

Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Estado actual y perspectivas

Ramon Vilanova^{a,*}, Ignacio Santín^a, Carles Pedret^a

^aDepartamento de Telecomunicaciones y de Ingeniería de Sistemas, Escuela de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain

Resumen

Este trabajo constituye la segunda parte de una revisión de la problemática del control de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) para el tratamiento de agua residual urbana. Después de haber presentado en la primera parte las perspectivas correspondientes al modelado y simulación, en esta segunda parte nos centramos en el control de las mismas. Esta depuración se realiza, mayoritariamente, mediante procesos biológicos, concretamente, mediante el denominado proceso de fangos activados. El hecho de tratar con un proceso biológico conlleva una elevada complejidad tanto desde el punto de vista de modelado como, por supuesto, de control. Se revisa el control de EDAR desde su perspectiva histórica, como de los lazos de control más usuales, problemáticas que presentan y algunas de las soluciones propuestas. Se realiza también una revisión de la aplicación de las diferentes técnicas de control catalogándolas de acuerdo a su filosofía. Para terminar se ofrece una visión de las tendencias actuales y perspectivas de desarrollos futuros.

Palabras Clave:

Estaciones depuradoras de aguas residuales, *benchmarking*, control y operación

1. Introducción

En los últimos años ha aumentado el interés en los problemas de operación y control de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR), debido a las regulaciones, cada vez más exigentes sobre la calidad del agua y a efectos de que el agua tratada pueda ser utilizable en otras actividades. Por esta razón, es fundamental diseñar plantas de tratamiento capaces de satisfacer las restricciones ambientales cada vez más exigentes, al menor coste posible.

En lo referente a las aguas residuales urbanas, los procesos de tratamiento son esencialmente de tipo biológico. Esto es debido a que, de alguna manera, emulan los procesos de biodegradación presentes en la naturaleza en las mismas aguas receptoras (ríos, lagos, etc.). El proceso de fangos activados permite plantear estos procesos de biodegradación de manera controlada en una EDAR. El control y operación del mismo será determinante en el nivel de eficiencia y eficacia que se consiga. Este artículo constituye la segunda parte de una revisión en la que se aborda esta problemática de control. Mientras que en la

primera parte, Vilanova et al. (2017), se presentaron de manera extensa las características de una EDAR y su modelado, en esta segunda parte nos centramos en el control de las mismas.

¿Cuáles son los objetivos de control en una EDAR? Este es uno de los aspectos que hace que el control de este tipo de plantas tenga tantas posibilidades: no hay una formulación clara y concreta de los objetivos de control sino que supone un problema que presenta diferentes facetas y resulta claramente multidimensional y abierto a interpretaciones. Una de las características más particulares de las EDAR respecto a otras industrias es la amplia variedad de perturbaciones y variaciones de las características del afluente a tratar. Estas variaciones se mueven en magnitudes que generalmente sobrepasan las usuales en otro tipo de industrias. Pueden ir desde las causadas por variaciones estacionales a las variaciones diurna/nocturna determinadas por la actividad humana. A su vez también hay perturbaciones que podríamos calificar de tipo *evento* como las causadas por una lluvia, tormenta, picos de concentración debido a algún vertido, etc. Una extensa presentación de esta situación específica de las plantas de tratamiento puede encontrarse en Olsson y Newell (1999), Ingildsen (2002). Otro aspecto que determina la complejidad de una EDAR como objeto de control es el hecho de estar tratando con un sistema biológico. Especialmente con la eliminación de nutrientes se introdujeron retos que han incrementado la complejidad del proceso de tratamiento en compa-

* Autor en correspondencia

Correos electrónicos: Ramon.Vilanova@uab.cat (Ramon Vilanova),
Ignacio.Santin@uab.cat (Ignacio Santín), Carles.Pedret@uab.cat
(Carles Pedret)

ración con los sistemas iniciales en los que tan solo se operaba para tratar cargas de materia orgánica y sólidos en suspensión.

Los diferentes aspectos ambientales han ido propiciando la importancia de la eliminación de nutrientes a la vez que desarrollado la exploración de diferentes configuraciones de plantas con el fin de explotar los procesos de nitrificación/denitrificación, los cuales han sido a su vez complementados por los procesos propios de la eliminación biológica de fósforo. Esto ha llevado a las plantas de tratamiento de aguas residuales una creciente complejidad en la que para poder asegurar una operación eficiente de las mismas se hace patente la necesidad de estrategias de control y operación avanzadas.

Como paso previo a presentar los enfoques y planteamientos que se han ido sucediendo para atender estos problemas de control, se presenta en primer lugar, aunque de una manera sucinta, la problemática y los aspectos que se consideran en la definición del problema de control de una EDAR desde una perspectiva genérica.

Puesto que una EDAR contiene una amplia diversidad de lazos de control potenciales, cada uno afectando al proceso global de una forma muy característica, pero no independiente del resto, resulta especialmente interesante realizar un repaso al control de las diferentes unidades de proceso junto con algunas de las propuestas que se encuentran en la literatura. Esta presentación de las estrategias de control se complementa con una visión panorámica en la que los trabajos se catalogan de acuerdo a las características de las técnicas de control empleadas: control clásico (PI/PID, cascada, etc.), heurístico (*fuzzy*, basado en reglas, redes neuronales, etc), y basado en modelos (óptimo, predictivo, adaptativo, etc). Sin pretender dar una relación exhaustiva de todos los trabajos, se ha intentado que fuera lo más representativa posible. En cualquier caso, sirve para ilustrar que dentro del control de EDAR la actividad en cuanto a planteamiento de diversidad de enfoques y soluciones de control es más que notable.

El trabajo finaliza con una exposición de las principales tendencias actuales y presentando aquellas líneas de trabajo más cercanas a la ingeniería de control en las que está teniendo lugar la actividad de investigación en la actualidad. Se resaltan aquellas consideraciones que se están incorporando de una manera generalizada en diferentes campos de aplicación y, como no, también en el del control de EDAR. Estas consideraciones están ligadas a la sostenibilidad y al impacto medioambiental desde una perspectiva más amplia que puramente el del vertido del agua residual ya depurada.

2. Control de EDAR

Los objetivos que se persiguen al automatizar una EDAR no son, en el fondo, diferentes de los que se pudieran establecer para cualquier otra planta en un sector industrial diferente. No obstante sí que es conveniente presentarlos, como etapa previa a presentar las principales soluciones de control que se han formulado en la literatura y así poder entender mejor la orientación de las mismas. Asimismo, a pesar de ser unos objetivos perfectamente formulables en otro dominio, sí es importante

aprovechar para resaltar las particularidades que comportan en una EDAR.

Mantener la planta en funcionamiento: Asegurar el correcto funcionamiento de los diferentes componentes implicados en la operación de la planta (bombas, sopladores, válvulas, motores, etc.) y asegurar que los diferentes instrumentos proporcionan y reciben las señales apropiadas. Este funcionamiento básico también incluye lazos de control básico concebidos como actuación de planta y que no tienen una vinculación directa con la calidad del efluente (control de nivel, flujo, presión de aire, etc.).

Obedecer a los requerimientos de calidad del efluente: El objetivo principal de una EDAR es asegurar que el efluente cumpla con los requisitos de calidad establecidos por la normativa vigente. Estos requisitos acostumbran a exigir unos niveles umbral para determinadas concentraciones de contaminantes así como para sus valores medios. Puesto que estos contaminantes no son variables directamente controladas, la operación debe considerar variables de la planta que tienen repercusión en la capacidad de tratamiento y, por tanto, en la calidad del efluente. Casos típicos son el control de la concentración de Oxígeno Disuelto en los reactores, el control de la adición de precipitadores químicos, el control del tiempo de vida de los fangos, etc. Cada una de las unidades de proceso que constituyen la planta puede incluir uno o varios de estos controles básicos.

Minimizar los costes de operación: Producir a menor coste podríamos decir que es un objetivo básico en cualquier industria productiva. No obstante, éste adquiere especial relevancia en el caso de una EDAR puesto que no estamos tratando con un proceso productivo. El producto final en una EDAR es el efluente que acaba vertiéndose en los cauces receptores, usualmente un río, y que debe estar acorde a unos niveles determinados de contaminantes. Este producto no es *algo* que genere un beneficio directo para la EDAR. En este sentido, cualquier medida que ayude a minimizar los costes de operación es bien recibida. No obstante, dichas medidas, no pueden implicar una pérdida de los niveles de calidad. Un ejemplo típico es el ahorro de energía que supone el trabajar con consignas variables para el oxígeno disuelto, solicitando actividad a los correspondientes motores y bombas únicamente cuando es necesario. En este caso nos estaríamos refiriendo, obviamente, a un ahorro del recurso energía, siendo deseable, no obstante, un ahorro en cualquier otro recurso posible.

Integrar la operación a nivel de planta: En este caso, estaríamos hablando de satisfacer los requerimientos de calidad del efluente, a la vez que minimizar el coste necesario para ello y, simultáneamente, intentar maximizar el rendimiento de los equipamientos disponibles (intentar aprovechar todas las medidas disponibles, fuentes de información, etc.). Aquí se plantearía también la operación

coordinada de las diferentes unidades de proceso con el fin de sacar el máximo partido posible a los volúmenes de reacción disponibles, fangos activados, etc. y así poder minimizar el impacto de las perturbaciones (las más importantes son las variaciones en el caudal y concentraciones de entrada a la planta) en los receptores finales del agua tratada.

En contraposición a los objetivos expuestos e intereses en la automatización y control de una EDAR, hay algunos factores que claramente suponen una limitación. Entre ellos el económico es quizás el más claro. Puesto que la industria del tratamiento de aguas residuales es, básicamente, una industria no productiva, la automatización de la misma no ha estado muy implantada. A pesar de los beneficios, claros, que ésta puede reportar a nivel de garantías de operación, la automatización se ha considerado más un gasto que una inversión. En este sentido, es complejo que se incluya en las consideraciones iniciales de construcción de la planta. En vez de este enfoque, la automatización se va incorporando paulatinamente en fases posteriores.

3. Lazos de control más usuales

En esta sección se van a presentar los lazos de control más usuales en un EDAR basada en el proceso de fangos activados. Estos lazos de control se corresponden con las principales variables objeto de control y en ocasiones se abordan, ya sea de manera individual o combinando diversas de ellas, con el propósito de conseguir el objetivo último que es el de mantener la calidad del efluente. Esta presentación se realiza sin prestar mucha atención a los controladores usados ni al objetivo y planteamiento de la unidad de proceso correspondiente.

3.1. Control del oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto en los procesos de fangos activados está considerada como uno de los parámetros de control más importantes en una EDAR. Una baja concentración de oxígeno disuelto afecta al crecimiento de los microorganismos pudiendo provocar la aparición de bacterias filamentosas, mientras que concentraciones elevadas suponen un excesivo consumo energético y además afectan negativamente al proceso de desnitrificación. Cabe destacar que el coste energético asociado a la aireación puede suponer más del 50 % del coste energético global de una EDAR. Por tanto, es conveniente mantener una concentración de oxígeno disuelto adecuada, tanto por razones económicas como por razones de estabilidad del proceso.

El aporte de oxígeno a los reactores se realiza mediante compresores, determinándose el aire que finalmente entrará en los reactores mediante una o más parrillas de difusores independientes (ubicadas en la base del reactor) y una válvula de control que permite regular el caudal de aire que suministran dichas parrillas. La concentración de oxígeno disuelto en cada una de las zonas aerobias se controla modificando la apertura de las rejillas difusoras o bien actuando sobre la válvula de control.

Uno de los primeros esquemas interesantes de control de oxígeno disuelto lo encontramos en Bracken y Flanagan (1977),

presentando una acción *feedforward* en base a un precálculo del aire deseado y un control en cascada de la concentración de oxígeno disuelto. En Olsson et al. (1985) se presenta un enfoque basado en un controlador *self-tuning*. Este controlador va comparando la acción de control (flujo de aire) y la respuesta en la concentración de oxígeno disuelto, ajustando continuamente los parámetros del controlador de manera que se consiga que la concentración se ajuste a la referencia deseada. Es también muy conocido el trabajo de Lindberg y Carlsson (1996a) donde se presenta una estrategia de diseño de un controlador de oxígeno disuelto no-lineal, en base a la ecuación de transferencia del oxígeno que es no lineal. La importancia de un buen control de oxígeno disuelto ha quedado enfatizada por el desarrollo de sensores de nutrientes puesto que el control de los mismos ha conllevado la necesidad de un ajuste continuo de los niveles de oxígeno.

