



**DIPUTACIÓN FORAL DE GIPUZKOA
GIPUZKOAKO FORU ALDUNDIA**

**BASES PARA LA ELABORACIÓN
DE LAS DIRECTRICES
SOBRE EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA
EN GIPUZKOA**

**ACTIVIDADES DE I + D RELACIONADAS
CON EL AGUA EN GIPUZKOA**



ACTIVIDADES DE I+D RELACIONADAS CON EL AGUA EN GIPUZKOA

- INDICE -

1.-	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2.-	<u>ACTIVIDADES DE I+D MÁS RELEVANTES RELACIONADAS SOBRE EL AGUA EN GIPUZKOA</u>	3
2.1.-	<u>ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS</u>	4
2.1.1.-	<u>Análisis experimental de la calidad de las aguas</u>	5
2.1.2.-	<u>Modelado matemático y simulación de la calidad del agua</u>	9
2.1.3.-	<u>Modelado hidrológico de los recursos hídricos</u>	14
2.1.4.-	<u>Análisis cuantitativo de la incertidumbre en los sistemas de drenaje y saneamiento</u>	16
2.2.-	<u>TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS</u>	18
2.2.1.-	<u>Procesos biológicos de alta carga para eliminación de DQO y sólidos</u>	21
2.2.2.-	<u>Procesos de predesnitrificación-nitrificación</u>	23
2.2.3.-	<u>Hidrodinámica de decantadores y prevención del bulking</u>	24
2.2.4.-	<u>Proceso secuencial SBR</u>	26
2.2.5.-	<u>Procesos de tratamiento basados en película biológica</u>	27
2.2.6.-	<u>Procesos biológicos de membranas</u>	30
2.2.7.-	<u>Tratamiento de los lodos de EDAR</u>	31
2.3.-	<u>TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES</u>	36
2.3.1.-	<u>Tecnologías de tratamiento de aguas residuales del sector papelerero</u>	37
2.3.2.-	<u>Tecnologías de tratamiento de aguas residuales del sector agroalimentario</u>	39
2.3.3.-	<u>Tecnologías electroquímicas para la purificación de efluentes industriales de tratamientos superficiales</u>	41
2.3.4.-	<u>Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero</u>	43
2.3.5.-	<u>Seguimiento y caracterización de vertidos industriales y lixiviados</u>	44

2.4.- NUEVAS HERRAMIENTAS PARA OPTIMIZAR LA EXPLOTACIÓN DE EDAR	45
2.4.1.- <u>Estrategias automáticas de control para procesos de predesnitrificación – nitrificación</u>	45
2.4.2.- <u>Estrategias automáticas de control para EDAR con procesos SBR</u>	49
2.4.3.- <u>Supervisión y control remoto de EDAR</u>	51
2.4.4.- <u>Simuladores de operación de EDAR</u>	53
3.- <u>LINEAS FUTURAS DE I+D PRIORITARIAS PARA EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA EN GIPUZKOA</u>	56
3.1.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES	56
3.1.1.- <u>Sistemas de detección y medida</u>	57
3.1.2.- <u>Modelado integral del agua (colectores, EDAR y ríos)</u>	57
3.2.- TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS.....	59
3.2.1.- <u>Gestión y tratamiento de aguas residuales y lodos</u>	59
3.2.2.- <u>Optimización de la explotación de las EDAR</u>	62
3.3.- SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	65
3.4.- GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA INDUSTRIA.....	65
4.- <u>CONCLUSIONES</u>	67

ACTIVIDADES DE I+D RELACIONADAS CON EL AGUA EN GIPUZKOA

1.- INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa ha sacado a concurso el estudio denominado "***Bases para la elaboración de las Directrices sobre el uso sostenible del agua en Gipuzkoa***", con el fin de analizar la situación actual del agua en el Territorio Histórico de Gipuzkoa y redactar un documento de referencia para posteriores directrices en relación al agua que puedan ser incorporadas al "*Plan de sostenibilidad de la acción de Gobierno de la Diputación Foral de Gipuzkoa*".

El presente documento, realizado por la Sección de Ingeniería Medioambiental del CEIT y titulado "***Actividades de I+D relacionadas con el uso sostenible del agua en Gipuzkoa***" realiza primeramente un análisis de los proyectos de I+D más relevantes que se han llevado a cabo en los últimos diez años y que, o bien han tenido como objetivo el agua en el Territorio Histórico de Gipuzkoa o que, aún habiendo sido realizados en otras zonas de la CAPV, tienen especiales implicaciones en el territorio guipuzcoano. Para ello se ha utilizado la información disponible en el CEIT y consultas a otros Centros Tecnológicos y Universidades de la Red Vasca de Tecnología.

En este Apartado correspondiente a actividades de I+D no se han referenciado aquellos trabajos relacionados con el agua en Gipuzkoa que han estado fundamentalmente orientados a recoger, organizar y sintetizar información sobre determinados aspectos de la disponibilidad o calidad del agua en el Territorio Histórico. Tampoco aquellos trabajos que puedan considerarse basados en las tecnologías actualmente disponibles y que, independientemente de su complejidad o calidad, no aportan una innovación significativa respecto al estado de la ciencia o tecnología.

Finalmente se presentan y discuten las líneas de I+D que, desde el punto de vista del CEIT, deberían ser consideradas como prioritarias a corto, medio y largo plazo de cara al uso sostenible del agua en Gipuzkoa, teniendo en cuenta los trabajos ya desarrollados, la capacidad científica y tecnológica disponible y la adaptación a nuestra realidad cercana de los principales retos y objetivos propuestos por la Directiva Marco del Agua y el VII Programa Marco de la Unión Europea.

2.- ACTIVIDADES DE I+D MAS RELEVANTES REALIZADAS SOBRE EL AGUA EN GIPUZKOA

En los siguientes apartados se describen los proyectos de I+D que el CEIT ha considerado como más relevantes en los últimos años, orientados a la gestión, caracterización y tratamiento del agua en el Territorio Histórico de Gipuzkoa o que, aún habiendo sido realizados en otras zonas de la CAPV, tienen especiales implicaciones en el territorio guipuzcoano. Tal y como se ha indicado previamente, para ello se ha utilizado la información disponible en el CEIT y una serie de consultas a otros Centros Tecnológicos y Universidades de la Red Vasca de Tecnología.

A la hora de seleccionar los trabajos más relevantes para el presente informe, se han ponderado especialmente los proyectos que, desde el punto de vista del CEIT, aportan, tanto en contenido como en metodología, una mayor innovación respecto al estado de la tecnología. Se han incluido, en la medida de lo posible, las publicaciones científicas relacionadas con los resultados del proyecto que, además de avalar la calidad científica de los trabajos relacionados, permiten ampliar la información cuando sea necesario.

Los proyectos recogidos se han agrupado en cuatro grandes grupos. El primer bloque describe las actividades de I+D orientadas a estudiar la calidad de las aguas en Gipuzkoa, tanto mediante estudios experimentales como mediante modelado matemático y simulación. Posteriormente, el segundo y tercer bloques presentan los proyectos de I+D que han tenido como objetivo el desarrollo o validación de nuevas tecnologías de tratamiento para EDAR urbanas e industriales respectivamente. Finalmente se presentan los proyectos de I+D más relevantes que han estado dirigidos a optimizar la explotación de las EDAR, utilizando para ello nuevas herramientas de modelado, control, supervisión, etc.

