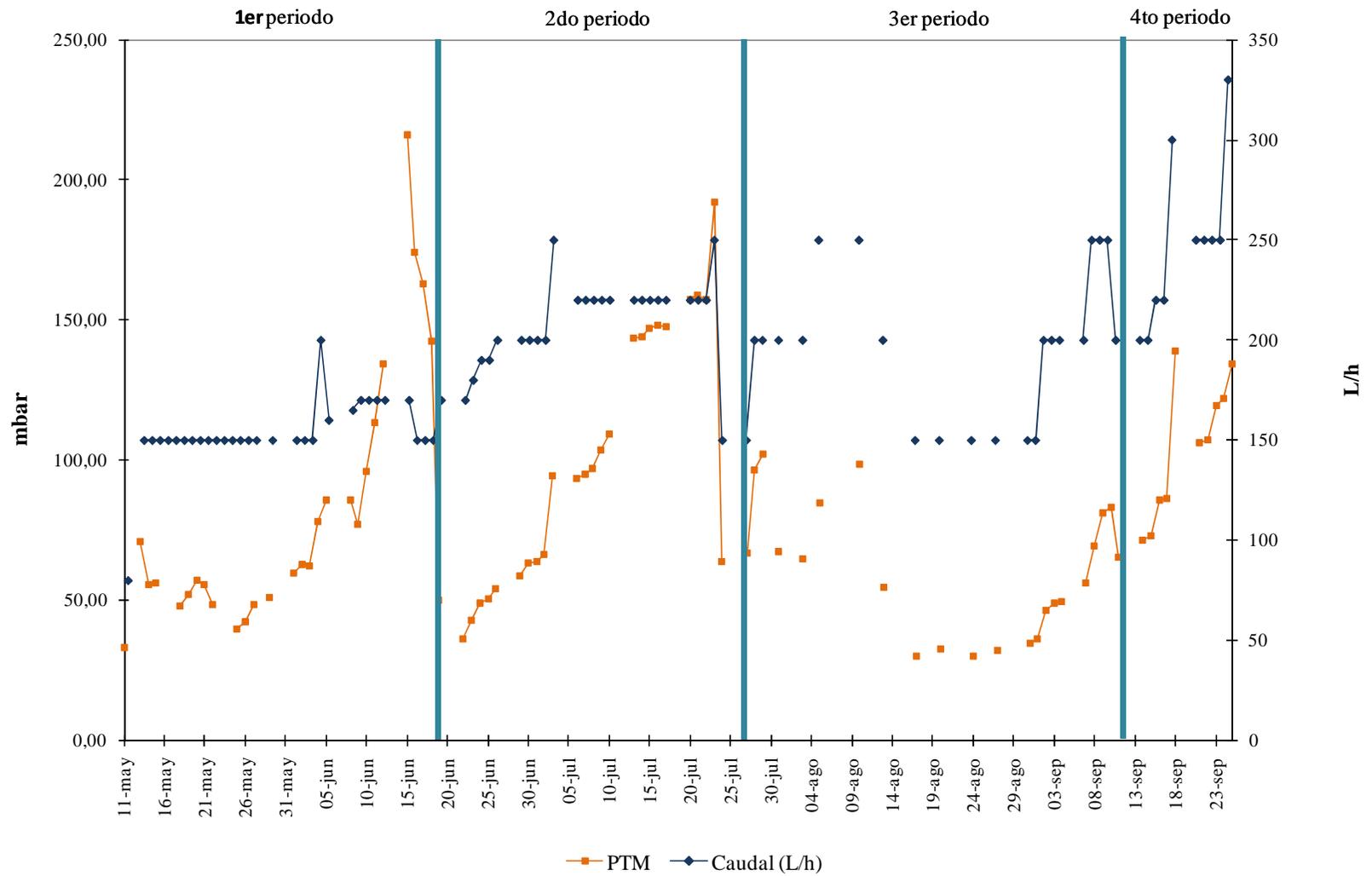


Figura 26. Evolución de la PMT y los SSLM durante la