En este punto es importante resaltar problemáticas adicionales que pueden surgir respecto a la posibilidad de un aporte continuo de oxígeno. Desde un punto de vista práctico, son muchas las EDAR en las que actualmente la operación consiste en una decisión lógica de tipo on-off relativa a las válvulas que determinan el aporte final de oxígeno o, en algunos casos, relativa a los mismos motores que proporcionan el aporte de oxígeno a los difusores. En Cristea et al. (2011) se plantean estas consideraciones de operación en base a una formulación de control predictivo híbrido, conjugando variables binarias con variables continuas. El algoritmo propuesto incluye de manera simultánea tanto objetivos económicos como de control.

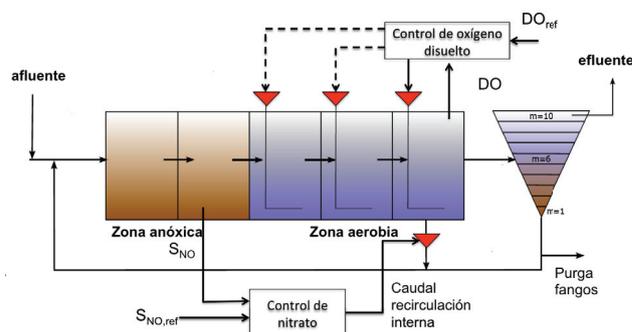


Figura 1: Esquema de una EDAR mostrando la actuación sobre el caudal de recirculación interna para el control de nitratos así como control de oxígeno disuelto en la zona aerobia. Aunque la acción puede centrarse en el último reactor, también hay opciones que contemplan determinar las actuaciones en los reactores anteriores.

3.2. Control de nitratos (recirculación interna)

En este caso, la variable manipulada es la recirculación interna con el objetivo de ayudar a mantener la concentración de nitratos en la zona anóxica a los niveles deseados. Este caudal de recirculación puede controlarse mediante un sensor de nitratos al final de la zona anóxica. De esta forma se asegura una utilización completa del volumen de desnitrificación y, así, conseguir una mejor eliminación de nitrógeno. Por tanto, el objetivo de este lazo es asegurar que en la zona anóxica haya

suficiente concentración de nitratos. Idealmente, la concentración a la salida del reactor anóxico debe ser baja pero no zero. En Yuan et al. (2002b), por ejemplo, se derivan las condiciones para un controlador simple pero que asegure una determinada robustez, mientras que en Peng et al. (2005) se presenta un controlador *fuzzy* para esta misma tarea. En Baeza et al. (2004) se analizan los efectos de la recirculación interna en el grado de eficiencia para una planta con una configuración A^2/O . En el trabajo de Yong et al. (2006b) se analizan diferentes estructuras de control, complementando la acción básica de recirculación de nitratos y adición externa de carbono. Todas ellas están orientadas a la eliminación de nitrógeno.

3.3. Control de la recirculación de fangos (recirculación externa)

La recirculación de fangos desde el decantador secundario, denominada recirculación externa, puede también considerarse como una variable manipulada, siendo el objetivo básico de este control el de mantener los fangos dentro del sistema, Olsson y Newell (1999). Básicamente, hay dos enfoques para el control de este caudal de recirculación: mantener un caudal constante o mediante un control de relación. En este último caso, el objetivo es mantener constante la relación entre el caudal de entrada a la planta y este caudal de recirculación.

No obstante, tal como se discute en Olsson y Newell (1999), una adecuada recirculación de fangos tiene otras repercusiones. Así por ejemplo, si se utiliza, también, para monitorizar la capa de fangos del sedimentador, puede ayudar a la eliminación del nitrógeno. A su vez, tampoco conviene dejar los fangos demasiado tiempo en el decantador ni dejar que la capa de fangos crezca demasiado. Conviene por tanto coordinar el caudal de recirculación con épocas de lluvias fuertes o tormentas. Este tipo de consideraciones son tomadas en cuenta en Yuan et al. (2002a) donde se propone un controlador de dos niveles. En Lynggaard-Jensen et al. (2010) se extienden las consideraciones al caso en que la EDAR disponga de varios decantadores secundarios.

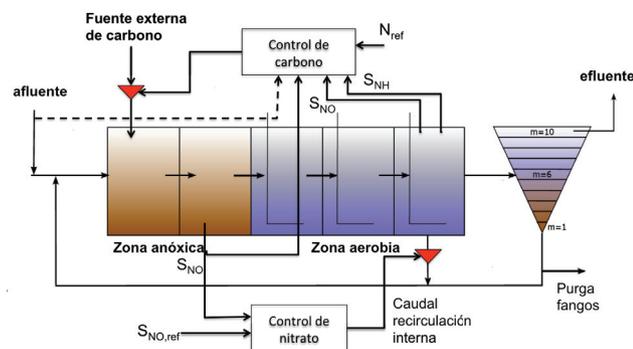


Figura 2: Esquema de una EDAR mostrando el control de nitratos en la zona anóxica. A la actuación sobre el caudal de recirculación interna se le puede usar la adición de carbono desde una fuente externa en base a información de las concentraciones en zonas anóxica, aerobia y, también, considerando una acción *feedforward* desde influente.

3.4. Control de la adición de carbono externo

Cuando el control de nitratos mediante la recirculación interna no es suficiente para que se alcancen los objetivos establecidos de eliminación del nitrógeno, entonces una opción usual es esta adición de carbono. De esta forma, manipular la adición de carbono es, con el objetivo de mantener una baja concentración de nitrato en la zona anóxica. Esta adición de carbono debe controlarse pues se trata de un recurso caro. En Lindberg y Carlsson (1996b) se presenta un control adaptativo para esta dosificación de carbono, mientras que en Ingildsen et al. (2002) se propone una estructura de control mediante un par de lazos en cascada y coordinados con el lazo de control de la recirculación interna. De esta forma se intenta minimizar en cada instante la cantidad de carbono añadida y, por tanto, minimizar costes. En este caso, todos los controladores son simples controladores PI. Posteriormente, Yuan y Keller (2003) proponen un sistema integrado, también coordinando la adición de carbono y la recirculación de nitratos mediante un sistema de cuatro lazos de control, consiguiendo minimizar los costes y satisfaciendo los límites de nitratos en el efluente.

3.5. Control para eliminación de nitrógeno

La eliminación de nitrógeno se gestiona mediante una combinación de los dos controles expuestos anteriormente: combinación de actuación en la recirculación interna y control de la adición de carbono externo. En Yong et al. (2006b) se analizan diferentes configuraciones basadas en los dos lazos de control mencionados, analizando el rendimiento de cada una de ellas en términos de costes de operación y satisfacción de las restricciones en el efluente. Otra perspectiva diferente es la que se presenta en Samuelsson et al. (2007) en el que se realiza una búsqueda de los puntos de consigna óptimos para los dos lazos, obteniendo lo que se denomina un mapa de operación de la planta atendiendo a los compromisos entre costes de operación y requerimientos de calidad. En el caso de Stare et al. (2007b) se proponen también estrategias basadas en costes de operación y los criterios de evaluación tal como se establecen en el BSM1. En este caso, además de la adición de carbono y la recirculación, se actúa también sobre las consignas de oxígeno.

3.6. Control de amonio

El nivel de amonio se suele gestionar mediante un sensor en la salida de la planta. En concreto, en la salida del último reactor y actuando sobre la aireación de los reactores aerobios. Esta aireación se acostumbra a realizar mediante un control en cascada en el que el controlador de amonio determina los valores de consigna para los controladores de oxígeno disuelto. El control del oxígeno puede realizarse de diferentes formas dependiendo del volumen de aireación que se quiera controlar. Este aspecto es analizado en Ekman et al. (2006), en el que las concentraciones de oxígeno disuelto en los diferentes compartimentos se determinan en un nivel de control superior. De esta forma, el control de amonio suele precisar de perfiles de oxígeno disuelto variantes en el tiempo. A su vez, estos perfiles variables de oxígeno, suelen conllevar un considerable ahorro de energía respecto a soluciones en las que el nivel de oxígeno se mantiene

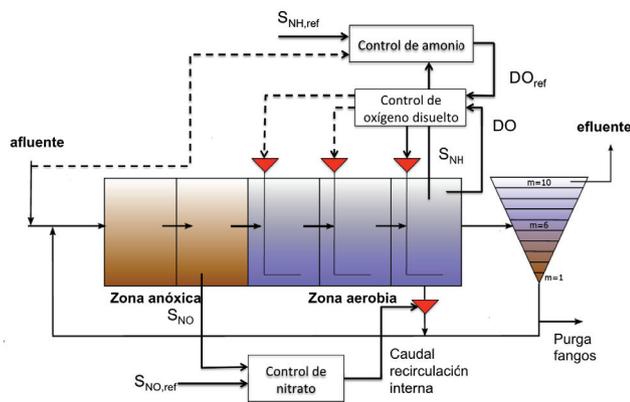


Figura 3: Esquema de una EDAR mostrando el control de nitratos en la zona anóxica junto con el control de amonio mediante un control en cascada sobre el nivel de oxígeno disuelto en la zona aerobia. Este control que determina el set-point del oxígeno disuelto puede incluir información *feedforward* desde el influente.

constante. La principal razón proviene del margen de seguridad que se acostumbra a dejar respecto al nivel de oxígeno necesario, siendo por lo general más elevado de lo necesario y, por tanto, conllevando un consumo innecesario. Si existe la posibilidad de instalar otro sensor a la entrada de la planta, esta actuación en cascada puede complementarse con un controlador *feedforward* que ayudará a minimizar el efecto de las variaciones de carga en la entrada de la planta.

3.7. Control de la adición de químicos para precipitación

De manera similar a la adición de carbono para mantener los niveles de nitratos, cuando nos enfrentamos a la eliminación de fósforo, puede utilizarse también la adición de químicos (generalmente sales de hierro o aluminio). No obstante, esta técnica de precipitación era más usual antes de que se popularizara el uso de la eliminación biológica. Con la adición de estos químicos se consigue que las moléculas de fosfatos formen flocúlos que pueden eliminarse por sedimentación.

El proceso de precipitación química es bastante más rápido que las reacciones biológicas. Por tanto, desde el punto de vista de la escala de tiempo de éstas, puede considerarse que tiene lugar instantáneamente. Por tanto, una perturbación o variación en la composición de entrada puede afrontarse mediante un lazo de control. Así, en Ingildsen (2002) se propone una estrategia de control basada en un sensor de fosfato. De esta manera se puede controlar la dosificación de químicos, obteniendo una mejora en los costes asociados a los mismos.