2.1.- ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS

La creciente escasez de agua a nivel mundial, exige cada vez más un aprovechamiento racional de los recursos hídricos en las diferentes regiones. Con este marco de visión, desde la Unión Europea se ha promovido durante los últimos años, tanto a nivel legislativo como a través del establecimiento de las líneas prioritarias en el I+D, todas aquellas acciones dirigidas a un uso sostenible de los recursos hídricos a diferentes niveles. Así cobran gran importancia en los últimos años la investigación de todos aquellos aspectos relacionados con la gestión de los riesgos relacionados con la calidad de las aguas: una gestión adecuada de los riesgos asegura una calidad adecuada del agua suministrada para diferentes usos. En este sentido el control de la calidad y su medida a través de parámetros que establezcan parámetros generales de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas resultan ser puntos críticos en el I+D a la hora asegurar la calidad del agua para su uso en la agricultura, la industria y en consumo humano. Aparecen así en los últimos años estudios y desarrollos de nuevos métodos de detección rápida así como de tecnologías para la identificación de contaminantes en aguas superficiales y subterráneas y aguas residuales, tanto a través de la investigación de nuevos sensores para la determinación directa de contaminantes como a través de indicadores biológicos que permitan una identificación indirecta. El uso racional del agua en la agricultura ha llevado al estudio, la comprobación y caracterización de los efectos de los productos agrícolas, minerales y otros compuestos sobre la calidad general del agua y sobre la contaminación difusa.

La contaminación procedente de fuentes difusas requiere también de modelos matemáticos que permita predecir el efecto de dichas descargas sobre la calidad de aguas superficiales y subterráneas. En este sentido hay una tendencia en la investigación al establecimiento de modelos matemáticos complejos tridimensionales que permitan describir fenómenos de difusión y transporte de contaminantes en diferentes escenarios acuáticos (aguas superficiales, subterráneas, bahías, estuarios, etc.).

Además, la progresiva implantación de las nuevas Directivas Europeas en materia de calidad de las aguas durante los próximos años va a ir reorientando la gestión de las cuencas hidrográficas hacia una visión integral del problema con un objetivo último de calidad ecológica del medio. La adecuación a estos nuevos conceptos va a requerir del desarrollo de nuevas herramientas que faciliten el desarrollo y la posterior aplicación y supervisión de los planes de gestión de cuencas por parte de las autoridades del agua.

Una de las herramientas de mayor aplicabilidad desde la generalización del uso de los computadores son los programas de simulación numérica de sistemas. En los últimos años se ha generalizado el desarrollo y aplicación de programas de simulación para la predicción del comportamiento hidráulico y la calidad de los diferentes elementos de los sistemas de drenaje y saneamiento (precipitación y escorrentía, redes de colectores, tanques de tormentas y alivijs, estaciones depuradoras, ríos, lagos, etc.). Sin embargo, es todavía un reto la integración de todos esos sistemas en modelos y simuladores que permitan la predicción del sistema en su totalidad de una forma eficiente y racional.

En los siguientes apartados se describen los proyectos de I+D de mayor relevancia relacionados con la calidad de las aguas continentales que se han desarrollado en Gipuzkoa en los últimos años. Se han referenciado también algunos trabajos que, si bien no se han realizado específicamente en Gipuzkoa, sus resultados pueden tener una especial relevancia en este territorio.

2.1.1.- Análisis experimental de la calidad de las aguas

La calidad de los recursos hídricos fluviales de la cuenca cantábrica fue evaluada por el departamento de Biología Vegetal y Ecología, UPV/EHU, durante los años 2003 a 2006 dentro del proyecto "***METATOOL. Metabolismo y perifiton de los ríos cantábricos: herramienta para evaluar el estado de los ecosistemas***

fluviales", financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, de forma indirecta a través del estudio de la producción primaria bruta y la respiración del ecosistema de los ríos cantábricos de la CAPV en base a medidas en continuo de oxígeno disuelto, tomadas en 20 estaciones de la red hidrometeorológica. Dicho estudio ha servido también para evaluar las comunidades perifíticas de dichas estaciones, y su contribución al metabolismo fluvial. Asimismo se ha pretendido identificar los factores ambientales responsables de las variaciones espaciales y temporales en el metabolismo y diseñar una aplicación informática para calcular de forma automatizada el metabolismo fluvial a partir de los datos en continuo de concentración de oxígeno, temperatura y caudal.

El trabajo realizado ha permitido determinar en continuo y durante un año (2003/04) el metabolismo de 20 ríos en Bizkaia y Gipuzkoa, estudiado las características físicas de sus cauces, determinado la biomasa y composición de sus comunidades perifíticas, e identificado los factores ambientales responsables del metabolismo. Los ríos vascos muestran grandes diferencias en su metabolismo, función de las características físico-químicas de las aguas, y de las modificaciones del cauce. Algunas actividades humanas, como las canalizaciones o las grandes obras públicas, afectan seriamente el funcionamiento del ecosistema fluvial. Los datos sobre metabolismo de estas 20 estaciones están a punto para ser enviados a una revista internacional para su publicación.

En el mismo trabajo se han evaluado los cambios en el metabolismo en los ríos Urumea y Oria durante 14 años. Las dinámicas temporales de ambos ríos son muy contrastadas, ya que el Urumea está poco alterado, mientras que el Oria sufre el impacto de múltiples actividades. En tercer lugar, se ha estudiado el impacto de la derivación de agua para minicentrales en la capacidad de autodepuración del río Leizaran. Los resultados preliminares sugieren una fuerte incidencia de las hidroeléctricas en la dinámica de nutrientes. Se ha determinado a través de experimentos de laboratorio el efecto de los sólidos en suspensión sobre el perifiton y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales, con un claro efecto perjudicial de los sólidos que cubren el lecho.

Finalmente, los resultados del trabajo han permitido crear una aplicación basada en EXCEL, RIVERMET[®], para calcular el metabolismo fluvial en base a curvas nictemerales de saturación de oxígeno. Dicha aplicación está registrada en el Registro de la Propiedad Intelectual. Sin embargo, puede descargarse gratuitamente en <http://www.ehu.es/streamecology> y puede consultarse en la siguiente publicación:

- Izagirre O, Bermejo M, Pozo J & Elosegi A. 2005. *RIVERMET[®]: an Excel-based tool to calculate river metabolism from diel oxygen concentration curves*. Environmental Modelling & Software (pendiente de publicación).

Dadas las características especiales de Gipuzkoa, con una importante interacción entre aguas continentales y aguas marinas, resultan relevantes en este territorio histórico los trabajos de investigación destinados a establecer la calidad de las aguas en zonas en las que esta agua se entremezclan así como la dispersión de contaminantes de procedencia continental en zonas costeras. En este sentido, AZTI desarrolló durante los años 2000-2002, un trabajo de investigación en el que se midieron las corrientes existentes a diferentes profundidades en las bahías de San Sebastián y Hondarribia, tomándose además muestras de sedimentos en la sección costera, con el fin conocer tanto los cambios estacionales en los modelos de circulación de aguas como conocer los patrones de dispersión de contaminantes en las bahías, identificándose dos modelos de circulación estacionales. El análisis tridimensional de las corrientes permitió también mejorar la comprensión de los fenómenos implicados en las variaciones estacionales de las corrientes. Dicho trabajo dio lugar a la publicación del artículo:

- Fontán A., Mader J., González M., Uriarte A., Gyssels P., Collins M.B. *Marine hydrodynamics between San Sebastián and Hondarribia (Guipúzcoa, northern Spain): field measurements and numerical modelling*. Scientia Marina, vol. 70, suppl. 1: 51-63, 2006