operación del MBR

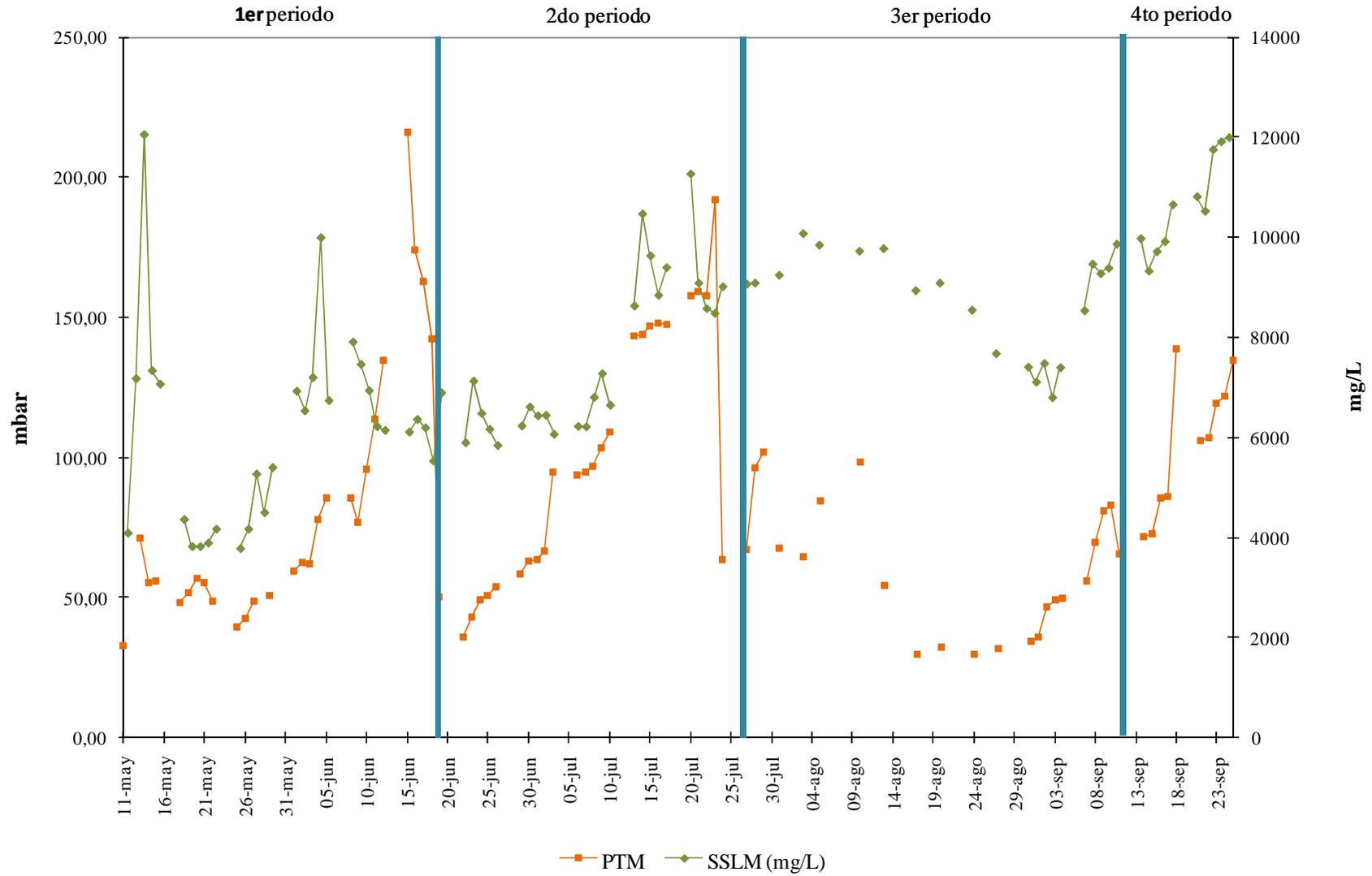
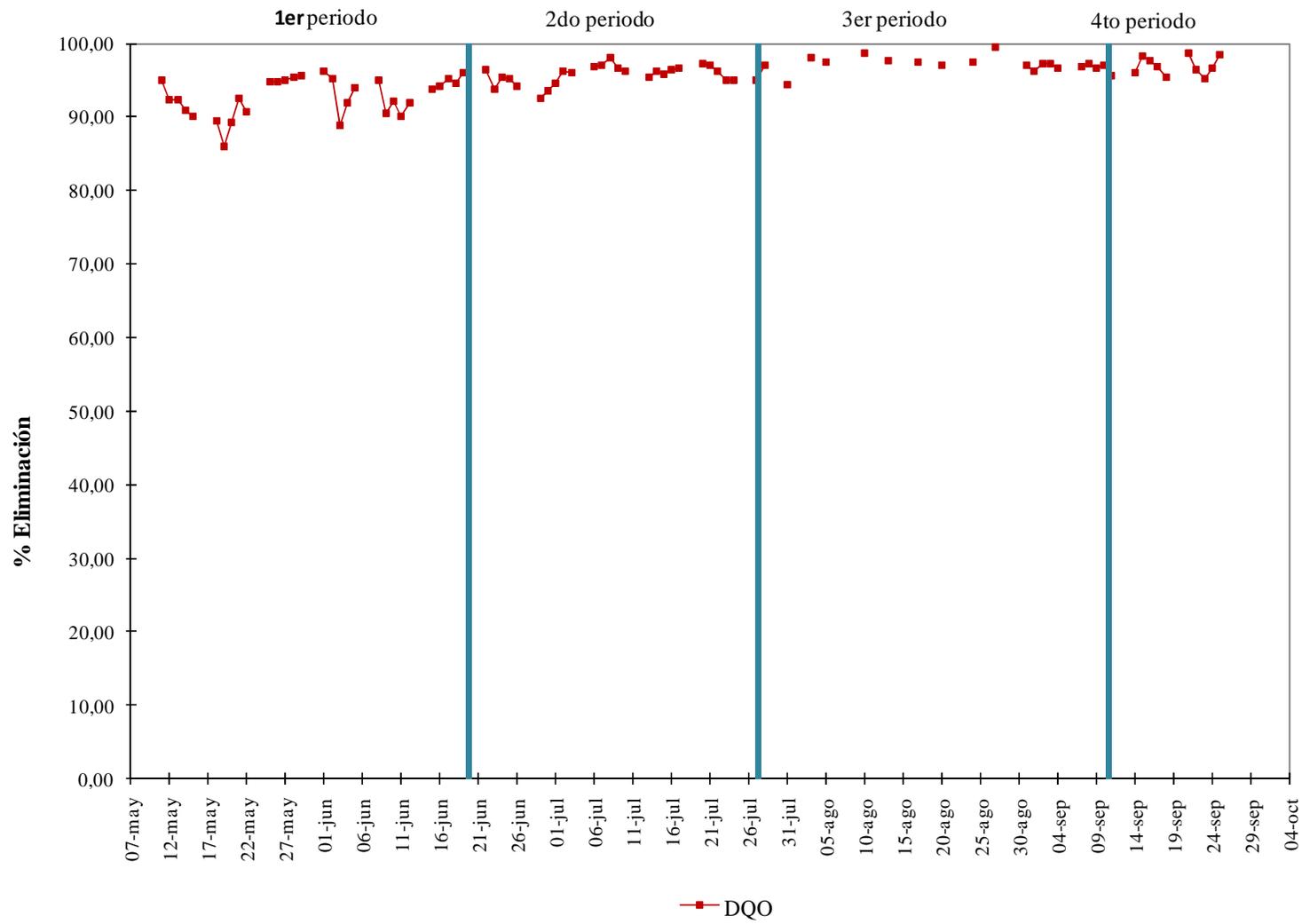