4. Enfoques

Con el fin de complementar la presentación anterior, en esta sección se muestran los diferentes trabajos que han ido apareciendo en relación al control de EDAR catalogándolos de acuerdo al tipo de estrategia de control utilizada. En algunos casos esta catalogación es difícil puesto que algunas de las configuraciones combinan diferentes soluciones. Desde la aparición de los modelos ASM y las plataformas *benchmark* han surgido una

enorme cantidad de trabajos con propuestas de control en diversos ámbitos. La relación de trabajos y enfoques es por tanto bastante amplia. Sin la intención de que sea totalmente completa esta sección presenta los trabajos más representativos de la actividad que hasta la actualidad ha tenido lugar en lo que respecta al control de EDAR. Esta revisión de trabajos se presenta catalogándolos de acuerdo a las siguientes divisiones:

1. Control clásico: control on/off, PI/PID
2. Control heurístico: control basado en reglas, control fuzzy, técnicas de inteligencia artificial, etc.
3. Control basado en modelos: control predictivo, robusto, óptimo, adaptativo, no-lineal
4. Control supervisor y control total de planta

4.1. Control clásico

En esta categoría, encontramos la aplicación de estrategias de control básicas generalmente basadas en controladores de tipo PI/PID. Su mayor ámbito de aplicación ha sido en el control de la concentración de oxígeno disuelto, con los primeros trabajos como por ejemplo los de Stepner y Petersack (1974) y Marsili-Libelli (1989). Posteriormente, con la disponibilidad de los sensores de nutrientes, aparecen propuestas de control de nitrato y amonio mediante controladores de lazo simple (recirculación de nitratos) y estructura en cascada (para el amonio). En Singman (1999) se utilizan dos lazos simples basados en PID para regular la adición externa de carbono y la recirculación de nitratos, mientras que en Yuan y Keller (2003) se utiliza una estructura basada en controladores PID conjuntamente con un relé para activar/desactivar determinados lazos dependiendo de la carga a que se someta la planta. En Ingildsen et al. (2002) se presenta una metodología basada en la elección de las consignas para los PI de oxígeno y recirculación interna de nitrato para conseguir un balance entre coste y calidad del efluente. La opción de controlar el amonio en base a una configuración en cascada con las referencias de oxígeno resultó ser la que mejores beneficios ambientales y económicos daba en relación a otras basadas únicamente en lazo simple. Esta conclusión se presenta en Benedetti et al. (2010) donde se realiza un análisis basado en simulaciones de Monte Carlo. Estas estructuras básicas se han visto complementadas, en ocasiones, por una compensación *feedforward* a partir de medidas del afluente. Son diversos los trabajos que han aplicado variaciones de éstas. Así, en Samuelsson y Carlsson (2001) se utilizan controladores PI junto con una acción *feedforward* basada en medidas del afluente. En Krause et al. (2002a) se utiliza esta acción *feedforward* basada en una medida de la carga de amonio en la entrada para la determinación de las consignas de oxígeno así como el número de reactores que se mantienen en aireación. En Stare et al. (2007b) se realiza una comparación de varias configuraciones de control basadas en diferentes controladores PI y complementados con acciones *feedforward* para la adición de carbono externo.

Estas configuraciones se evalúan desde el punto de vista de los costes de operación asociados (sobre todo a las diferentes posibilidades de adición de carbono) y su eficiencia en la eliminación de nitrógeno. Una estructura similar se presenta en

Vrečko et al. (2006). En Vilanova et al. (2011) se aplican diferentes estructuras cascada/feedforward basadas en controladores PID para la eliminación de nitrógeno. En Barbu et al. (2017) se evalúan diferentes estrategias de control, todas ellas implementadas con controladores PI, con especial interés en su efecto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una extensión del controlador PID al caso multivariable (MPID) se presenta en Wahab et al. (2009). Los trabajos se basan en modelos obtenidos mediante técnicas de identificación y se analizan diferentes estrategias de sintonía de controladores MPID. Se considera una estructura 3x3 para el control del DO en cada uno de los tres reactores aerados y otra configuración para el DO en el último tanque y el nivel de nitratos al final de la zona anóxica. En Vilanova et al. (2009) se comparan las estructuras PI multivariables en configuración centralizada y descentralizada, observándose que es perfectamente viable una configuración multilazo.

4.2. Control heurístico

Dado que en los enfoques de control clásico la selección del controlador o estructura de control está basada en las estrategias de operación del proceso, para el diseño y ajuste de los controladores es preciso un considerable conocimiento tanto de las dinámicas del proceso como de la ingeniería de control asociada. Además, las estrategias de control heurístico se fundamentan en la aplicación de las heurísticas ligadas a la operación del proceso.

4.2.1. Control basado en reglas

Los sistemas expertos recibieron gran atención a finales de los años 80, teniendo grandes expectativas como herramientas de ayuda a la decisión: Vitasovic y Andrews (1989), Olsson et al. (1989), Maeda et al. (1990), Barnett y Andrews (1990). En Krause et al. (2002b) una configuración *feedback/feedforward* para el control de DO con determinación de las consignas de DO se combina con un sistema basado en reglas que decide la aplicación de incrementos/decrementos sobre dichas consignas en base a la determinación de las diferentes regiones de operación. En Baeza et al. (1999), Baeza et al. (2002) y Rodríguez-Roda et al. (2002) se presentan aplicaciones basadas en supervisión inteligente aplicando un sistema experto en conjunción con controladores de bajo nivel. Se presentan aplicaciones a planta piloto para mostrar su aplicabilidad.

Sin embargo, a finales de los años 90, se empezó a dudar de su utilidad real Olsson et al. (1998). Las principales causas de la falta de interés fueron su complejidad y la incapacidad de captar de manera apropiada el conocimiento disponible. Otro motivo reside en el hecho de que la construcción de una base de conocimiento amplia y, sobretudo, útil, es una tarea específica para cada planta, requiriendo no sólo la definición de reglas sino también de valores de parámetros concretos.

4.2.2. Control Fuzzy

En contraposición a los planteamientos basados en reglas, el enfoque mediante lógica *fuzzy*, Chen y Pham (2000) por ejemplo, ha tenido más éxito, proponiéndose diferentes soluciones

todavía en nuestros días. En base a este planteamiento, el uso de control *borroso* puede plantearse como una alternativa razonable en sistemas de tratamiento de aguas residuales en caso de no disponer de una representación analítica del sistema o de considerar que el modelo matemático es demasiado complejo para poderlo incorporar en el cálculo del controlador mediante métodos o enfoques clásicos. Un enfoque basado en lógica borrosa podría resultar también atractivo cuando los objetivos de control no puedan especificarse de una manera muy precisa. En Jager (1995) se diseña un controlador Fuzzy basado en un funcionamiento de tipo PI combinado con reglas lingüísticas que permiten mejorar el rendimiento de un controlador PI clásico. En Serralta et al. (2002) se utiliza un sistema de supervisión basado en lógica fuzzy para el control de DO y de nitrato. En Nasr et al. (2014) también se aplica un controlador fuzzy para el lazo de control de DO y se compara con controladores PI y métodos on/off, obteniendo una reducción en la energía de aireación, así como mejoras en la calidad del agua. Esta comparación se aborda también en Santín et al. (2015a) donde se elaboran unos mapas de sintonía que muestran el grado en que se pueden mejorar, de manera simultánea, los costes de operación y la calidad del afluente en base a la sintonía del controlador Fuzzy que opera a un nivel superior proporcionando las consignas del oxígeno disuelto. En la figura (4) se muestra el mapa correspondiente a la época seca.

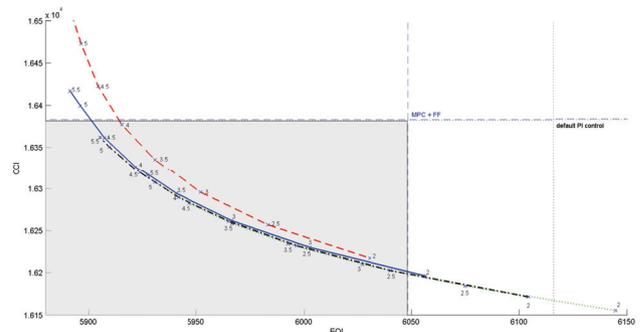


Figura 4: Mapa de sintonía para el controlador Fuzzy de nivel superior que permite mejorar de manera simultánea la calidad del afluente y los costes de operación. Aparecen como referencia el control PI por defecto en BSM1 así como el controlador predictivo sin referencias variables.

En Meyer y Pöpel (2003) se aplica la lógica fuzzy para determinar las consignas en un control de DO y la relación entre los volúmenes de las zonas anóxica y aerobia. Este enfoque se amplía en Yong et al. (2006a) con la determinación, además de los set-points de DO, del control de la adición de carbono externo. El control basado en lógica borrosa ha sido aplicado, también, para controlar la acumulación de fangos sedimentados en el decantador secundario Traoré et al. (2006), Zhu et al. (2009). También ha sido aplicado para controlar la adición de carbono externa y la recirculación interna de nitratos en Peng et al. (2005).

A un nivel más elaborado, es de destacar el trabajo de Han et al. (2008) donde se propone un planteamiento de control fuzzy para el control de DO. Para ello se utiliza una linealización a intervalos de la relación entre el flujo de aire y el DO.

Referencia	Control	Observaciones
Stepner y Petersack (1974)	PID	PID control de DO
Marsili-Libelli (1989)	PID	control PID de DO con observadores de estado
Singman (1999)	PID	dos lazos PID para adición externa de carbono y recirculación de nitratos
Samuelsson y Carlsson (2001)	PI	PI control with feedforward
Krause et al. (2002b)	PI / FF	controladores PI con acción feedforward basada en medida de amonio en influente
Ingildsen et al. (2002)	PI	elección de consignas para PI de oxígeno y recirculación interna
Yuan y Keller (2003)	PID on-off	dos lazos PID junto con decisiones basadas en relé
Yong et al. (2006b)	PI/PID on-off	análisis de 6 configuraciones basadas en PID para control de adición de carbono externo y recirculación de nitratos
Vrečko et al. (2006)	PID / FF	control de DO basado en PID con acción feedforward desde la carga de amonio en el afluente
Stare et al. (2007a)	PI / FF	control de DO y control de adición de carbono externo en base a FF y PI
Wahab et al. (2009)	MIMO PID	control de oxígeno y nitratos
Vilanova et al. (2009)	PI	estructuras multivariadas centralizadas y descentralizadas
Vilanova y Alfaro (2011)	PID	control cascada/feedforward basadas en controladores PID para adición de carbono externo
Barbu et al. (2017)	PI	evalúa el impacto global de diferentes estrategias de control implementadas con controladores PI con especial atención en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 1: Control clásico: PI/PID en sus versiones SISO y MIMO

Referencia	Control	Observaciones
Vitasovic y Andrews (1989)	ES	control consumo de oxígeno
Barnett y Andrews (1990)	ES	requerimientos para aplicación exitosa de un sistema experto, capacidad de aprendizaje, etc
Maeda et al. (1990)	ES	diagnóstico y asesoramiento en la operación
Jager (1995)	FLC	control PI con reglas lingüísticas
Krause et al. (2002b)	ES	sistema basado en PI aumentado con reglas para la determinación de set-points en el control de DO
Serralta et al. (2002)	FC	control supervisor basado en lógica fuzzy para DO y nitratos
Meyer y Pöpel (2003)	FC	determinación de los set-point de DO en una estructura feedback/feedforward
Peng et al. (2005)	FLC	control de nitratos
Lingireddy y Brion (2005)	ANN	control de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación
Olsson et al. (2005)	ANN	control de procesos de digestión anaerobia
Baruch et al. (2004)	ANN	control ratio para el flujo de la recirculación externa
Zhao y Chai (2005)	ANN	predicción BOD
Yong et al. (2006a)	FC	determinación de los set-point de DO en una estructura feedback/feedforward junto con el control fuzzy de la adición de carbono externo
Traoré et al. (2006)	FLC	control de fangos en decantador secundario
Han et al. (2008)	FC	control lineal a intervalos con <i>blending</i> en base a funciones de pertinencia gaussianas
Zhu et al. (2009)	FLC	control de fangos en decantador secundario
Güçlü y Dursun (2010)	ANN	predicción de DQO, TSS y las concentraciones de sólidos en suspensión de licor mezclado en la EDAR real de Ankara mediante tres modelos de ANN.
Nasr et al. (2014)	PI / FC	control de DO mediante la manipulación de $K_L a$ y comparación con controladores PI y métodos on/off.
Santín et al. (2015a)	MPC/FLC	lógica fuzzy para la determinación de los set-point de DO y control feedforward.
Santín et al. (2016)	MPC/FLC/ANN	arquitectura de control con ANN para la predicción de violaciones en el afluente

Tabla 2: Control heurístico: Sistemas expertos (ES), control fuzzy (FC) y redes neuronales (ANN)

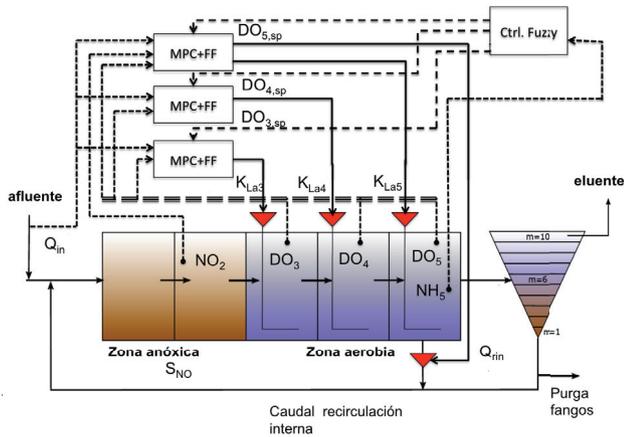


Figura 5: Esquema de una EDAR mostrando el esquema de control propuesto en Santín et al. (2015b) donde se combina un control MPC para cada uno de los reactores de la zona aeróbica junto con un control superior basado en un controlador Fuzzy que les proporciona las consignas. Uno de los controladores predictivos se concibe con información del influente para operar, también, el caudal de recirculación interna.