En esta misma línea de trabajo se han desarrollado por parte de AZTI diversos trabajos de investigación similares en otros territorios con resultados que pueden resultar relevantes para el territorio histórico de Guipúzcoa, como pueden ser los estudios de dispersión física realizados en el puerto de Barcelona, como parte de un proyecto cooperativo de I+D europeo SPILLREC "***Enhanced Design and Manufacturing of Waterborne Spills Recovery Systems***" con la participación de 4 grupos investigadores de Alemania (FHM) y España (CIMNE, UB, AZTI), cuatro empresas alemanas (OPTIMAL, TAO), españolas (BUILDAIR), e inglesas (OPEC) y una organización portuaria (APB). También, desde el año 1994 se realiza el seguimiento de la calidad del agua en el estuario del Nervión a través de la medición de diferentes parámetros fisicoquímicos y test ecotoxicológicos, trabajo realizado en conjunción con el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia y los estudios a largo plazo realizados en el estuario de Mondejo (Portugal). Estos estudios han dado lugar a diferentes publicaciones y comunicaciones científicas, de las que citamos algunas a continuación:

- Grifoll M., Espino M., González M., Ferrer L., Sánchez-Arcilla A. (2006). *Spatial residence time description for water discharges in harbours* Antalya (Turquía) : 4th International Conference on Marine Waste Water Discharges and Coastal Environment, 2006.
- Franco J., Borja A., Belzunce M.J., Garmendia J.M., Mentxaka I., Muxika I., Pérez V., Revilla M., Solaun O. (2006). *Integrative assessment of sediment contamination in the Nervion estuary (Basque Country)* Ourense : Aica Ediciones, 2006. Álvarez I. (ed.), deCastro M. (ed.), Gómez-Gesteira M. (ed.), Lorenzo M.N. (ed.), Prego R. (ed.): Oceanography of the Bay of Biscay
- Belzunce M.J., Solaun O., Franco J., Borja A., Valencia V. Monitoring Programme for the Environmental assessment at the Basque Coast. Proceedings of SEDNET Conference, European Sediment Research Network (EVK-2001-2002). Venice International University.
- Salas F., Borja A., Marques J.C. (2006) *Estuarine ecosystems controversial environments when dealing with ecological status assessment tools: the case of Mondego estuary (Portugal)*. Canada: ALSO, 2006

Como parte colateral de los estudios relacionados con el agua en Gipuzkoa, se han desarrollado diversos estudios sobre poblaciones de vertebrados en hábitat acuáticos como los realizados por la Facultad de Farmacia de Universidad País Vasco, durante los años 2001 a 2005, dentro del proyecto titulado "***Caracterización genética de las poblaciones de Gipuzkoa de Trucha común (Salmo trutta) Mediante la técnica de PCR-RFLP aplicada sobre ADN nuclear y mitocondrial***". Estos estudios han perseguido realizar una caracterización genética de las poblaciones de truchas de los principales cauces fluviales del Territorio Histórico de Gipuzkoa para poder establecer cuáles son los tramos de ríos en los que los persisten poblaciones de trucha común libres de contaminación genética. Para ello se han analizado 23 poblaciones repartidas por las cuencas de los ríos Deba, Urola, Oria, Leitzaran, Urumea, Oiartzun y Bidasoa. La caracterización se ha realizado mediante análisis de los haplotipos de ADN mitocondrial, así como mediante el estudio de marcadores de microsatélites. Además, se ha procedido a cuantificar los niveles de introgresión genética procedente de las repoblaciones efectuadas con animales de origen centroeuropeo. Del mismo modo, AZTI ha desarrollado numerosos estudios relacionados generalmente con especies de interés pesquero y con especies de vertebrados e invertebrados que se desarrollan en ambientes marinos

2.1.2.- Modelado matemático y simulación de la calidad del agua

El modelado y simulación de la hidráulica y la calidad en ríos y colectores permite predecir la evolución dinámica de la calidad del agua en todo el sistema de saneamiento, incluyendo las redes de colectores, las estaciones depuradoras y los medios receptores, analizando el efecto de las posibles perturbaciones externas o estrategias de operación y optimizando la gestión integrada del agua. Esta línea de actividad en I+D está orientada al modelado matemático y simulación de la calidad del agua en los diversos elementos de las líneas de drenaje y saneamiento de aguas y en los medios receptores. Es una temática muy amplia que se ha venido plasmando en un gran número de proyectos orientados a estudiar cada uno de los subsistemas (colectores, EDAR y ríos), así como sus interacciones.

Entre los años 1996 y 1999, la Sección de Ingeniería Medioambiental del CEIT inició esta línea de investigación con un proyecto financiado por la CICYT y titulado "**Optimización de la gestión integral de ríos basada en técnicas de modelización matemática, identificación y simulación**" en el que se desarrollaron las primeras versiones de los modelos de calidad del agua en ríos y canales. Una vez constatado el gran interés y potencial del modelado y simulación de la calidad del agua, la línea de investigación del CEIT se fue consolidando con otros proyectos financiados en la CAPV por la SPRI del Gobierno Vasco titulados "**Diseño, operación y control de las redes de saneamiento integral de aguas residuales urbanas**" y "**Modelización matemática y simulación de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas**" que sirvieron de plataforma para la mejora de los modelos iniciales y para el desarrollo de algoritmos de resolución numérica de los modelos desarrollados. Los resultados de estos proyectos de I+D financiados directamente por la SPRI se plasmaron en las primeras contribuciones sobre esta temática a Conferencias y Workshops especializados, entre las que caben destacar las siguientes:

- E. Carrasco, M.T. Linaza, E. Ayesa, A. Salterain (2000). Sewer simulator as first step towards the simulation of integrated urban drainage systems. *1st International Conference on Urban Drainage via Internet* (<http://www.hydroinform.com/ICUDI>). Sponsored by Urban Water (International Journal)
- M.T. Linaza, E. Carrasco, A. Salterain, E. Ayesa (2000). Towards the simulation of integrated urban drainage systems. *Eight International Conference on Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies (ENVIROSOFT 2000)*. Bilbao, 28-30 June 2000.
- M.T. Linaza, A. Salterain and E. Ayesa (2001). Real time control modules for sewer simulations. *Proceedings of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation – ICA 2001. Malmo, Sweden, June 3-7, 2001.*
- M.T. Linaza, E. Carrasco, A. Salterain, E. Ayesa (2001). Sewer hydraulics and transport simulator: towards a water quality modelling and calibration tool. *Proceedings of the 4th international conference on innovative technologies in urban storm drainage; Lyon (France)-June 25-27, 2001.*

Una vez desarrolladas las bases matemáticas necesarias para el modelado y simulación de ríos y colectores, entre los años 2000 y 2002 se abordó un ambicioso proyecto de Cooperación INTEK titulado "***Diseño, operación y control de las redes de colectores basado en la simulación de modelos de calidad del agua***" en el que, además del CEIT, participaron IKAUR S.A., ATM S.A, Goimendi S.L., la DFG y Aguas del Añarbe. El objetivo básico del proyecto fue desarrollar un modelo matemático de calidad del agua para la simulación dinámica de las redes de colectores de los sistemas de saneamiento urbano y su impacto en los ríos receptores que incorporase tanto los procesos hidrodinámicos de transporte del agua residual y los contaminantes como los fenómenos de biodegradación. La capacidad predictiva de los modelos debía verificarse tomando como base experimental varios casos reales de estudio (comarca de Pamplona, colector de Azpeitia y la cuenca del río Oiartzun).