Figura 27. Evolución de la eliminación de DQO durante la operación del MBR



7.2.2 Construcción y estudio de la RNA 1

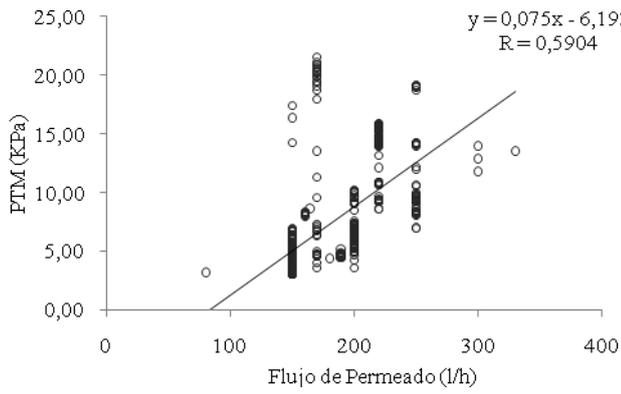
Para identificar las asociaciones entre cada una de las variables dependientes, establecidas previamente, con la PTM, y por consiguiente con el ensuciamiento de la membrana, se determinaron los coeficientes de correlación lineal (R).

En la Figura 28 se presentan las gráficas de cada una de las variables con su respectivo valor de R. El flujo de permeado, SSLM y la temperatura muestran una correlación media con la PTM. La asociación del número de ciclos con el ensuciamiento tiene una correlación media pero a diferencia del grupo de variables descritas anteriormente su incidencia es negativa, es evidente que un aumento en la frecuencia de contralavado disminuirá el ensuciamiento. Por otro lado, como se esperaba la correlación entre los retardos (PTM0, PTM01, PTM02, PTM03) y la PTM son muy fuertes, por tratarse de un proceso de membranas donde es predominante el incremento de la cantidad de sólidos acumulados sobre la superficie durante el filtrado.

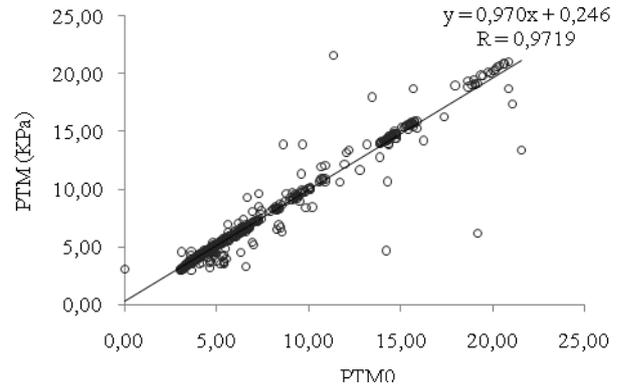
De forma similar a trabajos realizados con modelización del ensuciamiento en procesos de ultrafiltración y microfiltración, la arquitectura de la RNA fue determinada mediante prueba y error. Teniendo en cuenta que uno de los principales obstáculos que presenta el uso de RNAs para el modelamiento y control de procesos son los prolongados tiempos de cálculo generados por la implementación de redes con numerosas conexiones entre sus elementos de procesamiento y las variables empleadas, se realizaron simulaciones para establecer además del número de neuronas en la capa oculta, la incidencia de la inclusión de las variables de entrada establecidas. Para este objetivo las RNAs fueron modeladas a partir de diferentes grupos de variables de entrada (ver Tabla 9)

Tabla 9. Conjuntos de variables para el modelado de la RN

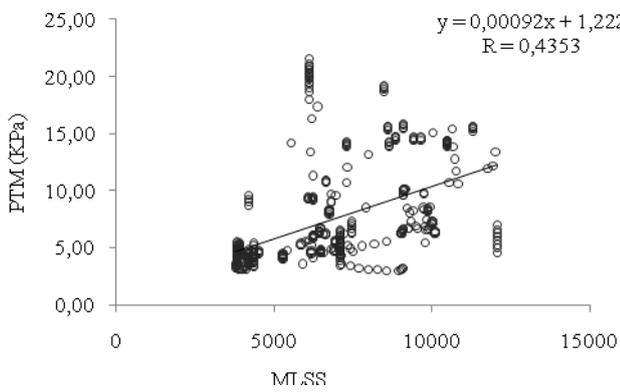
Nombre	VARIABLES DE ENTRADA
A	Flujo de Permeado (FP), SSLM, Tiempo Modificado (TM), N° de ciclos (NC), Contralavado Químico (CQ), PTM0, PTM01, PTM02, PTM03, Tiempo Total (TT), Temperatura (T).
B	FP, SSLM, TM, NC, CQ, PTM0, PTM01, PTM02, PTM03, TT.
C	FP, SSLM, TM, NC, CQ, PTM0, PTM01, PTM02, TT.
D	FP, SSLM, TM, NC, CQ, PTM0, PTM01, TT.
E	FP, SSLM, TM, NC, CQ, PTM0, TT.
F	FP, SSLM, TM, NC, CQ, TT.