Para cada una de las regiones se optimiza un controlador PI y luego se realiza un *blending* entre las diferentes regiones en base a funciones gaussianas de pertinencia. Desde un punto de vista de operación, en Santín et al. (2015b) se aplica el control fuzzy en combinación con el control predictivo para tratar el problema de las violaciones de los límites establecidos para los contaminantes en el efluente. En este caso el controlador fuzzy se utiliza para determinar los set-points para los controladores predictivos encargados del control de DO así como de gestionar una acción feedforward desde la carga de amonio en el influente. En Santín et al. (2016) se puede acceder a una visión presentación más completa de la integración de elementos de decisión para la mejora de la operación de la EDAR.

4.2.3. Redes Neuronales

En la industria de procesos, una aplicación muy frecuente de las redes neuronales es en su uso como un sensor *software*. Cuando se conocen diversas variables físicas del proceso, mediante las correspondientes mediciones, el valor de una variable no medida puede ser obtenido a partir de las primeras, mediante la aplicación de una red neuronal que nos infiera su valor. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, en Zhao y Chai (2005) se utiliza una estructura de red neuronal híbrida con valores retardados¹ combinada con un análisis de componentes principales, como sensor *software* para predecir el valor de BOD en el efluente. A su vez, las redes neuronales también se han utilizado para el control de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en Lingireddy y Brion (2005) y para mantener la concentración del fango recirculado proporcional al flujo del influente de manera robusta ante las diferentes perturbaciones, variaciones de parámetros y ruido de medida en Baruch et al. (2004). También, tal como se muestra en Olsson et al. (2005), las redes neuronales presentan un gran

potencial en el control de procesos de digestión anaerobia. En Güçlü y Dursun (2010) se desarrollan tres modelos de ANN independientes para predecir DQO, TSS y las concentraciones de sólidos en suspensión en la EDAR real de Ankara. Los resultados indican que el modelo desarrollado podría ser utilizado eficientemente y que puede tener un gran potencial de implementación para la simulación y control de procesos de plantas de tratamiento de aguas residuales. En Santín et al. (2016) el tratamiento de las violaciones se amplía con la utilización de redes neuronales con fines de predicción de las mismas y así poder actuar antes de que la violación del influente tenga lugar.

4.3. Control basado en modelos

Como controladores basados en modelo, entendemos aquí aquellos algoritmos de control que se basan, de alguna manera, en el uso de un modelo del proceso en la generación de la señal de control. Este modelo puede ser un modelo de caja negra resultado de una identificación o incorporar de manera explícita, ecuaciones del tipo que conforman los modelos ASM1. El disponer de modelos matemáticos fiables, como los de la familia ASM, motivó e incrementó las aplicaciones de control basado en modelos así como, sobre todo, estrategias de control predictivo y las basadas en optimización. Antes de la aparición de los modelos ASM, los trabajos se habían basado en un modelo más simplificado del proceso de fangos activados.

4.3.1. Control Óptimo y Predictivo

A pesar de que muchos trabajos descansan en el uso de los modelos ASM1 y su utilización dentro de los escenarios definidos por los benchmark BSM1 y BSM2, algunos trabajos iniciales se basaron en el proceso de fangos activados, como por ejemplo el de Marsili-Libelli (1984) que aplica control óptimo cuadrático para el control del DO, Kabouris y Georgakakos (1990) que controla los caudales de recirculación en base a trayectorias óptimas precalculadas en lazo abierto. Kabouris et al. (1992) aplica la optimización para gestionar la acumulación de fangos y su repercusión en el rendimiento de la planta. En los trabajos de Lukasse se aplica MPC para el control de amonio y nitrato a la salida. En Lukasse et al. (1998) se aplica en base a un criterio l_1 en vez de un criterio H_2 . Estas soluciones se aproximan después en Lukasse et al. (1999) mediante un controlador por realimentación de estado con resultados bastante aceptables.

Son de resaltar algunos trabajos donde se compara la eficiencia de controladores basados en modelos respecto a enfoques más clásicos basados en PI/PID. Así, en el trabajo de Stefens y Lant (1999) se analizan diferentes controladores basados en modelo respecto a dos controladores PI, uno para el control de DO y otro para el control de amonio, ambos con set-point fijos. Las estrategias basadas en modelo consideradas incluyen LQC, DMC y NMPC². En este caso, el controlador NPC presentó los mejores resultados, siendo también las otras dos alternativas, DMC y LQC, mejores respecto al control PI. Otra

¹TDNN: hybrid time delay neural networks

²LQC: Linear Quadratic Control, DMC: Dynamic Matrix Control, NMPC: Non-linear Model Predictive Control

comparación posterior se presenta en Shen et al. (2009). Aquí los controladores utilizados son el DMC, NMPC y QDMC³. En esta ocasión se reporta que el QDMC no mejora el DMC y que en el caso del NMPC, aunque presenta mejoras en el rendimiento que ofrece, estas mejoras son a costa de un incremento de la energía utilizada. En este mismo estudio se analizan las ventajas de añadir acción feedforward en el controlador DMC. Se observa que añadir una acción feedforward respecto a la concentración de amonio aporta mejores resultados que respecto al flujo del afluente. Nuevamente, esta mejora en el rendimiento es a costa de un incremento de la energía. A pesar de que los trabajos anteriores muestran que con un controlador avanzado como un NMPC se pueden mejorar los resultados, estas ventajas no han sido siempre claras. Existen otros trabajos donde se ponen en duda las ventajas reales teniendo en cuenta el coste adicional de implementación y complejidad del controlador. Así, por ejemplo, en Holanda et al. (2008) se realiza un control de DO mediante controladores MPC. En este caso se observan mejoras del controlador MPC respecto al seguimiento de DO pero que quedan reflejadas en una mejora tan sólo marginal de la calidad del efluente. En el caso de Vrečko et al. (2011) se aplica MPC en una planta real para controlar NH y se compara con un PI convencional y un PI con feedforward. Los resultados de calidad del agua y costes se evalúan mediante los valores de NH y la aireación, respectivamente. Por un lado el MPC mejora los resultados que se obtienen con el PI convencional, pero en comparación con el PI con feedforward, si bien los resultados son parecidos, estos son ligeramente peores aplicando MPC. Se añade como trabajo futuro, una mejora en el modelo del MPC, así como en sus parámetros de diseño.

La aplicación de MPC al seguimiento de perfiles de DO ha tenido bastante actividad. Además de los ya comentados, en Brdys y Konarzac (2001) se aplica un NMPC basado en las ecuaciones de la dinámica del oxígeno. El esquema se mejora sobre todo en temas de eficiencia computacional en Brdys y Maíquez (2002) mediante un controlador predictivo / *fuzzy*. En Chotkowski et al. (2005) se aplica también un controlador NMPC comparándolo con un controlador adaptativo basado en modelo de referencia, y en Piotrowski et al. (2008) el controlador NMPC se complementa con los modelos de los sopladores de oxígeno. Estos controladores mencionados se organizan en Brdys et al. (2008) en una estructura de control jerárquico dividida en tres capas: supervisión, optimización y controladores de seguimiento. En la capa de optimización se utiliza un controlador MPC robusto junto con filtro de Kalman extendido y diferentes técnicas de estimación de parámetros. Como resultado de esta optimización se genera la trayectoria deseada para los niveles de DO en la capa inferior. En Revollar et al. (2015) se aplica un NMPC económico con el objetivo de minimizar costes de operación, específicamente energía de aireación y energía de bombeo. Se compara con los controladores PI por defecto y con otro controlador NMPC que tiene como objetivo seguir los set-points de DO y nitrato. En los resultados se consigue una reducción de costes, aunque un pequeño aumento de nitrato en

la salida mediante la aplicación del NMPC económico, concluyendo que el *trade-off* obtenido es bueno.

4.3.2. Control adaptativo

El proceso de fangos activados, y las dinámicas implicadas en los procesos de degradación de nutrientes en general, son complejas y variantes en el tiempo. Así por ejemplo, los parámetros del proceso pueden experimentar variaciones debidas a la temperatura y a las variaciones de carga en el afluente que pueden originar variaciones en la composición y características de la biomasa. A principios de los años 90 ya se iniciaron trabajos aplicando técnicas de estimación de parámetros y control adaptativo. Así, por ejemplo, en uno de los primeros trabajos, para el control de sustrato y biomasa, Bastin y Dochain (1990) propone la aplicación de observadores no lineales combinados con técnicas de linealización por realimentación. En Dochain (1991) estas técnicas se extienden al caso multivariable y en Dochain y Perrier (1993) la linealización por realimentación se aplica para la regulación de BOD y la concentración de DO. Una técnica similar se aplica en Vanrolleghem (1994) para el control de la edad de fangos. En Lindberg y Carlsson (1996b) se aplica un controlador PI adaptativo mediante varianza mínima para el control de la adición de carbono externo. Como controlador adaptativo mas avanzado está el trabajo de Lukasse et al. (1997) en el que se aplica un MPC adaptativo para la eliminación de nitrógeno. En este caso se utiliza un filtro de Kalman extendido y un criterio de optimización basado en norma l_1 . En Belchior et al. (2011) se muestra la reducción del error obtenido en el lazo de control básico de DO mediante un controlador adaptativo borroso (ADFC) en comparación con un controlador básico borroso y con un PI.

4.3.3. Aplicación de técnicas de optimización

Algunos trabajos se han concentrado en aplicar técnicas de optimización basadas en un modelo completo de la planta, pero para la determinación de los puntos de consigna óptimos para configuraciones de control basadas en controladores clásicos (tipo PI/PID). Así, en Machado et al. (2009) se escogen set-points para estructuras descentralizadas basadas en criterios económicos. En Flores-Alsina et al. (2008) se aplica optimización multicriterio para la decisión de la mejor estrategia y las correspondientes consignas, en este caso para el DO y el nitrato en el efluente, sugiriendo valores bastante bajos (0.5 mg/L) para el nivel de DO. De forma similar, en Ostace et al. (2013) se analizan estrategias de control desde el punto de vista económico.

Dentro de los trabajos que aplican técnicas de optimización, se encuentra también la aplicación de GA⁴. Así, en Doby et al. (2002) se utilizan GA sobre un modelo estático de EDAR para proponer configuraciones de operación y comparar los GA con las técnicas de optimización no-lineal clásicas. En Biswas et al. (2007) se optimiza la cadena de tratamiento con el fin de sugerir las diferentes unidades de proceso a utilizar. Con otro enfoque mas orientado a control propiamente dicho que a diseño,