Las simulaciones del comportamiento hidráulico de las redes de colectores realizadas con el software desarrollado por el CEIT mostraron resultados comparables a otros productos comerciales (MOUSE, SewerCat, Matlab) para comportamientos estacionarios y dinámicos de un tramo de colectores en la comarca de Pamplona. El modelo de calidad del agua en colectores desarrollado en el proyecto incorporaba el transporte de contaminantes y las transformaciones bioquímicas internas. El submodelo de transporte desarrollado se validó frente a las predicciones del módulo A/D del MOUSE y se analizó el efecto de los valores del coeficiente de dispersión. Por otra parte, se realizó un análisis de sensibilidad del submodelo de calidad que permitió seleccionar las variables mas adecuadas para la calibración experimental de los modelos. Finalmente, se realizó una calibración experimental del modelo completo (hidráulica y calidad) en un tramo de colector localizado entre Azpeitia y la EDAR de Badiolegi. Los resultados de la calibración fueron satisfactorios, si bien se constató que la escasa actividad biológica y la pequeña longitud del tramo de colector analizado no eran suficientes para realizar una calibración rigurosa del modelo de transformaciones bioquímicas.

Dentro de los sistemas de drenaje y saneamiento, en el proyecto se estudiaron de manera específica los tanques de tormenta, desarrollando un modelo dinámico capaz de predecir su hidráulica y los fenómenos de clarificación y espesamiento que se producen en su interior. Para ello se desarrollaron modelos unidimensionales de capas, como adaptación de los modelos existentes para describir los sedimentadores primarios de las EDAR. Los modelos desarrollados se calibraron y validaron experimentalmente en un tanque de tormentas situado junto a la estación de bombeo de Larzabal en el río Oiartzun, mostrando resultados satisfactorios.

Finalmente, dentro del mismo proyecto, se realizó un simulador dinámico de la calidad del agua en el tramo de del río Urola comprendido entre la empresa Patricio Echeverría en Legazpi y la estación de afloramientos de Aitzu. El modelo de calidad resultante fue calibrado frente a diferentes campañas experimentales en tiempo seco en las que se tomaron muestras de sólidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y sales disueltas en varios puntos intermedios del tramo de estudio. Las predicciones del modelo de calidad fueron satisfactorias, tanto en condiciones estacionarias a tiempos seco, como en el transitorio producido al comenzar a nitrificar la EDAR de Urretxu durante una de las campañas experimentales.

Los resultados finales del proyecto fueron muy prometedores de cara a un modelado integrado de las redes de drenaje y saneamiento y los medios receptores, aunque las limitaciones de tiempo del proyecto no permitieron una validación completa de los modelos de calidad integrados, que ha quedado pendiente para posteriores trabajos.

La integración de modelos de colectores y EDAR fue estudiada con mayor profundidad el año 2003 dentro del proyecto titulado "***Asistencia técnica para el estudio de optimización funcional del sistema general de saneamiento de la ría de Bilbao y para el estudio previo de la EDAR de Lamiako***" en el que el CEIT y el Danish Hydraulic Institute (DHI) colaboraron para integrar los modelos de la red de saneamiento de Bilbao, elaborados en el programa MIKE, con modelos de las EDAR de Galindo y Lamiko (todavía en fase de definición en aquellos momentos) que estaban

realizados en las plataformas de simulación WEST, GPS-X y STOAT. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, aunque constataron las dificultades existentes para unir de manera simple y rigurosa los modelos matemáticos de colectores, EDAR y medios receptores en la mayor parte de las plataformas computacionales existentes, por lo que hubo que desarrollar interfaces específicos para el caso de estudio.

Finalmente, hay que indicar que la línea de I+D del CEIT en modelado y simulación de la calidad del agua en ríos ha seguido desarrollándose durante los últimos años para la empresa EPTISA, dentro de los proyectos "**Desarrollo y simulación de un nuevo simulador de la calidad del agua en ríos**" y "**Simulación de la calidad del agua en el río Tajo**". En estos proyectos se ha desarrollado un nuevo simulador denominado CalHidra y se ha validado su capacidad predictiva en tramos de larga longitud de los ríos Ebro (80 Km en la zona urbana de Zaragoza) y Manzanares-Jarama-Tajo (150 Km en la zona urbana de Madrid) en colaboración con las Confederaciones Hidrográficas del Ebro y del Tajo. Los satisfactorios resultados obtenidos se han recogido en las siguientes publicaciones

- Salterain, L. Sancho, E. Rodriguez, L. Pinilla and E. Ayesa (2003). Development and verification of a new simulation tool for water quality prediction in the Ebro River. *WATER POLLUTION VII – Modelling, measuring and prediction*. Brebbia C.A., Almorza D. and Salas D (Eds.). WIT Press, Southampton U.K. ISBN: 1-85312-976-3.
- D. San Martín, E. Rodríguez, E. Ayesa, C. Martín, L. Sancho, A. Salterain and J.A. Unzue (2004). Development and verification of an Ebro river Water Quality Model for its course through Zaragoza. *Proceedings of the 5th International Symposium on Ecohydraulics. Aquatic Habitats: Analysis & Restoration. 182-186. Madrid, Spain, 12-17 September, 2004.*
- Salterain, L. Sancho, E. Rodriguez, L. Pinilla, E. Ayesa (2004). Desarrollo de una nueva herramienta para la predicción de la calidad del agua. Verificación en un tramo del río Ebro. *Tecnología del agua*, Num. 248, Mayo 2004, pp. 52-58.

- Martín, C.M. Cardona, D. San Martín, A. Salterain and E. Ayesa (2006). Dynamic simulation of the water quality in the rivers based on the IWA RWQM1. Application of the new simulator CalHidra 2.0 to the Tajo River. *Water Science and Technology*, 54, 11, pp. 75-83.

2.1.3.- Modelado hidrológico de los recursos hídricos

Otro elemento de gran interés y complementario con la predicción de la calidad del agua en los ríos y sistemas de saneamiento, es el desarrollo y validación de modelos hidrológicos que permitan predecir los caudales en diferentes puntos de las cuencas a partir de las precipitaciones.

En los años 2002 y 2003, la Universidad Politécnica de Valencia desarrolló un proyecto de I+D denominado "***Modelización de los recursos hídricos de las cuencas de los ríos de la Comunidad Autónoma del País Vasco***" que tuvo como objetivo la estimación de los recursos hídricos de las cuencas vertientes a la CAPV (41 cuencas con un total de 8.500 km²) con discretización diaria, mediante la simulación de una serie histórica de 50 años de precipitación para la obtención de las correspondientes series de caudales en un número importante de puntos.

Para ello se utilizó el modelo hidrológico distribuido TETIS, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia, que, gracias a su carácter distribuido, permitía obtener predicciones en cualquier lugar de la cuenca (sin una definición "a priori" de los puntos de simulación). Además no era precisa la regionalización de los parámetros, ya que los mapas de parámetros estimados cubren todo el territorio.

El principal resultado logrado en el proyecto fue la calibración del Modelo TETIS en 17 cuencas y su validación en 60 estaciones de aforo adicionales con resultados excelentes. El modelo desarrollado permite obtener series de caudales diarios por simulación para cualquier punto de la CAPV. Además, durante el proyecto se terminó de desarrollar una herramienta de calibración automática para modelos hidrológicos distribuidos.