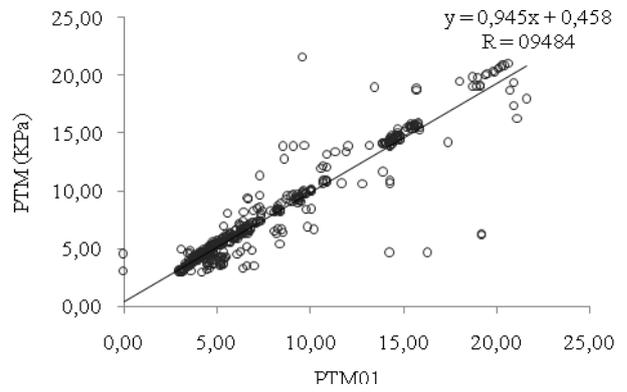
(a)



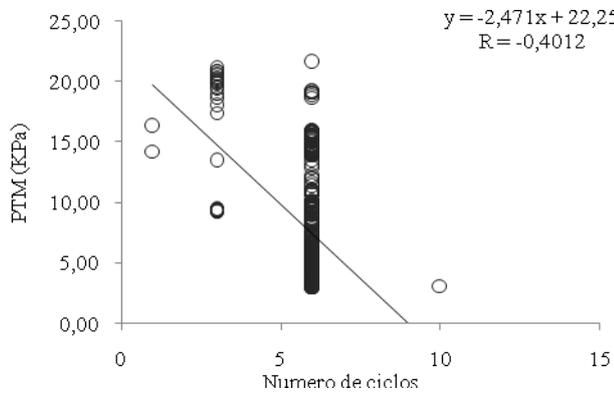
(b)



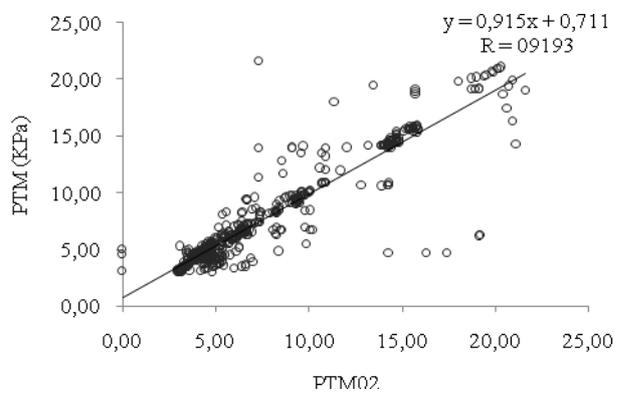
(c)



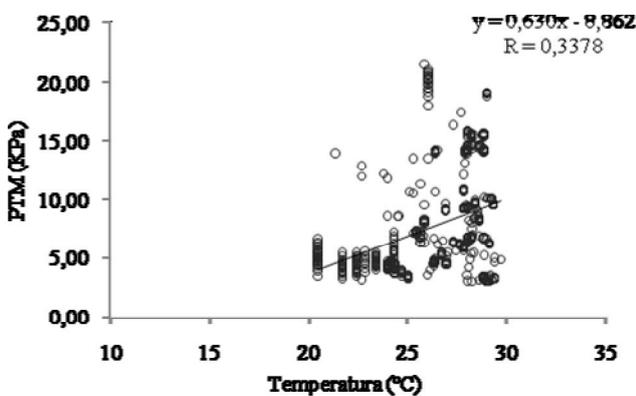
(d)



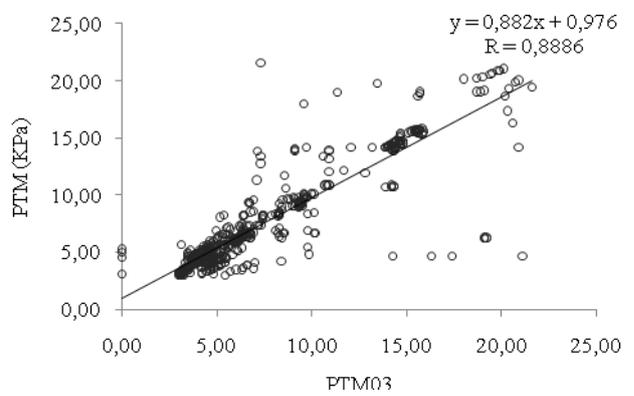
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 28 Correlación de las variables independientes con la PTM

Como se mencionó anteriormente la red fue entrenada utilizando como algoritmo de optimización el propuesto por Levenberg-Marquardt y el criterio de *early stopping*, utilizando el 60% de un grupo total de 600 datos. Con 200 ciclos de entrenamiento y 50 iteraciones para cada configuración (desde 1 hasta 20 neuronas en la capa oculta), se realizaron simulaciones con los diferentes conjuntos de variables. Para todas las simulaciones el coeficiente de correlación (R) y el ECM de la PTM real y simulada fueron hallados. En la Figura 31 se presenta el valor de la mejor correlación lineal (valor más cercano a 1) encontrada para cada una de las arquitecturas. La no linealidad del sistema se refleja en el incremento que presenta el coeficiente R al aumentar el número de neuronas en la capa oculta. Por otro lado se observa que después del cuarto elemento de procesamiento incluido en la red los coeficientes de correlación para todas las configuraciones son superiores a 0.9800. También es importante destacar que para el conjunto F, el cual no incluye como variable de entrada ningún estado precedente de PTM, se registraron coeficientes menores que para aquellas configuraciones que incluían al menos uno de estos estados.

El conjunto de variables de entradas D es la que presenta el mejor desempeño, para el 40% de sus configuraciones los valores de R son superiores a los obtenidos por los conjuntos restantes.

Otro factor importante y además utilizado para medir el rendimiento de la fase de entrenamiento es el ECM. Para la curva D se observa una tendencia a la reducción del ECM a partir de la octava neurona en la capa oculta (ver Figura 30). Así mismo la Figura 31 muestra para dicho conjunto la frecuencia en que cada configuración obtuvo un coeficiente de correlación superior a 0.9800.