³QDMC: Quadratic DMC

⁴GA: algoritmos genéticos

Referencia	Control	Observaciones
Marsili-Libelli (1984)	CO	control óptimo cuadrático de DO
Kabouris y Georgakakos (1990)	CO	trayectorias óptimas precalculadas en lazo abierto para los caudales de recirculación
Bastin y Dochain (1990)	AD	control de sustrato y biomasa con observadores no lineales combinados con técnicas de linealización por realimentación
Kabouris et al. (1992)	CO	optimización de la acumulación de fangos y su repercusión en el rendimiento de la planta
Dochain y Perrier (1993)	AD/MIMO	observadores no lineales combinados con técnicas de linealización por realimentación para control de DO y BOD
Vanrolleghem (1994)	AD	control de la edad de fangos mediante linealización por realimentación
Vanrolleghem et al. (1996)	optimización	Introducción de funciones de coste para planteamientos de diseño integrado (diseño y operación de EDAR)
Lindberg y Carlsson (1996a)	AD / PI	PI adaptativo por varianza mínima para control de adición de carbono
Lukasse et al. (1997)	MPC / AD / l_1	MPC adaptativo para control de control de NH ₄ and NO ₃ manipulando la aireación
Lukasse et al. (1998)	MIMO / MPC / l_1	control de NH ₄ and NO ₃ con MPC basado en norma-1
Lukasse et al. (1999)	MISO / SS / l_1	control l_1 de de NH ₄ and NO ₃ expresado como realimentación de estado
Brdys y Konarzac (2001)	NLMPC	control predictivo no-lineal para DO
Brdys y Mañquez (2002)	NLMPC / FC	control predictivo / fuzzy para DO
Doby et al. (2002)	GA	optimización de configuraciones de tratamiento mediante GA
Vanrolleghem y Gillot (2002a)	optimización	Planteamiento de multicriterio para la evaluación de estrategias de control. Introducción de consideraciones económicas.
Chotkowski et al. (2005)	NLMC / AD	controlador NLMPC y adaptativo basado en modelo de referencia,
Biswas et al. (2007)	GA	Optimización de la cadena de tratamiento
Holenda et al. (2008)	MPC	control de DO manipulando $K_L a$ mediante un controlador MPC
Piotrowski et al. (2008)	NLMC	control predictivo no-lineal para DO incorporando los modelos de los sopladores
Flores-Alsina et al. (2008)	optimización	decisión de la mejor estrategia de control y los correspondientes set-points mediante optimización multicriterio
Brdys et al. (2008)	NLMPC / CO	Arquitectura jerárquica con supervisión, optimización y controladores de seguimiento
Shen et al. (2009)	DMC/NMPC / QDMC	control de las variables que componen el EQI, añadiendo restricciones duras en las variables manipuladas y restricciones suaves en las variables controladas
Machado et al. (2009)	optimización	Set-points para controles descentralizados basados en criterios económicos.
Cristea et al. (2011)	NMPC	Control predictivo híbrido con consideraciones económicas aplicado al control de aireación.
Belchior et al. (2011)	ADFC / FC / PI	control de DO mediante un controlador ADFC y comparación del rendimiento con un FC básico y con un PI.
Vrečko et al. (2011)	MPC / PI	aplicación de MPC en una planta real para controlar NH y lo compara con un PI convencional y un PI con feedforward.
Åmand y Carlsson (2012)	optimización	minimiza la variable manipulada $K_L a$ con la restricción de que NH en el efluente alcance el nivel deseado.
Guerrero et al. (2012)	optimización	Determinación de patrones de consignas
Rojas et al. (2012)	VRFT	aplicación de VRFT a las estrategias de control MIMO utilizando el BSM1
Revollar et al. (2015)	NMPC	minimiza los costes de operación mediante un NMPC económico y lo compara con los PI por defecto y con otro controlador NMPC que tiene como objetivo seguir los set-points.
Francisco et al. (2015)	auto optimización	aplica control predictivo mediante auto optimización para encontrar las mejores variables controladas, en sentido económico, para los procesos de lodos activados mediante el BSM1.

Tabla 3: Control basado en modelos: óptimo (OC), predictivo (MPC), robusto (R), adaptativo (A)

en Yamanaka et al. (2006) se utiliza el BSM1 y una estructura jerárquica en la que un controlador de alto nivel proporciona los set-point en base a una optimización mediante GA. Los GA son utilizados también en Beraud et al. (2009) para la optimización de los set-point en las diferentes zonas aeróbicas, obteniendo un cierto ahorro energético a la vez que se mantienen los niveles de tratamiento deseados. En Åmand y Carlsson (2012) se aplica optimización para minimizar la variable manipulada $K_L a$ con la restricción de que el amonio en el efluente no supere un valor prefijado. En Francisco et al. (2015) se aplica control predictivo mediante auto-optimización para encontrar las mejores variables controladas, en sentido económico, para los procesos de fangos activados mediante el BSM1.

Ligado a los procesos de optimización tenemos también el importante tema de los criterios de evaluación y funciones de coste. Estos son los que nos permiten formular un problema como problema de optimización. Ya previamente a la formulación de los entornos BSMx hubo diferentes propuestas. Entre éstas son destacables los trabajos de Vanrolleghem et al. (1996) donde se plantea la implementación de un sistema de soporte a la decisión para el diseño y operación de EDAR con el fin de balancear los costes de operación con los niveles de tratamiento conseguidos. La evaluación de las funciones de decisión fue posteriormente más elaborada en Vanrolleghem y Gillot (2002b) con la definición de un índice de coste total, que introduce factores de peso asociados a los diferentes costes de operación. Es en este mismo año, cuando se presentan los índices de rendimiento para la evaluación de estrategias de control basados en la simulación del BSM1 Copp (2002). En Rojas et al. (2011), Rojas et al. (2012) se propone aplicar VRFT⁵ a las estrategias de control MIMO utilizando el BSM1. Los resultados muestran que se pueden obtener mejoras sustanciales en el rendimiento de la planta.

5. Retos y perspectivas

Después de haber ofrecido, una visión de la actividad a nivel de modelado, simulación y control aplicados a EDAR en la primera parte de este trabajo⁶, se presentan a continuación las líneas de trabajo que constituyen las perspectivas actuales en las que se centra buena parte de la atención la investigación en el tratamiento de aguas residuales. Es importante, no obstante, recalcar que la diversidad de áreas de investigación que podemos encontrar alrededor del agua es inmensa. Aquí nos centraremos en aquellas que tienen una mayor vinculación con la ingeniería de control. A pesar de que las perspectivas de presentan bajo diferentes encabezamientos, éstos no son desconexos sino que existen diversas relaciones entre ellos. De esta forma, en lo que respecta al tema que nos ocupa, podríamos decir que la toma en consideración de múltiples criterios de decisión, la integración de subsistemas y la visión del ciclo de tratamiento del agua desde una perspectiva más global, así como la sostenibilidad, son los aspectos que centran la principal atención de los actuales enfoques.

5.1. Benchmarking y evaluación de rendimiento

Las diferentes herramientas de benchmarking han supuesto un elemento vital en el desarrollo de cada vez más elaboradas y mejores estrategias de control y operación para EDAR. A pesar del enorme desarrollo que se ha llevado a cabo alrededor de los sistemas BSMx, estos todavía no incluyen todas las características que serían deseables con el fin de evaluar de manera completa las estrategias de control. Así, en Jeppsson et al. (2013) se presentan una serie de extensiones para estas plataformas, incluyendo las evaluaciones a largo plazo, extensión del BSM2 añadiendo más unidades de proceso como el sistema de alcantarillado y las aguas receptoras. Se considera también la inclusión de nuevos modelos para la eliminación de nitrógeno como el proceso combinado SHARON-Anammox Dapena-Mora et al. (2004), reactores de membrana en Maere et al. (2011), eliminación biológica de fósforo en Gernaey y Jørgensen (2004) y la extensión a un benchmark para la inclusión de las emisiones de gases de efecto invernadero; GHG⁷ Flores-Alsina et al. (2011). La producción de óxido nitroso (N_2O) en los sistemas basados en fangos activados, ha recibido un elevado interés debido a su efecto como GHG, por ejemplo en Guo et al. (2012). Estos modelos se implementan dentro del marco de BSM2 con el objetivo de predecir los caminos de formación de N_2O dentro de las etapas de nitrificación y desnitrificación.

Además de las diferentes extensiones de los sistemas BSMx espacial, temporal y a nivel de procesos internos de la EDAR, entran también en juego las extensiones referentes a las estrategias de control y las de evaluación de las mismas. En lo que respecta a las estrategias de control, cabe destacar las consideraciones respecto a eventuales fallos en medidas y su calidad. Es decir, sistemas tolerantes a fallos y sensibles a la incertidumbre. El uso de las diferentes medidas on-line disponibles es básico para la implementación de estrategias de operación óptima para una EDAR. No obstante es necesaria la puesta en escena de métodos para verificar la calidad de estas señales (calibración, derivas, etc.) como se concluye en Rieger et al. (2003). Medidas defectuosas pueden originar desviaciones en el efluente que acaben en violaciones de los límites de descarga establecidos o incrementar los costes de operación tal como se muestra en Steyer et al. (2006). En este sentido, las plataformas benchmark pueden utilizarse para mostrar la validez de las estrategias y algoritmos propuestos en presencia de estos fallos y evaluar la repercusión de los mismos en el funcionamiento global de la planta.

La evaluación ha sido uno de los aspectos clave de las plataformas BSMx, considerando, básicamente, calidad del efluente y costes de operación. A estos dos objetivos se plantean la adición de dos índices adicionales para evaluar el aspecto energético (producción/consumo) así como los riesgos de sedimentación de origen microbiológico como son la aparición de espumas y el *bulking*.

5.2. Impacto en gases de efecto invernadero

El N_2O contribuye al global de GHG alrededor de un 6 %, pero es unas 300 veces más eficiente que el CO_2 por lo que

⁵VRFT: Virtual Reference Feedback Tuning

⁶REF: citar primera parte

⁷GreenHouse Gas

respecta a su capacidad de absorber calor. Puesto que el N_2O se produce en las etapas de nitrificación y desnitrificación, es de gran interés tener en cuenta estas emisiones en el momento de decidir cómo operar un sistema basado en fangos activados. Estudios recientes han mostrado que determinadas condiciones dinámicas pueden llegar a causar elevadas emisiones de N_2O Kampschreur et al. (2008).

No obstante, a pesar de que el N_2O es el elemento que más repercusión puede tener, la contribución de una EDAR a los GHG es más amplia. De acuerdo al modelo de Bridle Bridle T. y Domurad (2008), las emisiones que tienen lugar en una EDAR provienen de cinco fuentes principales: (1) tratamiento biológico, (2) procesado y digestión de fangos, (3) energía, (4) uso de químicos y (5) disposición y reutilización de fangos. De esta forma, el N_2O se genera en los procesos de eliminación del nitrógeno y el metano en la digestión de fangos. La energía utilizada en las acciones de aireación, bombeo, etc. así como el uso de químicos puede convertirse en equivalentes de CO_2 .

La consideración de las emisiones de N_2O se ha intentado recoger en diferentes modelos y formulaciones. La propuesta más aceptada hoy en día se origina con el trabajo de Hiatt y Grady (2008) que proponen el ASM⁸, basado en ASM1 pero que describe la nitrificación como un proceso en dos pasos y la desnitrificación en cuatro. En base a este modelo, en Flores-Alsina et al. (2011) se propone un modelo adaptado a EDAR municipales y que constituye la base para la incorporación de los GHG en las plataformas de benchmarking. En concreto, se incorpora al BSM2 dando lugar al benchmark BSM2G. Posteriormente a esta extensión, han habido propuestas adicionales basadas en ASM⁸ como son las de Samie et al. (2011) y Pan et al. (2013). En Ni et al. (2012) se comparan cuatro modelos de producción de N_2O . Desde el punto de vista de las plataformas BSM_x, el propósito es reunir las diferentes emisiones en un nuevo índice que pueda interpretarse como una *huella de carbono*. De esta forma se tienen en cuenta también las emisiones de dióxido de carbono y de metano.

En el trabajo de Flores-Alsina et al. (2011) se analizan diversas estrategias de control y se constata el compromiso existente entre los costes de operación, calidad de efluente y emisiones GHG. Otras estrategias para la mitigación de emisiones se proponen en Desloover et al. (2012). En Flores-Alsina et al. (2014), se presenta un estudio multicriterio en el que se analiza el efecto que tiene variar cuatro variables de operación en las relaciones de compromiso existentes entre el coste económico, calidad de efluente y emisiones.

5.3. Análisis de Ciclo de Vida y evaluación del impacto medioambiental

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA⁹) es una técnica utilizada para cuantificar los impactos asociados con todas las etapas de un producto, desde su creación hasta su destrucción. Estos impactos cubren un espectro realmente amplio de aspectos medioambientales: (a) impactos en la salud humana (cambio

climático, agotamiento de ozono, toxicidad, etc.); (b) impactos en los ecosistemas (acidificación, eutrofización, toxicidad, etc.) y (c) impactos en la disponibilidad de recursos (agotamiento de minerales, combustible basado en fuentes fósiles, etc). En lo referente a la aplicación del LCA a EDAR, de hecho, ya a principios de los años 90 se empezó a aplicar, mostrando que suponía una herramienta útil para poder evaluar los impactos medioambientales de la operación de una EDAR desde una perspectiva más amplia. Desde entonces, se han publicado numerosos estudios al respecto. Se puede ver el trabajo de revisión presentado en Corominas et al. (2013).