Los principales resultados científicos obtenidos en el proyecto quedaron plasmados en una serie de publicaciones que se indican a continuación:

- F. Francés, I. Vélez and J. Vélez. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* (pendiente de publicación)
- Vaskova, F. Francés y J. Vélez. "Empleo de la modelación distribuida en el estudio de los recursos hídricos del País Vasco". 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz (Portugal), Febrero de 2004.
- J. Vélez y F. Francés. "La calibración automática en la modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual". 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz (Portugal), Febrero de 2004.
- F. Francés y M. Puricelli. Poster: "Parameter structure and estimation for a distributed model using landscape information". XXVII Asamblea General de la European Geophysical Society, Niza (Francia), abril de 2003.
- J. Vélez, F. Francés and J.I. Vélez. Poster: " TETIS: a catchment hydrological distributed conceptual model". II Asamblea General de la European Geosciences Union, Viena (Austria), Abril de 2005.
- F. Frances and J. Vélez. Póster: "Automatic calibration using the SCE-UA algorithm for a hydrological distributed model. Application to a regional water resources estimation study". III Asamblea General de la European Geosciences Union, Viena (Austria), Abril de 2006

El grupo de investigación de Hidrología Aplicada de la Universidad Pública de Navarra llevó a cabo, también durante los años 2002 y 2003, el trabajo "**Análisis y cuantificación de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas de Guipúzcoa**", financiado por la Diputación Foral de Gipuzkoa, y tomando como base los datos registrados en la Red Hidrometeorológica de Gipuzkoa. El trabajo realizado en el proyecto se ha dirigido fundamentalmente a la identificación de los tipos de flujos y los factores que influyen en la generación de escorrentía mediante el análisis de los datos registrados y a la cuantificación de la respuesta de la cuenca, tanto a nivel del diseño hidrológico (determinación de caudales punta) como en recursos hídricos (cálculo de los aportes). Los resultados fundamentales del proyecto, además de un amplio conocimiento de la hidrología superficial de las cuencas de la red hidrometeorológica de Gipuzkoa, han contribuido a elaborar un modelo de HU, basado en la geomorfología de la cuenca, que ha aportado muy buenos resultados. Esta contribución se ha plasmado en dos tesis doctorales y en algunas publicaciones internacionales y otras en elaboración.

- Agirre U., M. Goñi, J. J. López and F. Gimena, 2005. Application of a Unit Hydrograph Based on Subwatershed Division and Comparison with the Nash's Instantaneous Unit Hydrograph. *Catena*. 64/2-3: 321-332.
- López, J.J., Gimena, F.N., Goñi, M, and Aguirre, U., 2005, Analysis of a unit hydrograph model based on watershed geomorphology represented as a cascade of reservoirs, *Agric. Water Manag.* 77:128-143.

2.1.4.- Análisis cuantitativo de la incertidumbre en los sistemas de drenaje y saneamiento

La validez predictiva de los modelos utilizados en la simulación de los sistemas hídricos, redes de colectores, ríos, etc. está claramente condicionada por la incertidumbre intrínsecamente asociada a los modelos matemáticos utilizados y a las entradas al sistema. La mayor parte de los estudios de simulación para el diseño u operación de las redes de drenaje y saneamiento están basadas en los resultados de

predicción de modelos determinísticos, debidamente ponderados según determinados criterios de seguridad, mas o menos empíricos. Es claro que un análisis riguroso de la incertidumbre y de su propagación a lo largo de los diferentes elementos del sistema permitiría un análisis más apropiado de las predicciones de los modelos y un diseño y operación del sistema más ajustado y económico. Parece claro que la incorporación de herramientas para el análisis cuantitativo de la incertidumbre asociada a los diferentes elementos de los sistemas de gestión y tratamiento del agua es un elemento de gran interés de cara a su progresiva optimización.

En esta línea, el CEIT y el Departamento de Automática de la Universidad Pública de Navarra comenzaron en el año 2004 un proyecto de investigación financiado por el MCYT titulado "***Modelado matemático, simulación y análisis integrado de la incertidumbre en los sistemas de drenaje y saneamiento de aguas***" en el que se están desarrollando nuevas herramientas matemáticas de análisis cuantitativo de riesgo basadas en Simulaciones de Monte Carlo y aplicadas a los modelos determinísticos de la hidráulica y calidad del agua en los diferentes elementos de las redes de drenaje y saneamiento. Los resultados del proyecto están siendo muy prometedores y las herramientas de análisis de incertidumbre están siendo aplicadas al estudio de diversos tramos de los ríos Urola y Tajo, así como a la simulación y control robusto QFT (bajo situaciones de incertidumbre) de algunas estaciones depuradoras. Algunos primeros resultados de esta novedosa línea de I+D han sido ya publicados internacionalmente :

- C. Martín, C.M. Cardona A. Salterain, E. Ayesa, I. Eguinoa, M. García-Sanz (2006). Uncertainty based calibration of a new River Water model. Accepted in the 7th *International Conference on Hydroinformatics (HIC 2006), Nice, 2006*
- M. García-Sanz, I. Eguinoa, E. Ayesa, C. Martín (2006). Non-diagonal multivariable robust QFT control of a wastewater treatment plant for simultaneous nitrogen and phosphorus removal. Accepted in the 5th *IFAC Symposium on Robust Control Design ROCOND 2006. Toulouse, France, July 5-7, 2006.*

2.2.- TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

En la década de los años noventa, una gran parte del I+D en la línea de aguas de las EDAR estuvo orientado al tratamiento biológico y en especial a la eliminación de nitrógeno y nitrógeno y fósforo combinadamente. En Europa ello vino determinado por la publicación de la Directiva 271 de 1991 en la que se hacía alusión específica a los requerimientos de eliminación de nitrógeno y fósforo para proteger cauces receptores propensos a la eutrofización. Primeramente se abordaron investigaciones de cara al diseño de plantas de tamaño mediano y grande. El proceso de fangos activados fue la tecnología más investigada en aspectos como la dinámica de poblaciones microbianas y prevención del bulking filamentoso, nuevas configuraciones de procesos, modelado matemático.

En el campo de la caracterización microbiana cabe destacar los métodos propuestos por Eikelboom y Jenkins basados en la observación por microscopía óptica y tinciones específicas de muestras de fangos. En la prevención de la proliferación de las bacterias filamentosas se investigó la capacidad del flujo pistón empleando reactores de pequeño tamaño en cabeza (selectores) que podían operar en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias.

En cuanto a las configuraciones de procesos se partía del proceso de predesnitrificación-nitrificación de eliminación de nitrógeno, al cual se le agrega una zona anaerobia para la eliminación de fósforo con distintas posibilidades del diagrama de flujos de entrada y de las recirculaciones que daban lugar a distintas configuraciones.

El modelado matemático tiene un gran impulso en la década de los 90 y también se expande a la eliminación de fósforo a partir del modelo de eliminación de materia orgánica y de nitrógeno desarrollado en los años 80. Se llevan a cabo numerosas investigaciones que culminan con un informe global de la IWA en el año 2000.

Debido a las limitaciones que presenta el proceso de fangos activados en cuanto al bulking y al espacio requerido, a mediados de los noventa irrumpen con fuerza dos tecnologías novedosas de biopelícula, los biofiltros granulares sumergidos y los procesos de lecho móvil que no producen bacterias filamentosas y que reducen considerablemente el espacio necesario. Los biofiltros granulares se basan en la tecnología de filtros de arena y emplean soportes de tres a cinco milímetros de diámetro, sobre los cuales se genera una biopelícula que degrada el agua y a la vez la filtra. Dado que se colmata se requiere un lavado diario que hace a esta tecnología compleja aunque muy eficiente, ya que consigue altas tasas de nitrificación y desnitrificación sin necesidad de emplear decantación secundaria. Los procesos de lecho móvil tienen una geometría similar al fango activo y se basan en el empleo de soportes de polietileno de alta densidad que se mueven con la aireación o agitación del reactor y en los que se generan una biopelícula que hace incrementar las tasas de nitrificación y desnitrificación respecto al proceso de fangos activos. La decantación secundaria es necesaria aunque es menos problemática.