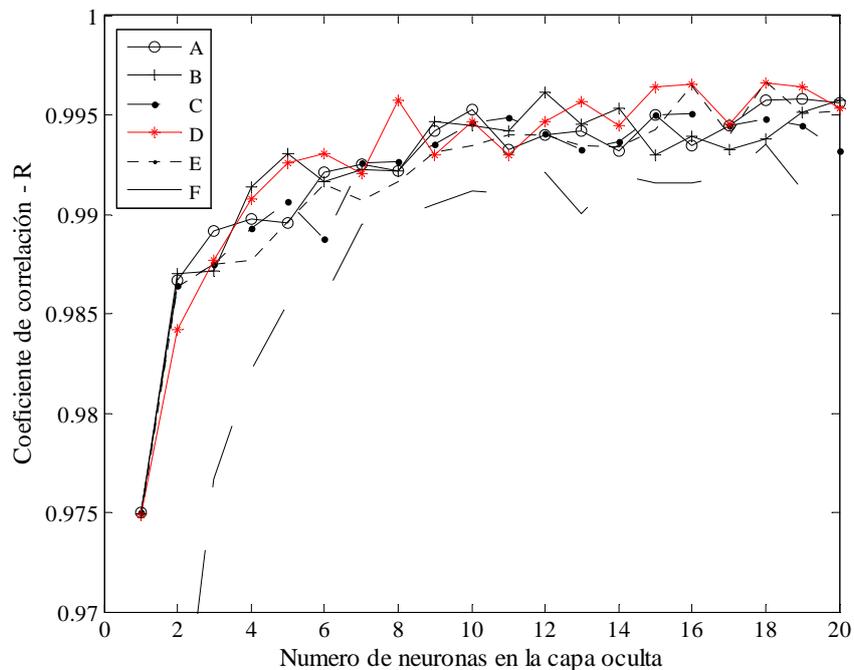


Figura 29. Coeficientes de correlación para diferentes conjuntos de datos y configuraciones de red

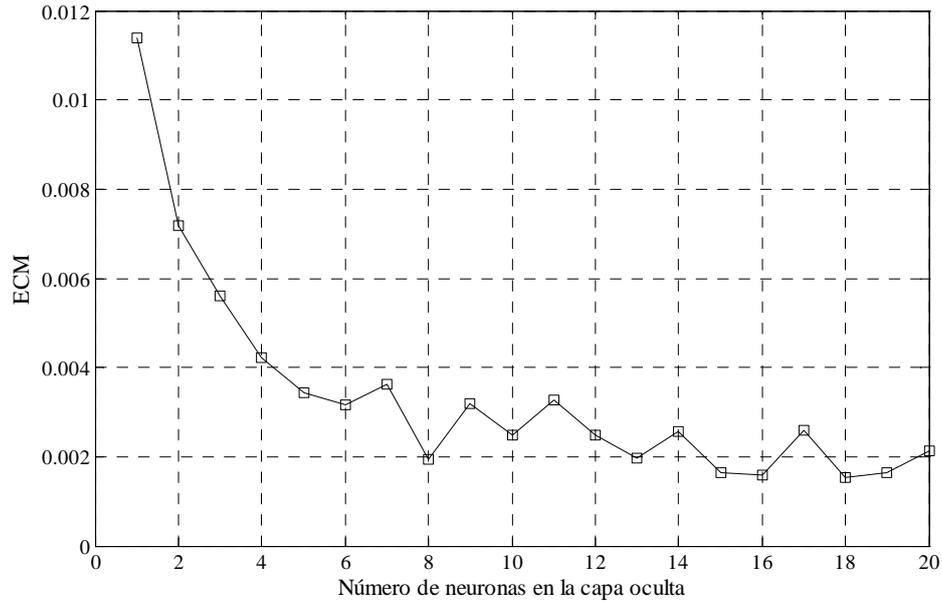


Figura 30. ECM para diferentes configuraciones de red del conjunto D

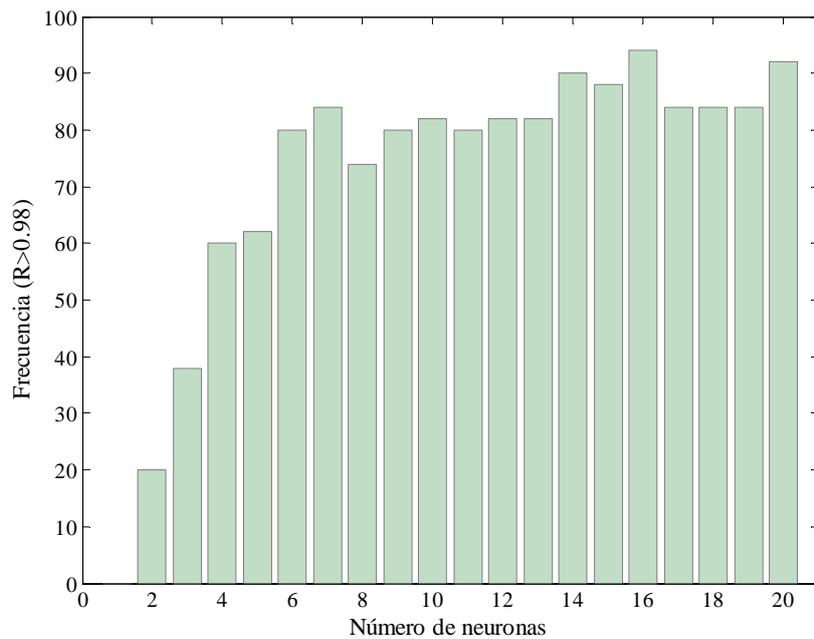


Figura 31. Frecuencia(R>0.98) para diferentes configuraciones de red del conjunto D

Considerando que la reducción del número de neuronas optimiza el tiempo de cálculo en los sistemas reales que procesan una mayor cantidad de datos, la red neuronal tendrá la configuración que se muestra en la Figura 32.