Mientras que los trabajos basados, por ejemplo, en GHG se centran en las emisiones, cuando aplicamos LCA lo que medimos es el impacto resultante más que la emisión. Generalmente, la metodología LCA sirve como complemento dentro de un escenario de decisión multicriterio. Así por ejemplo, en Meneses et al. (2015) y Meneses et al. (2016) se aplica LCA para analizar los impactos generados por un conjunto de estrategias de operación de EDAR centradas en el *benchmark* BSM1. Se plantea LCA como una herramienta de ayuda a la evaluación de estrategias de operación mostrando como puede complementar a los índices de calidad y coste establecidos en las plataformas BSM.

Conjuntamente a la introducción de las emisiones GHG, la aplicación del LCA muestra el interés existente en la incorporación de consideraciones medioambientales dentro de la evaluación de la operación de procesos. A tal fin se creó un grupo de trabajo dentro de IWA, específico de este tema, el LCA-Water WG¹⁰, con el objetivo de consensuar metodologías y promover el uso de LCA dentro de los sistemas de depuración de aguas residuales urbanas.

5.4. Modelado y control integrado de sistemas de aguas urbanas

Una EDAR, no es sino uno de los elementos constitutivos dentro del sistema de aguas urbanas o UWS¹¹. En un UWS identificamos el área de recogida de aguas o área de afectación, el sistema de alcantarillado y conducción de aguas, la EDAR (o EDARs) propiamente dicha y las aguas receptoras. Para cada uno de estos elementos existen diferentes modelos hoy en día ampliamente aceptados Henze et al. (2002), Rossman (2009) Shanahan et al. (2001), a la vez que herramientas software que recogen estos procesos. (e.g. Achleitner et al. (2007) y IFAK (2007)). De esta forma, modelos del sistema integrado, combinan los diferentes subsistemas y sus interacciones. Usualmente, un modelo se le puede denominar integrado si combina, al menos, dos subsistemas de los mencionados Rauch et al. (2002). Las problemáticas en esta integración, surgen del hecho de que estos subsistemas fueron concebidos para propósitos diferentes, con vectores de estado diferentes, trabajando con escalas temporales y unidades diferentes, Schmitt y Huber (2006).

Las ideas acerca de trabajar con el UWS no son nuevas, encontrándose diversos trabajos en los años 90 que identificaban

⁸ASM⁸: Activated Sludge Model for Nitrogen

⁹LCA: Life Cycle Assessment

¹⁰LCA-Water WG: Working Group for Life Cycle Assessment of Water and Wastewater Treatment

¹¹UWS: Urban Water System

las necesidades entre los diferentes subsistemas y recomendaban la necesidad de considerar el UWS desde una perspectiva más holística Lijklema et al. (1993). En los últimos años, el refuerzo impuesto por la directiva europea WFD¹² en la línea de asegurar un estado saludable de las aguas receptoras, ha generado un cambio de perspectiva en el que la calidad de estas aguas es el objetivo primordial y ha condicionado por tanto la gestión de los UWS, renovando de esta manera el interés por el control integrado Vanrolleghem et al. (2005). Los modelos integrados se utilizan también para el análisis de escenarios futuros resultantes del crecimiento de las áreas urbanas y, por tanto, del efecto resultante en las estructuras de tratamiento de aguas residuales necesarias Doglioni et al. (2009) y Astarai-Imani et al. (2012) así como de estrategias para minimizar el impacto medioambiental de los mismos Fu et al. (2010), Fu y Butler (2012).

Los desarrollos en el modelado integrado de UWS conllevó, a su vez, desarrollos en el estudio del control integrado del Rauch y Harremoës (1999), Schutze et al. (2011), Butler y Schutze (2005), Meirlaen et al. (2002). En Schutze et al. (1999) se caracteriza el control integrado en base a los siguientes dos aspectos: (a) *integración de objetivos* en el que los objetivos de control en uno de los subsistemas pueden ser basados en evaluaciones y criterios medidos en otros subsistemas del UWS y, (b) *integración de información* en el que las decisiones de control en uno de los subsistemas puede estar basadas en estados medidos en otro subsistema.

El control local orientado a optimizar el rendimiento en uno de los subsistemas a modo individual puede no necesariamente llevar a mejorar la calidad en las aguas receptoras Schutze et al. (2011). De esta forma, se hacen necesarias estrategias de control integradas. Con el fin de contribuir al desarrollo de estudios de control integrado, está claro que la existencia de herramientas de benchmarking son un factor decisivo así como lo han sido para el control de EDAR. A este respecto, una primera propuesta de benchmark para UWS se ha presentado en Jeppsson et al. (2013).

5.5. Control y operación a nivel de planta completa

La toma en consideración del UWS en su totalidad está directamente ligado al concepto de control de planta completa o *plant-wide control*. No obstante, este concepto no es de aplicación únicamente cuando tratamos con el UWS en su totalidad. Los enfoques de planta completa se aplican cuando no es suficiente el considerar el control de cada una de las unidades de proceso de forma aislada. Así pues, a nivel, por ejemplo de EDAR, se plantean estrategias que toman en consideración la línea de aguas y la línea de fangos, así como las interacciones entre ambas. El aspecto principal que se plantea en enfoques de control de planta completa es la traducción de los objetivos de operación, a nivel global, en determinaciones para las variables controladas en las diferentes unidades de proceso.

Tal como se plantea en Stephanopoulos y Ng (2000) un enfoque de planta completa conlleva ciertas características y con-

sideraciones que no necesariamente aparecen cuando planteamos los correspondientes sistemas de control para cada una de las unidades de proceso. Por ejemplo, el conjunto de variables controladas en el nivel de planta completa no está generalmente tan definido como para las unidades individuales. El problema de control a nivel de planta completa es más complejo puesto que deben tenerse en cuenta efectos a largo plazo que, decisiones de control a nivel local en una unidad de proceso, pueden tener a nivel de toda la planta. Por ejemplo, en Yuan y Blackall (2002) se plantea que el control de DO no sólo afecta al nivel de DO en los reactores (corto plazo) sino a la población microbiana que conforma la biomasa (largo plazo).

Un aspecto importante que entra en las consideraciones de control de planta completa y que está recibiendo mucha atención es el aspecto energético. Este aspecto ya se planteaba en Olsson y Newell (1999) y toma especial relevancia cuando consideramos los efectos acumulados a nivel de toda la planta. Éstos deben tener en cuenta la energía necesaria para el transporte, tratamiento, contenido calorífico en el agua, producción de gas, etc. Efectivamente, cualquier integración conlleva algún tipo de compromiso y éstos deben ser tratados en su conjunto. Sobre todo en una EDAR en la que disponemos de elementos consumidores y elementos productores de energía. La situación ideal sería la de conseguir que una EDAR, en su totalidad, pudiera actuar como productor de energía en vez de como consumidor.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una revisión de los desarrollos en el control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales. Siendo los enfoques que podemos encontrar realmente numerosos se hace difícil presentarlos mediante una mera revisión bibliográfica. Por ello, se ha optado por presentar una revisión del control y operación de una estación depuradora desde tres puntos de vista diferentes. En primer lugar, desde una perspectiva global y generalista, delimitando los objetivos básicos y las consideraciones para la evaluación de los mismos. En segundo lugar se ha presentado el control de las diferentes unidades de proceso, presentando los lazos de control más usuales, viendo cuáles son los objetivos en estos lazos y qué estrategias se han planteado. Por último se ha intentado ofrecer una catalogación respecto a las técnicas empleadas. Aunque este tipo de divisiones a veces puede resultar un poco difusa sí permite establecer unos grandes grupos resaltando los principales trabajos en cada uno de ellos.

Para finalizar se han presentado líneas de actividad que marcan los principales retos en que se está dirigiendo hoy en día la investigación. Es importante remarcar una vez más la tendencia a planteamientos integrados tanto desde el punto de vista del modelado y control (sistemas de aguas urbanas integrados) como de la evaluación, que se centra en la calidad de las aguas receptoras más que en la precisión de los lazos individuales. Estas perspectivas apuntan a que los enfoques basados en tratar la planta a nivel global en vez de cada una de las unidades de proceso por separado serán cada vez más importantes.

¹²Water Framework Directive

English Summary

Control and operation of wastewater treatment plants: challenges and state of the art

Abstract

This tutorial is the second part of a review of the problems arising with the control and operation of wastewater treatment plants (WWTP) for urban wastewater. Having presented in the first part the modelling and simulation steps, in this second part we cover the control and operation issues. This treatment is carried out, mainly, by biological processes, specifically, by the so-called activated sludge process. Dealing with a biological process entails a high complexity both from the viewpoint of modelling and, of course, from what matters to control and operation. The control of WWTP is reviewed from an historical perspective, as well as the most common control loops, the problems that present and some of the proposed solutions. A review of the applications of different control techniques is also cataloged according to the philosophy of the control approach. Finally, it offers an overview of the current trends and future development prospects.

Keywords:

wastewater treatment plants benchmarking control and operation

Agradecimientos

Este trabajo es fruto de la investigación de los autores en diversos proyectos financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad que han desembocado en el proyecto que se está llevando a cabo actualmente, DPI2016-77271-R

Referencias

- Achleitner, S., Moderl, M., Rauch, W., aug 2007. CITY DRAIN © – an open source approach for simulation of integrated urban drainage systems. *Environmental Modelling & Software* 22 (8), 1184–1195.
DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.06.013
- Åmand, L., Carlsson, B., may 2012. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Research* 46 (7), 2101–2110.
DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.023
- Astaraie-Imani, M., Kapelan, Z., Fu, G., Butler, D., dec 2012. Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. *Journal of Environmental Management* 112, 1–9.
DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.06.039
- Baeza, J., Gabriel, D., Lafuente, J., mar 1999. An expert supervisory system for a pilot WWTP. *Environmental Modelling & Software* 14 (5), 383–390.
DOI: 10.1016/s1364-8152(98)00101-7
- Baeza, J., Gabriel, D., Lafuente, J., apr 2002. Improving the nitrogen removal efficiency of an a2/o based WWTP by using an on-line knowledge based expert system. *Water Research* 36 (8), 2109–2123.
DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00402-x
- Baeza, J., Gabriel, D., Lafuente, J., jul 2004. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (a2/o) wastewater treatment plant (WWTP). *Process Biochemistry* 39 (11), 1615–1624.
DOI: 10.1016/s0032-9592(03)00300-5
- Barbu, M., Vilanova, R., Meneses, M., Santin, I., 2017. On the evaluation of the global impact of control strategies applied to wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production* 149, 396–405.
- Barnett, M. W., Andrews, J. F., 1990. Knowledge based systems for operation of wastewater treatment processes. En: *Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems*. Elsevier, pp. 211–218.
DOI: 10.1016/b978-0-08-040776-0.50029-9
- Baruch, I. S., Georgieva, P., Barrera-Cortes, J., de Azevedo, S. F., 2004. Adaptive recurrent neural network control of biological wastewater treatment. *International Journal of Intelligent Systems* 20 (2), 173–193.
DOI: 10.1002/int.20061
- Bastin, G., Dochain, D., 1990. *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors (Process Measurement and Control)*. Elsevier Science.
- Belchior, C. A. C., Araujo, R. A. M., Landeckb, J. A. C., 2011. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control. *Computer and Chemical Engineering* 37, 152–162.
- Benedetti, L., De Baets, B., Nopens, I., Vanrolleghem, P. A., 2010. Multi-criteria analysis of wastewater treatment plant design and control scenarios under uncertainty. *Environmental Modelling & Software* 25 (5), 616–621.
- Beraud, B., Lemoine, C., Steyer, J.-P., 2009. Multiobjective genetic algorithms for the optimisation of wastewater treatment processes. En: *Computational Intelligence Techniques for Bioprocess Modelling, Supervision and Control*. Springer Nature, pp. 163–195.
- Biswas, P., Bose, P., Tare, V., 2007. Optimal choice of wastewater treatment train by multi-objective optimization. *Engineering Optimization* 39 (2), 125–145.
- Bracken, B., Flanagan, M., 1977. Design recommendations for automatic dissolved oxygen control. *Prog. Wat. Tech.* 9 (5/6), 551–555.
- Brdys, M., Grochowski, M., Gminski, T., Konarzcak, K., Drewa, M., 2008. Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems. *Control Engineering Practice* 16 (6), 751–767.
- Brdys, M., Konarzcak, K., 18-20 July 2001. Dissolved oxygen control for activated sludge processes. En: *Proc. of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory Applications*. Bucharest, Romania.
- Brdys, M., Maíquez, J. D., 2002. Application of fuzzy model predictive control to the dissolved oxygen concentration tracking in an activated sludge process. *IFAC Proceedings Volumes* 35 (1), 35–40.
- Bridle T., Shaw A., C. S. Y. K. C. T. K., Domurad, M., 2008. Estimation of greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants. En: *In Proceedings of the IWA World Water Congress, Vienna, Austria, September 7-12 2008*.
- Butler, D., Schutze, M., 2005. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software* 20 (4), 415–426.
- Chen, G., Pham, T. T., 2000. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, United States.
- Chotkowski, W., Brdys*, M. A., Konarzcak, K., 2005. Dissolved oxygen control for activated sludge processes. *International Journal of Systems Science* 36 (12), 727–736.
- Copp, J. B., 2002. *The Cost Simulation benchmark: Description and simulator manual (COST Action 624 and Action 682)*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J., Hospido, A., Larsen, H., Morera, S., Shaw, A., oct 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. *Water Research* 47 (15), 5480–5492.
DOI: 10.1016/j.watres.2013.06.049
- Cristea, S., de Prada, C., Sarabia, D., Gutiérrez, G., 2011. Aeration control of a wastewater treatment plant using hybrid NMPC. *Computers & Chemical Engineering* 35 (4), 638–650.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.07.021>
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2010.07.021
- Dapena-Mora, A., Hulle, S. W. V., Campos, J. L., Méndez, R., Vanrolleghem, P. A., Jetten, M., oct 2004. Enrichment of anammox biomass from municipal activated sludge: experimental and modelling results. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 79 (12), 1421–1428.
DOI: 10.1002/jctb.1148
- Desloover, J., Vlaeminck, S. E., Clauwaert, P., Verstraete, W., Boon, N., jun 2012. Strategies to mitigate n2o emissions from biological nitrogen removal systems. *Current Opinion in Biotechnology* 23 (3), 474–482.
DOI: 10.1016/j.copbio.2011.12.030