En cuanto a las plantas pequeñas para aguas residuales, las investigaciones en los años 90 muestran un impulso de los procesos secuenciales SBR y de lecho móvil. Con los procesos SBR las plantas son más compactas, ya que la sedimentación se realiza en el mismo tanque que la biodegradación gracias al empleo de una alimentación discontinua y de fases de tiempo que pueden ser anaerobias, anóxicas y aerobias para llevar a cabo la eliminación de nitrógeno y fósforo.

La tecnología de los bioreactores de membrana en los años 90 es aplicada a pequeñas plantas con eliminación de materia orgánica y nitrógeno y la investigación se centró fundamentalmente en la sustitución de los módulos de membranas externos por módulos internos sumergidos en el licor mezcla con el fin de reducir los costes energéticos.

En lo referente al tratamiento de los lodos de EDAR, la tendencia general en Europa en 1990 era destinar a mejora de suelos el 35% del fango producido e incinerar un 10% distribuyéndose el resto en otros destinos; entonces se preveía que

en 2005 se mantendría el 35% en aplicación al terreno pero la incineración llegaría al 30% si bien la cantidad de lodo producido en saneamiento crecería en un 40%. Un 10% del lodo iría a vertedero aunque es éste un punto que no resulta de futuro. En este marco la estabilización biológica del fango (digestión) tiene un papel preponderante salvo en el caso de la incineración; pero ésta última cubriría sólo una parte de la demanda. En una línea de tratamiento de lodo urbano la digestión biológica es la parte más delicada y más difícil de gobernar. La línea también incluye espesamiento y flotación, deshidratación mecánica y, en algunos casos, secado térmico. El funcionamiento de todas estas unidades se conocen relativamente bien.

La estabilización biológica de los fangos de EDAR se efectúa mayoritariamente mediante digestión anaerobia (DA) mesófila para plantas grandes y mediante aeración a bajas temperaturas en las pequeñas. Existen en Europa digestores aerobios termófilos (TAD) para plantas de tamaño intermedio, con resultados muy prometedores, aunque la tecnología está poco extendida. La digestión anaerobia termófila tiene menos aplicaciones reales. También se da la co-digestión anaerobia seca del fango urbano y el compostaje (aerobio termófilo) del lodo junto con otros residuos orgánicos.

Hay gran cantidad de trabajos de investigación en plantas piloto sobre los aspectos más relevantes de la DA. Muchos coinciden en la importancia clave de la hidrólisis en estos procesos (al igual que en los aerobios) y el papel de la "solubilización" como proceso diferente aunque concatenado a la hidrólisis. Ambos fenómenos son clave para el dimensionado de los digestores mediante el tiempo de residencia, la carga orgánica volumétrica y la carga másica admisibles en cada tipo de proceso. Es muy importante el efecto que tiene la hidrólisis-solubilización en un reactor en el aumento de capacidad del reactor siguiente de la línea. Los parámetros de estabilidad de reactores y su sensibilidad son importantes para evaluar con tiempo cualquier problema que esté apareciendo. Las relaciones de acidificación / bicarbonatos, la relación de alcalinidades o el % de metano en el biogás son algunos de ellos.

La TAD se ha estudiado menos en investigación aunque hay ya bastantes trabajos en bibliografía, sobre todo en los USA. El proceso ATAD aparece como el más relevante de cara a la aplicación a suelos del lodo tratado. Se ha estudiado su papel como pre-tratamiento de un DA mesófilo (sistema DUAL) y como único tratamiento de lodos de EDAR. Hay ya una segunda generación de ATADs que ya no emplea los dos tanques en serie de 3 días de TRH cada uno y usa un solo reactor de tiempos de residencia altos. La higienización (eliminación de gérmenes patógenos) del lodo es uno de los puntos de mayor ventaja para este sistema.

Se ha trabajado en modelos tanto la digestión anaerobia (mayoría de trabajos) como la aerobia. De la bibliografía se desprende que estos modelos predicen el funcionamiento en condiciones muy concretas y no siempre; pero la investigación sigue progresando. El punto más crucial es la gran complejidad de los modelos y su dificultad de calibración. Se está trabajando para enlazar en el futuro los modelos que predicen el comportamiento de la línea de aguas con los de la de lodos: los retornos líquidos que proceden de la deshidratación del lodo digerido van tomando cada vez mayor relevancia en los trabajos de I+D.

Seguidamente se presentan los proyectos de I+D de mayor relevancia para Gipuzkoa relacionados con las tecnologías de tratamiento de aguas y lodos y que han sido realizados en los últimos años

2.2.1.- Procesos biológicos de alta carga para eliminación de DQO y sólidos

La Sección de Ingeniería Medioambiental del CEIT ha venido realizando estudios piloto en la CAPV en colaboración con diversas entidades públicas y privadas para caracterizar el agua residual influente en diferentes puntos, estudiar la capacidad de los posibles tratamientos y extraer información para el diseño y operación de las EDAR. Los trabajos piloto han combinado frecuentemente la construcción e instalación de las plantas piloto con campañas analíticas y con la utilización de modelos matemáticos y simuladores del proceso que permiten explorar comportamientos ante diferentes escenarios de operación o posibles perturbaciones.

Las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales en la CAPV con, lógicamente, función del medio receptor. En las que vierten directamente al mar se ha recurrido a procesos de alta carga (con fangos activados o biopelícula), mientras que las que vierten a río o ría incorporan procesos con eliminación biológica de nitrógeno y fisico-química de fósforo.

El año 1997, el CEIT realizó un estudio piloto de 12 meses para la Confederación Hidrográfica del Norte titulado "***Explotación de la estación piloto de aguas residuales para el estudio del saneamiento del área de San Sebastián (Gipuzkoa) con el objetivo de evaluar la capacidad de tratamiento del proceso de fangos activados de alta carga para las aguas residuales de San Sebastián***", utilizando para ello una planta piloto ubicada en la estación de bombeo de Sagüés. Los resultados del trabajo permitieron caracterizar el agua residual y determinar las condiciones operacionales más adecuadas para un comportamiento satisfactorio del proceso de alta carga, logrando rendimientos finales de eliminación del 72% en DQO y del 82% en SST.

De manera simultánea, durante los años 1996 a 1998, el CEIT llevó a cabo un estudio denominado "***Ensayos de caracterización en planta piloto del agua residual urbana de agua residual urbana de cara a futuras EDAR en Guipúzcoa***" para el Departamento de Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Guipúzcoa en el que se estudio el potencial de estas tecnologías para otras poblaciones de Gipuzkoa. De manera general se llegó a la conclusión de que operando con un tiempo de retención de sólidos de entre uno y dos días se puede conseguir rendimientos de DQO filtrada del 50% y de DQO total y sólidos suspendidos del 70%.

Específicamente orientado para el caso de la EDAR de San Sebastián, se desarrollo posteriormente (2003) el proyecto "***Tratabilidad físico - química y biológica de aguas papeleras de la comarca de San Sebastián***" en el que se evaluó el efecto de dichos vertidos en un proceso piloto de alta carga tratando aguas urbanas. Se concluyó que el rendimiento de eliminación de DQO total se podía mantener en el 70% gracias a que la biodegradabilidad de los vertidos era de ese mismo orden de magnitud.