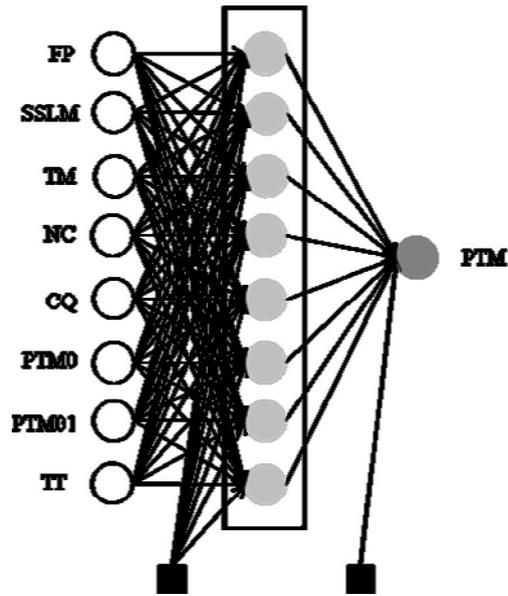


Figura 32. Estructura de la RN

El coeficiente de correlación de Pearson para la red neuronal propuesta es de 0.9957. Con ocho neuronas en la capa de entrada, ocho en la capa oculta y una salida, el sistema neuronal propuesto para la predicción de la PTM durante todo el periodo de operación del MBR presenta una gran potencial para la interpolación como se observa en la Figura 33. En la sección 7.2.3 se estudia la capacidad de extrapolación de un modelo generado a partir de RNA.

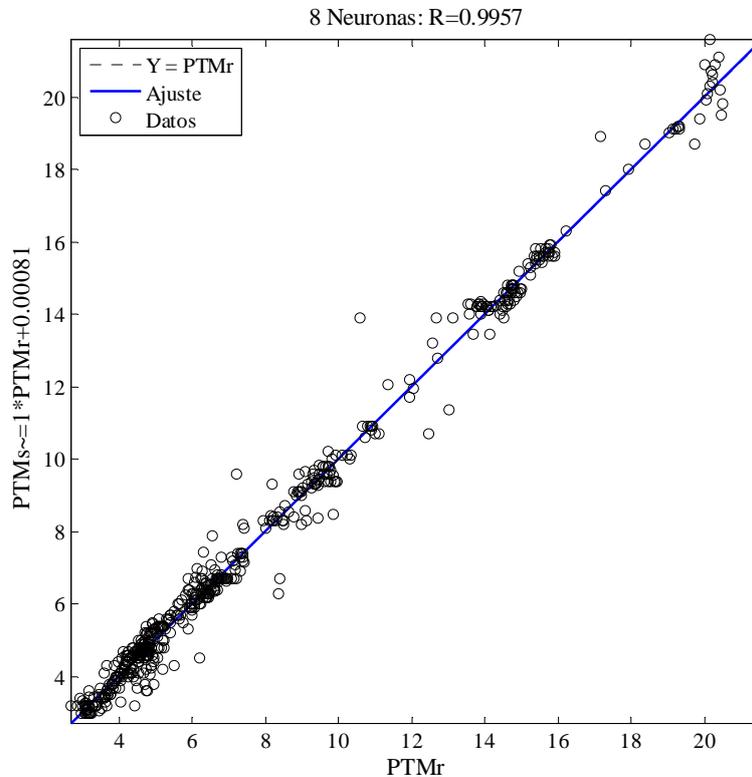


Figura 33. Regresión lineal de la PTM real y simulada

7.2.3 Construcción y estudio de la RNA 2

Generalmente los modelos de redes neuronales al igual que los modelos empíricos funcionan mejor para la interpolación que para la extrapolación de los datos. Para los sistemas de MBR el control del proceso se enfoca tanto en el rendimiento del biotratamiento, como en el adecuado mantenimiento de las membranas; prevenir y mitigar su ensuciamiento son aspectos claves para la correcta operación del sistema. Por esta razón predecir la PTM es de gran utilidad para establecer la frecuencia de las limpiezas físicas y químicas de las membranas.

A partir de los datos del primer periodo de operación (45 días de operación), y el conjunto de variables A se simularon diversas arquitecturas de redes con una capa oculta. La capacidad de extrapolación fue evaluada utilizando el coeficiente de correlación entre los datos simulados y los reales del segundo periodo de operación.

Los resultados que se presentan en la Figura 34 y la Figura 35 corresponden a una red de 8 neuronas en la capa oculta con un factor de correlación para el primer periodo de $R_{\text{periodo 1}}=0.9502$ y de $R_{\text{periodo 2}}=0.9731$ para el segundo periodo. La grafica comparativa de la evolución de la PTM medida y simulada que se presenta en la Figura 35 evidencia un ajuste adecuado para todos los periodos de operación del sistema. El coeficiente de correlación para todos los datos fue $R_{\text{global}}=0.9540$.