- Doby, T., Loughlin, D., De los Reyes, F., Ducoste, J., 2002. Optimization of activated sludge designs using genetic algorithms. *Water science and technology* 45 (6), 187–198.
- Dochain, D., 1991. Design of adaptive controllers for non-linear stirred tank bioreactors: extension to the mimo situation. *Journal of Process Control* 1 (1), 41–48.
- Dochain, D., Perrier, M., 1993. Control design for nonlinear wastewater treatment processes. *Water Science and Technology* 28 (11-12), 283–293.
- Doglionni, A., Primativo, F., Laucelli, D., Monno, V., Khu, S.-T., Giustolisi, O., dec 2009. An integrated modelling approach for the assessment of land use change effects on wastewater infrastructures. *Environmental Modelling & Software* 24 (12), 1522–1528.
DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.06.006
- Ekman, M., Björleinius, B., Andersson, M., 2006. Control of the aeration volume in an activated sludge process using supervisory control strategies. *Water research* 40 (8), 1668–1676.
- Flores-Alsina, X., Arnell, M., Amerlinck, Y., Corominas, L., Gernaey, K. V., Guo, L., Lindblom, E., Nopens, I., Porro, J., Shaw, A., Snip, L., Vanrolleghem, P. A., Jeppsson, U., jan 2014. Balancing effluent quality, economic cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of (plant-wide) control/operational strategies in WWTPs. *Science of The Total Environment* 466-467, 616–624.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.046
- Flores-Alsina, X., Corominas, L., Snip, L., Vanrolleghem, P. A., oct 2011. Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Research* 45 (16), 4700–4710.
DOI: 10.1016/j.watres.2011.04.040
- Flores-Alsina, X., Rodríguez-Roda, I., Sin, G., Gernaey, K. V., 2008. Multi-criteria evaluation of wastewater treatment plant control strategies under uncertainty. *Water research* 42 (17), 4485–4497.
- Francisco, M., Skogestad, S., Vega, P., 2015. Model predictive control for the self-optimized operation in wastewater treatment plants: Analysis of dynamic issues. *Computers and Chemical Engineering* 82, 259–272.
- Fu, G., Butler, D., may 2012. Frequency analysis of river water quality using integrated urban wastewater models. *Water Science & Technology* 65 (12), 2112.
DOI: 10.2166/wst.2012.127
- Fu, G., Khu, S.-T., Butler, D., mar 2010. Optimal distribution and control of storage tank to mitigate the impact of new developments on receiving water quality. *Journal of Environmental Engineering* 136 (3), 335–342.
DOI: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000161
- Gernaey, K. V., Jørgensen, S. B., mar 2004. Benchmarking combined biological phosphorus and nitrogen removal wastewater treatment processes. *Control Engineering Practice* 12 (3), 357–373.
DOI: 10.1016/s0967-0661(03)00080-7
- Güçlü, D., Dursun, S., 2010. Artificial neural network modelling of a large-scale wastewater treatment plant operation. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 33 (9), 1051–1058.
- Guerrero, J., Guisasaola, A., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Baeza, J., apr 2012. Multi-criteria selection of optimum WWTP control setpoints based on microbiology-related failures, effluent quality and operating costs. *Chemical Engineering Journal* 188, 23–29.
DOI: 10.1016/j.cej.2012.01.115
- Guo, L., Porro, J., Sharma, K. R., Amerlinck, Y., Benedetti, L., Nopens, I., Shaw, A., Hulle, S. W. H. V., Yuan, Z., Vanrolleghem, P. A., oct 2012. Towards a benchmarking tool for minimizing wastewater utility greenhouse gas footprints. *Water Science & Technology* 66 (11), 2483.
DOI: 10.2166/wst.2012.495
- Han, Y., Brdys, M., Piotrowski, R., 6-11 July 2008. Nonlinear pi control for dissolved oxygen tracking at wastewater treatment plant. Seoul, Korea.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M., 2002. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Reports, No. 9. IWA Publishing.
- Hiatt, W. C., Grady, C. P. L., nov 2008. An updated process model for carbon oxidation, nitrification, and denitrification. *Water Environment Research* 80 (11), 2145–2156.
DOI: 10.2175/106143008x304776
- Holenda, B., Domokos, E., Redey, A., Fazakas, J., 2008. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. *Computers and Chemicals Engineering* 32 (6), 1270–1278.
- IFAK, 2007. *SIMBA Manual and Reference*. Insitut fuer Automation und Kommunikation e. V. Magdeburg, Germany.
- Ingildsen, P., 2002. Realising full-scale control in wastewater treatment systems using in situ nutrient sensors. Ph.D. thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation.
- Ingildsen, P., Olsson, G., Yuan, Z., 2002. A hedging point strategy—balancing effluent quality, economy and robustness in the control of wastewater treatment plants. *Water science and technology* 45, 317–324.
- Jager, R., 1995. Fuzzy logic in control. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Jeppsson, U., Alex, J., Batstone, D. J., Benedetti, L., Comas, J., Copp, J. B., Corominas, L., Flores-Alsina, X., Gernaey, K. V., Nopens, I., Pons, M.-N., Rodríguez-Roda, I., Rosen, C., Steyer, J.-P., Vanrolleghem, P. A., Volcke, E. I. P., Vrecko, D., jul 2013. Benchmark simulation models, quo vadis? *Water Science & Technology* 68 (1), 1.
DOI: 10.2166/wst.2013.246
- Kabouris, J., Georgakakos, A., 1990. Optimal control of the activated sludge process. *Water Research* 24 (10), 1197–1208.
- Kabouris, J. C., Georgakakos, A. P., Camara, A., 1992. Optimal control of the activated sludge process: Effect of sludge storage. *Water research* 26 (4), 507–517.
- Kampschreur, M. J., Tan, N. C. G., Kleerebezem, R., Picioreanu, C., Jetten, M. S. M., van Loosdrecht, M. C. M., jan 2008. Effect of dynamic process conditions on nitrogen oxides emission from a nitrifying culture. *Environmental Science & Technology* 42 (2), 429–435.
DOI: 10.1021/es071667p
- Krause, K., Böcker, K., Londong, J., 2002a. Simulation of a nitrification control concept considering influent ammonium load. *Water Science and Technology* 45 (4-5), 413–420.
- Krause, K., BÄ¶cker, K., Londong, J., 2002b. Simulation of a nitrification control concept considering influent ammonium load. *Water Science and Technology* 45, 413–420.
- Lijklema, L., Tyson, J. M., Lesouef, A., 1993. Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the interurba '92 workshop conclusions. *Water Science and Technol* 27 (12), 1–29.
- Lindberg, C., Carlsson, B., 1996a. Nonlinear and set-point control of the dissolved oxygen concentration in an activated sludge process. *Water Science and Technology* 34 (3-4), 135–142.
DOI: 10.1016/0273-1223(96)00565-3
- Lindberg, C.-F., Carlsson, B., 1996b. Adaptive control of external carbon flow rate in an activated sludge process. *Water science and technology* 34 (3-4), 173–180.
- Lingireddy, S., Brion, G. M., 2005. *Artificial neural networks in water supply engineering*. ASCE Publications.
- Lukasse, I., Keesman, K., Klapwijk, A., Vanstraten, G., 1998. Optimal control of n-removal in ASPs. *Water Science and Technology* 38 (3), 255–262.
DOI: 10.1016/s0273-1223(98)00483-1
- Lukasse, L., Keesman, K., Klapwijk, A., Vanstraten, G., 1999. A comparison of NH/NO control strategies for alternating activated sludge processes. *Water Science and Technology* 39 (4), 93–102.
DOI: 10.1016/s0273-1223(99)00061-x
- Lukasse, L. J. S., Keesman, K. J., Klapwijk, A., van Straten, G., 1997. Adaptive receding horizon optimal control of n-removing activated sludge processes. En: *In Proc. of the 11th Forum for Applied Biotechnology*. Univ. Gent, pp. 1665–1672.
- Lynggaard-Jensen, A., anf F. Husum, P. A., Nygaard, M., Kaltoft, J., Landgren, L., MÄ¶ller, F., E. Brodersen, E., 2010. Increased performance of secondary clarifiers using dynamic distribution of minimum return sludge rates. *Water Science Technology* 60 (9), 2439–2445.
- Machado, V. C., Gabriel, D., Lafuente, J., Baeza, J. A., dec 2009. Cost and effluent quality controllers design based on the relative gain array for a nutrient removal WWTP. *Water Research* 43 (20), 5129–5141.
DOI: 10.1016/j.watres.2009.08.011
- Maeda, K., Inoue, S., Hirotsuji, J., Nonoyama, M., Aya, S., 1990. A new expert system based on deep knowledge for water and wastewater treatment plant. En: *In Proc. of the 5th IAWPRC Workshop on Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems*. Pergamon, Yokohama and Kyoto, Japan, pp. 219–226.
- Maere, T., Verrecht, B., Moerenhout, S., Judd, S., Nopens, I., mar 2011. BSM-MBR: A benchmark simulation model to compare control and operational strategies for membrane bioreactors. *Water Research* 45 (6), 2181–2190.