2.2.1.- Procesos de predesnitrificación- nitrificación

Para el caso de EDAR con vertido a río o ría, los estudios piloto se han encaminado fundamentalmente a analizar la capacidad de eliminar nitrógeno. Esta línea de trabajo tiene una gran tradición en el CEIT, ya que los primeros trabajos en esta línea dentro de la CAPV se remontan a mediados de los años 90, para la EDAR de Galindo-Bilbao en el proyecto "***Evaluación en planta piloto del comportamiento del proceso R-D-N para las aguas residuales de Bilbao***" financiado por el EVE y el Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia (1992-1994) y para la EDAR de Crispijana-Vitoria en el proyecto "***Proyecto de eliminación de nitrógeno para la nueva EDAR de Crispijana***", financiado por AMVISA (1994-1995). En estos proyectos se desarrolló un extenso programa experimental en plantas piloto con el fin de evaluar el potencial de novedosas configuraciones de fangos activados, basadas en el concepto de regeneración de fangos para la eliminación de nitrógeno y la prevención de bacterias filamentosas. Así mismo se realizó un exhaustivo estudio de calibración del modelo matemático ASM1 que permitió posteriormente llevar a cabo simulaciones de cara al diseño de las plantas reales. Estas investigaciones fueron también de gran utilidad para el asesoramiento del CEIT a la Diputación Foral de Gipuzkoa en el marco de la instalación de las EDAR con vertido a río o ría. Las principales publicaciones científicas a que dieron lugar estos trabajos de pilotaje y modelado se indican a continuación:

- De la Sota, L. Larrea, L. Novak, P. Grau and M. Henze (1994). Performance and model calibration of R-D-N process in pilot plant. Wat. Sci. Tech., vol. 30, nº 6, pp. 355-364, 1994.
- L. Larrea, J.L. García de las Heras, L. Sancho, A. de la Sota y M. Lueje (1994). Evaluación del funcionamiento de procesos avanzados de nitrificación-desnitrificación en una planta piloto de tratamiento de las aguas residuales de Bilbao. Medio Ambiente Retema, 1994, nº 42, pp. 33-44, 1994.
- L. Novak, L. Larrea and J. Wanner (1994). Estimation of maximum specific growth rate of heterotrophic and autotrophic biomass: A combined technique of mathematical modelling and batch cultivations. Wat. Sci. Tech., vol 30, 11, pp.171-180, 1994.

- L. Novak, L. Larrea and J. Wanner (1995). Mathematical model for soluble carbonaceous substrate biosorption. Wat. Sci. Tech., vol 31, 2, pp. 67-77, 1995.

Posteriormente a estos trabajos, el CEIT, en colaboración con empresas de ingeniería, realizó diversas investigaciones sobre procesos novedosos más compactos de eliminación de nitrógeno y fósforo, como el de alimentación escalonada y el proceso alternante. Con ello se cubría el amplio abanico de posibilidades que ofrece el diseño y operación de procesos de fangos activados para eliminación de nutrientes.

2.2.2.- Hidrodinámica de decantadores y prevención del bulking

Uno de los aspectos de mayor interés a la hora de operar de manera adecuada una EDAR con tecnología de fangos activados es el funcionamiento de la decantación secundaria, que condiciona significativamente el rendimiento general de la planta. En la década de los años 90 el CEIT realizó un importante esfuerzo investigador en el estudio de la decantación secundaria, sus características hidrodinámicas y la prevención de las situaciones de bulking.

El primer trabajo relevante en esta línea se orientó a optimizar el diseño de los decantadores secundarios rectangulares de la EDAR de Galindo-Bilbao, dentro del proyecto titulado "Estudio del funcionamiento de un sedimentador secundario rectangular mediante un modelo hidráulico" (1994), en el que se analizó mediante estudios de modelado y simulación el efecto de las dimensiones y las condiciones de operación en el flujo de velocidades del decantador, aportando reglas para su diseño. Posteriormente, el diseño y operación de los decantadores secundarios se abordó durante los años 1996 a 1998 en el proyecto "Planta experimental para optimización del diseño y operación de decantadores secundarios" que fue desarrollado para CADAGUA S.A. dentro del programa CENTA.

Finalmente, cabe destacar un proyecto de I+D específicamente orientado al estudio de la incorporación de selectores al proceso biológico, con el objetivo de minimizar el riesgo de la aparición de bulking, que fue realizado por el CEIT durante los años 1996 a 1998 para la empresa Cadagua S.A. con el título "***Optimización del diseño y operación de selectores anóxicos y óxicos en procesos de fangos activos***", dentro del mismo programa CENTA.

Los principales resultados científicos de esta línea de I+D del CEIT se han recogido en las siguientes publicaciones científicas:

- L. Novak, L. Larrea, J. Wanner and J.L. García-Heras (1994). Non-filamentous activated sludge bulking caused by zoogloea. *Wat. Sci. Tech.*, vol, 29, nº 7, pp.301-304, 1994.
- Urrutikoetxea and J.L. García-Heras (1994). A thickening model for activated sludge secondary settlers. *Environmental Technology*, 15, pp.1051-1060, 1994.
- P. Krebs, A.I. Stamou, J.L. García-Heras and W. Rodi (1996). Influence of inlet and outlet configuration on the flow in secondary clarifiers. *Wat. Sci. Tech.* vol 34, 5-6, pp.1-9, 1996.
- L. Sancho, J. Lopetegui, J. Paredes, E. Alonso, F. Plaza y M. Díaz. (1998). Selectores anóxicos con regeneración en procesos de depuración de aguas residuales por fangos activados. *Tecnología del Agua*, nº 181, pp.16-24, 1998.
- J. Paredes, E. Alonso, L. Sancho y J. Lopetegui (1998). Estudio de la influencia de los selectores óxicos en la prevención del bulking en procesos de fangos activados. *Medio Ambiente Retema*, nº 64, pp.9-15, 1998.

2.2.3.- Proceso secuencial SBR

Las EDAR con procesos de operación secuencial (básicamente las tecnologías Biotenitro – Bioteniflo y las tecnologías SBR) ofrecen ciertas ventajas para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones de tamaño pequeño y mediano.

En particular, para el caso del SBR, su operación secuencial ofrece una gran flexibilidad de explotación, permitiendo adaptarse a diferentes tipos de agua y requerimientos de calidad en el efluente. Sin embargo, para ser operadas de manera eficiente, estas plantas requieren la implantación de estrategias de control que gobiernen de manera óptima las secuencias de llenado, agitación (con y sin aireación externa), clarificación y vaciado. La utilización de diferentes patrones de fases permite lograr una alta eficiencia en la eliminación biológica de DQO y nutrientes, como queda demostrado en un proyecto de I+D desarrollado por el CEIT para la empresa Cadagua S.A. entre los años 1998 y 2001 titulado "***Desarrollo del diseño y operación de procesos alternados de fangos activos para eliminación de nitrógeno y fósforo***". En este proyecto se realizó un extenso estudio, basado en simulaciones de modelos matemáticos y experimentación en planta piloto, que permitió a la empresa Cadagua S.A. incorporar los procesos SBR avanzados con eliminación de nutrientes a su oferta tecnológica.

Con el objetivo de desarrollar nuevas estrategias automáticas de control para el proceso SBR, el CEIT, las empresas MSI S. Coop y Cadagua S.A. y la Diputación Foral de Gipuzkoa llevaron a cabo en 2004 y 2005 un proyecto de I+D INTEK financiado por la SPRI y titulado "***Estrategias de Control Automático Avanzado para EDAR con operación secuencial***". Los satisfactorios resultados de este proyecto aparecen descritos con mayor detalle en el apartado correspondiente a control de las EDAR

Finalmente, la aplicación específica de la tecnología SBR para el caso de pequeñas poblaciones se ha estudiado en detalle recientemente en el proyecto de I+D "***Eliminación de materias orgánicas de aguas residuales de Alava mediante proceso secuencial de fangos activados***" realizado por el CEIT para la Agencia Alavesa del Agua durante los años 2003 a 2005. El trabajo ha combinado modelado matemático y experimentación piloto en Armiñón (Alava) de cara de evaluar y explorar el potencial de la tecnología SBR en diferentes condiciones de operación y objetivos de tratamiento. Los resultados del trabajo pueden tener un gran interés de cara a problemáticas similares en el Territorio Histórico de Gipuzkoa.