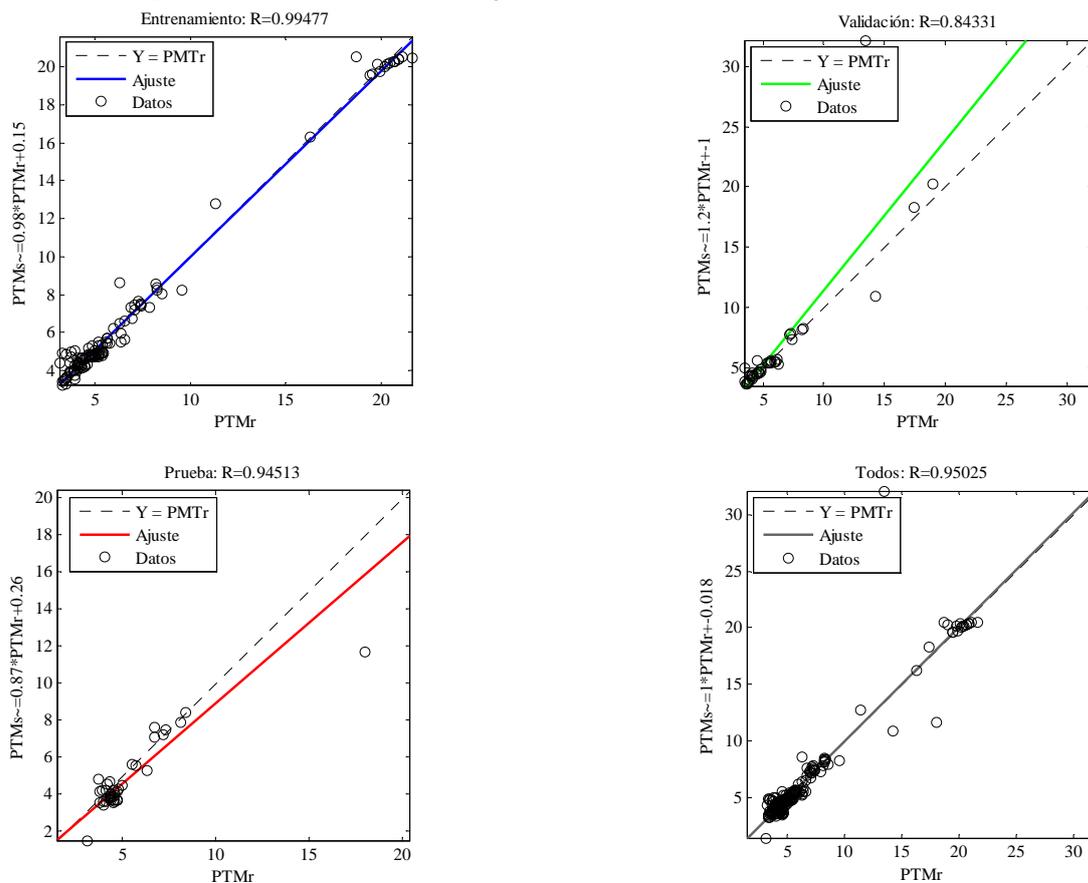


Figura 34. Regresión lineal de la PTM real y simulada para el entrenamiento, validación, prueba y el total de datos del primer periodo de operación (8 neuronas, conjunto A)

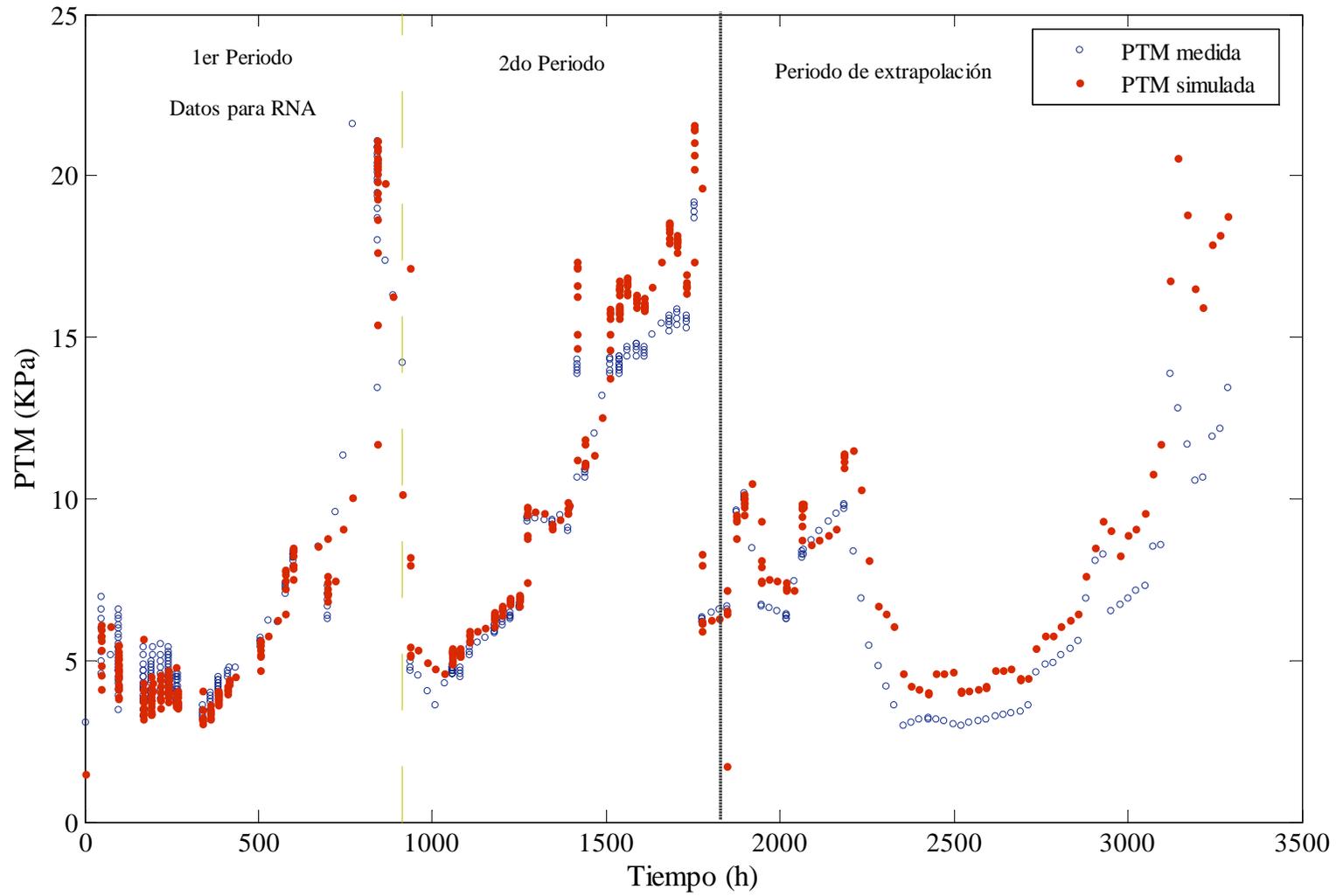


Figura 35. Evolución de la PTM medida y simulada (8 neuronas, conjunto A)

8. CONCLUSIONES

Las estructuras RNAs fueron desarrolladas para predecir la evolución de la PTM a partir de variables operativas que interfieren en los procesos de ensuciamiento de la membrana para un sistema MBR utilizado en el tratamiento de aguas residuales urbana, ajustan los datos experimentales con una buena precisión utilizando solo ocho neuronas en la capa oculta.