- DOI: 10.1016/j.watres.2011.01.006
- Marsili-Libelli, S., 1984. Optimal control of the activated sludge process. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 6 (3), 146–152.
- Marsili-Libelli, S., 1989. Modelling, identification and control of the activated sludge process. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 89–148. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0007860>
- DOI: 10.1007/BFb0007860
- Meirlaen, J., Van Assel, J., Vanrolleghem, P. A., 2002. Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models. *Wat. Sci. Tech* 45 (3), 109–16.
- Meneses, M., Concepción, H., Vilanova, R., apr 2016. Joint environmental and economical analysis of wastewater treatment plants control strategies: A benchmark scenario analysis. *Sustainability* 8 (4), 360. DOI: 10.3390/su8040360
- Meneses, M., Concepción, H., Vrečko, D., Vilanova, R., nov 2015. Life cycle assessment as an environmental evaluation tool for control strategies in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production* 107, 653–661. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.057
- Meyer, U., Pöpel, H., 2003. Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in wwt-plants with pre-denitrification. *Water Science and Technology* 47 (11), 69–76.
- Nasr, M., Moustafa, M., Seif, H., El-Kobrosy, G., 2014. Application of fuzzy logic control for benchmark simulation model. 1. *Sustainable Environment Research* 24 (4).
- Ni, B.-J., Yuan, Z., Chandran, K., Vanrolleghem, P. A., Murthy, S., aug 2012. Evaluating four mathematical models for nitrous oxide production by autotrophic ammonia-oxidizing bacteria. *Biotechnology and Bioengineering* 110 (1), 153–163. DOI: 10.1002/bit.24620
- Olsson, G., Andersson, B., Hellstrom, B. G., Holmström, H., Reinius, L. G., Vopatek, P., 1989. Measurements, data analysis and control methods in wastewater treatment plants—state of the art and future trends. *Water Science and Technology* 21 (10-11), 1333–1345.
- Olsson, G., Aspegren, H., Nielsen, M., 1998. Operation and control of wastewater treatment — a scandinavian perspective over 20 years. *Water Science and Technology* 37 (12), 1–13. DOI: 10.1016/s0273-1223(98)00364-3
- Olsson, G., Newell, B., 1999. Wastewater treatment systems: modelling, diagnosis and control. IWA publishing.
- Olsson, G., Nielsen, M., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A., Steyer, J.-P., 2005. Instrumentation, control and automation in wastewater systems. IWA publishing.
- Olsson, G., Rundqwist, L., Eriksson, L., Hall, L., 1985. Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems, *Advances in Water Pollution Control*. Int Association on Water Pollution Research and Control, Ch. Self-tuning control of the dissolved oxygen concentration in activated sludge systems, pp. 473–480.
- Ostace, G. S., Baeza, J. A., Guerrero, J., Guisasaola, A., Cristea, V. M., Agachi, P. Ş., Lafuente, J., jun 2013. Development and economic assessment of different WWTP control strategies for optimal simultaneous removal of carbon, nitrogen and phosphorus. *Computers & Chemical Engineering* 53, 164–177. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.03.007
- Pan, Y., Ni, B.-J., Yuan, Z., oct 2013. Modeling electron competition among nitrogen oxides reduction and n₂o accumulation in denitrification. *Environmental Science & Technology* 47 (19), 11083–11091. DOI: 10.1021/es402348n
- Peng, Y., Ma, Y., Wang, S., Wang, X., 2005. Fuzzy control of nitrogen removal in predenitrification process using orp. *Water science and technology* 52 (12), 161–169.
- Piotrowski, R., Brdys, M., Konarczak, K., Duzinkiewicz, K., Chotkowski, W., 2008. Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. *Control Engineering Practice* 16 (1), 114–131.
- Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J. L., Krebs, P., Mark, O., Schilling, W., Schäfers, M., Vanrolleghem, P. A., 2002. Deterministic modelling of integrated urban drainage systems. *Wat. Sci. Tech.* 45. (3), 81–94.
- Rauch, W., Harremoës, P., apr 1999. Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems. *Water Research* 33 (5), 1265–1277. DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00304-2
- Revollar, S., Vega, P., Vilanova, R., 2015. Economic optimization of wastewater treatment plants using Non Linear Model Predictive Control. En: 19th International Conference on System Theory, Control and Computing. 14-16 October, Cheile Gradistei, Romania.
- Rieger, L., Alex, J., Winkler, S., Boehler, M., Thomann, M., Siegrist, H., 2003. Progress in sensor technology - progress in process control? part i: Sensor property investigation and classification. *Water Sci. Technolgy* 47 (2), 103–111.
- Rodriguez-Roda, I., Sánchez-Marré, M., Comas, J., Baeza, J., Colprim, J., Lafuente, J., Cortés, U., Poch, M., 2002. A hybrid supervisory system to support wwt operation: implementation and validation. *Water science and technology* 45 (4-5), 289–297.
- Rojas, J., Baeza, J. A., Vilanova, R., 2011. Effect of the controller tuning on the performance of the bsm1 using a data driven approach. En: Proceedings of the 8th International IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment in Water Management, San Sebastián, Spain.
- Rojas, J. D., Flores-Alsina, X., Jeppsson, U., Vilanova, R., 2012. Application of multivariate virtual reference feedback tuning for wastewater treatment plant control. *Control Engineering Practice* 20, 499–510.
- Rossman, L., 2009. Storm water management model user's manual version 5.0. epa/600/r-05/040. Tech. rep., National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Samie, G., Bernier, J., Rocher, V., Lessard, P., feb 2011. Modeling nitrogen removal for a denitrification biofilter. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 34 (6), 747–755. DOI: 10.1007/s00449-011-0524-0
- Samuelsson, P., Carlsson, B., 2001. Feed-forward control of the external carbon flow rate in an activated sludge process. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 43, 115–122.
- Samuelsson, P., Halvarsson, B., Carlsson, B., 2007. Cost-efficient operation of a denitrifying activated sludge process. *Water research* 41 (11), 2325–2332.
- Santín, I., Pedret, C., Vilanova, R., 2015a. Applying variable dissolved oxygen set point in a two level hierarchical control structure to a wastewater treatment process. *Journal of Process Control* 28, 40–55.
- Santín, I., Pedret, C., Vilanova, R., 2015b. Fuzzy control and Model Predictive Control Configurations for Effluent Violations Removal in Wastewater Treatment Plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 54 (10), 2763–2775.
- Santín, I., Pedret, C., Vilanova, R., 2016. Control and Decision Strategies in Wastewater Treatment Plants for Operation Improvement. Springer.
- Santín, I., Pedret, C., Vilanova, R., Meneses, M., 2016. Advanced decision control system for effluent violations removal in wastewater treatment plants. *Control Engineering Practice* 279, 207–219.
- Schmitt, T., Huber, W., oct 2006. The scope of integrated modelling: system boundaries, sub-systems, scales and disciplines. *Water Science & Technology* 54 (6-7), 405. DOI: 10.2166/wst.2006.595
- Schutze, M., Butler, D., Beck, B. M., 2011. Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems. Springer London.
- Schutze, M., Butler, D., Beck, M., 1999. Optimisation of control strategies for the urban wastewater system ? an integrated approach. *Water Science and Technology* 39 (9), 209–216. DOI: 10.1016/s0273-1223(99)00235-8
- Serralta, J., Ribes, J., Seco, A., Ferrer, J., 2002. A supervisory control system for optimising nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 45 (4-5), 309–316.
- Shanahan, P., Borchardt, D., Henze, M., Rauch, W., Reichert, P., Somlyódy, L., Vanrolleghem, P., 2001. River water quality model no. 1 (rwwqm1): I. modelling approach. *Water Science and Technology* 43 (5), 1–9. URL: <http://wst.iwaponline.com/content/43/5/1>
- Shen, W., Chen, X., Pons, M., Corriou, J., 2009. Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation. *Chemical Engineering Journal* 155 (1-2), 161–174.
- Singman, J., 1999. Efficient control of wastewater treatment plant? a benchmark study. Master's thesis, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden.
- Stare, A., Vrečko, D., Hvala, N., Strmcnik, S., 2007a. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs: A simulation study. *Water Research* 41 (9), 2004–2014.
- Stare, A., Vrečko, D., Hvala, N., Strmcnik, S., may 2007b. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms

- of operating costs: A simulation study. *Water Research* 41 (9), 2004–2014.
DOI: 10.1016/j.watres.2007.01.029
- Steffens, M., Lant, P., aug 1999. Multivariable control of nutrient-removing activated sludge systems. *Water Research* 33 (12), 2864–2878.
DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00521-1
- Stephanopoulos, G., Ng, C., apr 2000. Perspectives on the synthesis of plant-wide control structures. *Journal of Process Control* 10 (2-3), 97–111.
DOI: 10.1016/s0959-1524(99)00023-2
- Stepner, D., Petersack, J., 1974. *Progress in Water Technology*, Vol. 6, Instrumentation, Control and Automation for Wastewater Treatment Systems. Pergamon Press, Oxford, Ch. Date management and computerized control of a secondary waste-water-treatment plant, pp. 417–423.
- Steyer, J. P., Bernard, O., Batstone, D. J., Angelidaki, I., feb 2006. Lessons learnt from 15 years of ICA in anaerobic digesters. *Water Science and Technology* 53 (4-5), 25–33.
DOI: 10.2166/wst.2006.107
- Traoré, A., Grieu, S., Thiery, F., Polit, M., Colprim, J., jun 2006. Control of sludge height in a secondary settler using fuzzy algorithms. *Computers & Chemical Engineering* 30 (8), 1235–1242.
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2006.02.020
- Vanrolleghem, P., 1994. On-line modeling of activated sludge processes: development of an adaptive sensor. Ph.D. thesis, University of Gent.
- Vanrolleghem, P., Benedetti, L., Meirlaen, J., apr 2005. Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. *Environmental Modelling & Software* 20 (4), 427–442.
DOI: 10.1016/j.envsoft.2004.02.004
- Vanrolleghem, P. A., Gillot, S., 2002a. Robustness and economic measures as control benchmark performance criteria. *Water Science and Technology* 45 (4-5), 117–126.
- Vanrolleghem, P. A., Gillot, S., 2002b. Robustness and economic measures as control benchmark performance criteria. *Water Science and Technology* 45 (4-5), 117–126.
- Vanrolleghem, P. A., Jeppsson, U., Carstensen, J., Carlsson, B., Olsson, G., 1996. Integration of wastewater treatment plant design and operation : a systematic approach using cost functions. *Water Science and Technology* 34 (3-4), 159–171.
- Vilanova, R., Alfaro, V. M., 2011. Control PID robusto: Una visión panorámica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 8, 141–148.
- Vilanova, R., Katebi, R., Alfaro, V., 22-26 September 2009. Multi-loop pi-based control strategies for the activated sludge process. En: In Proc. of the IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA). Mallorca, Spain.
- Vilanova, R., Katebi, R., Wahab, N., 2011. N-removal on wastewater treatment plants: A process control approach. *Journal of Water Resource and Protection* 3, 1–11.
- Vilanova, R., SantÁín, I., Pedret, C., 2017. Control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales: Modelado y simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 14 (3), 217 – 233.
- Vitasovic, Z., Andrews, J., 1989. An integrated dynamic model and control system for activated sludge wwtpp's part ii - control systems. *Water Poll. Res. J. Canada* 24 (4), 49722.
- Vrečko, D., Hvala, N., Stare, A., Burica, O., Strazar, M., Levstek, M., Cerar, P., Podbevsek, S., 2006. Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers. *Water Science Technology* 53 (4-5), 125–132.
- Vrečko, D., Hvala, N., Strazar, M., 2011. The application of model predictive control of ammonia nitrogen in an activated sludge process. *Water Science and Technology* 64 (5), 1115–1121.
- Wahab, N. A., Katebi, J., R. B., 2009. Multivariable PID control design for activated sludge process with nitrification and denitrification. *Biochemical Engineering Journal* 45 (3), 239–248.
- Yamanaka, O., Obara, T., Yamamoto, K., 2006. Total cost minimization control scheme for biological wastewater treatment process and its evaluation based on the cost benchmark process. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 53, 203–214.
- Yong, M., Yong-zhen, P., Xiao-lian, W., Shu-ying, W., jun 2006a. Intelligent control aeration and external carbon addition for improving nitrogen removal. *Environmental Modelling & Software* 21 (6), 821–828.
DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.02.009
- Yong, M., Yongzhen, P., Jeppsson, U., 2006b. Dynamic evaluation of integrated control strategies for enhanced nitrogen removal in activated sludge processes. *Control Engineering Practice* 14 (11), 1269–1278.
- Yuan, Z., Blackall, L. L., jan 2002. Sludge population optimisation: a new dimension for the control of biological wastewater treatment systems. *Water Research* 36 (2), 482–490.
DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00230-5
- Yuan, Z., Bogaert, H., Rosen, C., Verstraete, W., 2002a. Sludge blanket height control in secondary clarifiers. *Water Intelligence Online*.
- Yuan, Z., Keller, J., 2003. Integrated control of nitrate recirculation and external carbon addition in a predenitrification system. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 48, 345–354.
- Yuan, Z., Oehmen, A., Ingildsen, P., 2002b. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems. *Water Science and Technology* 45, 29–36.
- Zhao, L., Chai, T., 2005. In *Advances in neural networks*. Second international symposium on neural networks. Springer, Ch. Wastewater BOD forecasting model for optimal operation using robust time delay neural network.
- Zhu, G., Peng, Y., Ma, B., Wang, Y., Yin, C., 2009. Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal. *Chemical Engineering Journal* 151 (1), 195–201.