La correlación que existe entre los estados anteriores de ensuciamiento correspondientes a diferentes retardos ($PTM_0(t-1)$, $PTM_01(t-2)$, $PTM_02(t-3)$, $PTM_03(t-4)$) y la PTM es significativamente alta, por tratarse de un proceso de membranas donde es predominante el incremento de la cantidad de sólidos acumulados sobre la superficie. La inclusión de estos parámetros como variables de entrada al modelo permite una adecuada predicción de la PTM.

La arquitectura de la RNA 1 en la cual se incluyeron como variables de entrada el flujo de permeado, los SSLM, el tiempo modificado, el número de ciclos, el contralavado químico, la $PTM_0(t-1)$, la $PTM_01(t-2)$, y el tiempo total, cuenta con ocho neuronas en la capa oculta, y construida utilizando los datos obtenidos durante todo el periodo de operación del MBR presenta un gran potencial para la interpolación.

La RNA 2 se desarrolló usando los datos del primer periodo de operación y el conjunto A que contenía las variables ;flujo de permeado, SSLM, tiempo modificado, número de ciclos, contralavado químico, $PTM_0(t-1)$, $PTM_01(t-2)$, $PTM_02(t-3)$, $PTM_03(t-4)$ y temperatura. La capacidad de extrapolación para esta topología fue evaluada utilizando el coeficiente de correlación entre los datos simulados y los reales del segundo periodo de operación. Ocho neuronas en la capa oculta fueron necesarias para obtener una adecuada predicción de la PTM para el 3er y 4to periodo.

Durante los cuatro periodos de operación de la planta piloto MBR el promedio de eliminación de DQO registró un valor del 95%, lo que demuestra una alta eficiencia en el tratamiento aerobio. Adicionalmente mediante los conteos microbiológicos realizados se comprueba la eficacia del sistema para la retención de los coliformes totales y fecales.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] F. J. Iturbe, S. López. *Procedimientos de diagnóstico clínico y ortoprotésica*. Vol. III. Editorial CEP, S.L. Madrid. (2009). 136 – 137
- [2] J. G. Henry, G. W. Heinke. *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall, México. (1999)
- [3] J. J. Salas Rodríguez. *Tecnologías de Depuración: Situación Actual y Perspectivas. IV Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación del Agua*. Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Num. 4. Tarragona, España. Fundación Nueva Cultura del Agua. (2004). 513-522
- [4] C. Wisniewski. *Membrane bioreactor for water reuse*. *Desalination* 203 (2007) 15–19
- [5] K. V. Gernaey, M. C.M. van Loosdrecht, M. Henze, M. Lind, S. B. Jørgensen. *Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art*. *Environmental Modelling & Software* 19 (2004) 763–783
- [6] Jeppsson, U. *Modelling aspects of wastewater treatment processes*. Tesis Doctoral, Lund Institute of Technology, Sweden. 1996. Disponible en <http://www.iea.lth.se/publications>
- [7] S. Judd. *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Elsevier Oxford. (2007)
- [8] P. Le-Clech, V. Chen, T. A.G. Fane. *Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment*. *Journal of Membrane Science* 284 (2006) 17–53.
- [9] F. Meng, S. Chae, A. Drews, M. Kraume, H. Shin, F. Yang. *Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material*. *Water Research* 43 (2009) 1489 – 1512
- [10] G. R. Shettya and S. Chellam. *Predicting membrane fouling during municipal drinking water nanofiltration using artificial neural networks*. *Journal Membrane Science*. 217 (2006) 69-86

-
- [11] A. Abbas, N. Al-Bastaki. *Modeling of an RO water desalination unit using neural networks*. Chem. Eng. J. 114 (2005) 139–143
- [12] Ö. Çınar, H. Hasar, C. Kinaci. *Modeling of submerged membrane bioreactor treating cheese whey wastewater by artificial neural networks*. J. Biotechnol. 123(2006)204–209
- [13] I.N Da Silva, R.A.Flauzino. *An approach based on neural networks for estimation and generalization of crossflow filtration processes*. Appl. Soft Comput. 8 (2008) 590-598
- [14] W. Yang, N. Cicek, J. Ilg. *State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America*. Journal of Membrane Science 270 (2006) 201–211
- [15] K. Kimura, T. Naruse, Y. Watanabe. *Changes in characteristics of soluble microbial products in membrane bioreactors associated with different solid retention times: Relation to membrane fouling*. Water Research 43 (2009) 1033-1039
- [16] I.S. Chang, P. Le-Clech, B. Jefferson, S. Judd. *Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment*. Journal of Environmental Engineering 128 (2002) 1018–1029
- [17] H.C. Flemming, J.Wingender. *Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs). Part I. Structural and ecological aspects*. Water Science and Technology. 43 (2001) 1–8
- [18] Z. Geng, E. R. Hall. *A comparative study of fouling-related properties of sludge from conventional and membrane enhanced biological phosphorus removal processes*. Water Research 41 (2007) 4329–4338
- [19] C.V. Smith, D. O. Gregorio, R. M. Talcott. *The use of ultrafiltration membrane for activated sludge separation*. Proc 24rd Ind. Waste conf., Purdue University, Ann Arbor, USA, 1300– 1310
- [20] T. Stephenson, S. Judd, B. Jefferson and K. Brindle. *Membrane bioreactors for wastewater treatment*. IWA-publishing, London. (2000)
- [21] K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood, T. Matsuo. *Direct solid–liquid separation using hollow fiber membrane in an activated-sludge aeration tank*. Water Sci. Technol. 21 (1989) 43–54
- [22] B. Lesjean, E.H. Huisjes. *Survey of the European MBR market: trends and perspectives*. Desalination 231 (2008) 71–81

- [23] S. Hanf. *Membrane bioreactors in the changing world water market*. Business Communications Company Inc. report C-240. (2006)
- [24] R. L Harvey. *Neural networks principles*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. (1994)