2.2.4.- Procesos de tratamiento basados en película biológica

En los últimos años, una línea importante de I+D del CEIT se ha orientado al estudio de las tecnologías de tratamiento de aguas basadas en los procesos de película biológica. Estos procesos tienen la facultad de trabajar con concentraciones de biomasa superiores a los fangos activados con lo que el espacio necesario es sensiblemente menor facilitando plantas más compactas por lo que se consideraban de gran interés para escenarios como Gipuzkoa. Así, de 1999 a 2002 el CEIT desarrollo un proyecto INTEK titulado "***Desarrollo de biofiltros para la eliminación de carbono y nitrógeno en aguas residuales industriales y urbanas***" con la participación de las empresas Cadagua S.A., ATM S.A., Papelera Echezarreta S.A., Aguas del Añarbe y Diputación Foral de Gipuzkoa. El proyecto se centró en el estudio del proceso de biofiltro granular sumergido que se caracteriza por no requerir decantación secundaria. Se abordó en primer lugar la eliminación de DQO de cara a una posible futura ampliación de la EDAR de San Sebastián y posteriormente la eliminación de nitrógeno mediante dos biofiltros en serie de predesnitrificación - nitrificación de modo que se delimitó las especificaciones técnicas de su diseño, operación y control. Esta última tecnología ha sido recientemente instalada en la EDAR de Gorniz.

A continuación se desarrollaron investigaciones en el proceso biopelícula de lecho móvil que se basa en la adición a los reactores de un soporte que permite de un modo muy sencillo y eficiente reducir el tiempo de residencia. Es una tecnología muy prometedora para nuevas plantas (pequeñas especialmente) y para la ampliación de la capacidad de tratamiento de plantas existentes.

Tras un primer estudio para NILSA en el que estudiaron en planta piloto las condiciones de aplicación del lecho móvil a la EDAR de Tafalla-Olite, entre los años 2001 y 2004, el CEIT, ATM S.A., Goimendi S.A, el Consorcio de Aguas de Gipuzkoa y la Diputación Foral de Gipuzkoa llevaron a cabo el proyecto INTEK financiado por la SPRI titulado "***Optimización del diseño y operación de sistemas de biomasa adherida a soporte en lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en núcleos autónomos de población y en aguas industriales***", con el objetivo de evaluar el funcionamiento y la capacidad de los reactores biológicos de lecho móvil en serie para eliminar materia orgánica y nitrógeno. A lo largo del proyecto se estudio el efecto de las características del agua residual (fracciones de DQO) en el rendimiento del proceso y se caracterizó su capacidad de nitrificación. Asimismo, como resultado del proyecto, se propuso una novedosa configuración física de planta, basada en la utilización de un decantador intermedio entre los reactores de nitrificación y desnitrificación que permite alcanzar rendimientos de eliminación muy superiores a las tecnologías convencionales.

Las principales publicaciones derivadas de los trabajos de I+D del CEIT en tecnologías de película biológica se indican a continuación:

- L. Larrea, A. Abad and J. Gayarre (2004). Improving nitrogen removal in predenitrification-nitrification biofilters. *Water Science and Technology*, 48, 11, pp.419-428, 2004.
- A. Larrea, G. Zalakain, L. Larrea, A. Abad (2004). Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales. *Tecnología del agua*, N. 255, pp. 30-37, Dic 2004.

- A. Larrea, A. Abad y L. Larrea (2005). Biofiltración: descripción y aplicación en aguas residuales urbanas e industriales. Tecnología del agua, Num. 261, pp. 68-76, 2005.
- L. Larrea, J. Albizuri, I Irizar and J.M. Hernández (2006). Design and operation of SBR processes for small plants based on simulations. Accepted in the 7th IWA Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems. Mérida, Mexico, 7-10 March 2006.
- L. Larrea, J. Albizuri, A. Abad, A. Larrea and G. Zalakain (2006). Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process. Accepted in the 6th IWA Specialised Conference on Biofilm Systems. Amsterdam RAI, The Netherlands, 24-27 September 2006.

Actualmente el CEIT, en línea con las tendencias Europeas, esta llevando a cabo proyectos de I+D de cara a la futura remodelación y ampliación de las plantas existentes. Así, se está investigando el potencial de procesos híbridos para la ampliación a eliminación biológica de fósforo mediante experimentación en planta piloto en Legorreta. ***“Desarrollo de nuevos procesos híbridos para la eliminación de fósforo de aguas residuales urbanas”*** en la que participan las empresas Pridesa, ATM, Consorcio de aguas de Gipuzkoa, Diputación Foral de Gipuzkoa y Consorcio de aguas Bilbao Bizkaia. El proyecto tiene como objetivo delimitar las especificaciones técnicas de diseño y operación para la ampliación a eliminación de nitrógeno y fósforo de procesos de fangos activos existentes mediante su transformación en procesos híbridos por adición de relleno de polietileno. Los primeros resultados están mostrando un rendimiento satisfactorio de eliminación de nitrógeno y fósforo operando con bajos tiempos de retención hidráulico (7 horas) y de sólidos (10 días) y alimentando con agua bruta. Así mismo se está trabajando en la elaboración de un modelo matemático para la predicción del proceso híbrido.

Por último, cabe destacar las incipientes investigaciones que se están llevando a cabo por el CEIT desde el año 2003 en el tratamiento de olores emitidos por EDAR a través de la experimentación en planta piloto eliminando ácido sulfhídrico, dentro del

proyecto "***Tratamientos biológicos y físico-químicos avanzados para la eliminación de olores procedentes de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas***" financiado por la SPRI. La tecnología de película biológica en relleno utilizada en la planta piloto se está mostrando muy eficiente para la eliminación biológica de los olores.

2.2.5.- Procesos biológicos de membranas

Dentro de las nuevas de tratamiento de aguas residuales, una de las que más expectativas ha generado en los últimos años es la basada en los reactores biológicos de membranas, por su indudable potencial para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales.

Entre los años 2003 a 2005, el CEIT, Porous Fiber e INITEK han llevado a cabo el proyecto de I+D INTEK "***Desarrollo y optimización de un módulo de membrana sumergida para sBMR***" cuyo objetivo es el desarrollo de un módulo de filtración de fibra hueca sumergido en sistemas de fangos activados para eliminación de materia orgánica así como el conocimiento de las reglas de diseño y operación del mismo ante diferentes condiciones del proceso biológico. Con el fin de obtener un conocimiento de las características operacionales del módulo de filtración, ha sido necesario en primer lugar conocer los principales factores que afectan al funcionamiento del mismo, así como la influencia de diferentes configuraciones del proceso de fangos activados en el comportamiento del módulo. Para ello se ha realizado una experimentación a escala de laboratorio en una planta de fangos activados en configuración BMR con membranas sumergidas. Dicha planta se ha estudiado en el caso de eliminación de materia orgánica y nitrificación y en el caso de eliminación de nitrógeno en aguas residuales urbanas. Se han estudiado diferentes configuraciones del proceso de fangos activados (convencional y alta carga) con el fin de estudiar las posibilidades de aplicación en cada caso. Se ha observado a escala de laboratorio el efecto de diferentes parámetros sobre el ensuciamiento de la membrana (caudal de aire, frecuencia y tipo de retrolavado, concentración de sólidos en el

reactor, etc). Los resultados obtenidos han servido como base para el diseño y construcción de un módulo a escala industrial. Así mismo, se ha realizado un modelo matemático empírico del comportamiento dinámico de la membrana y sus características de ensuciamiento ante diferentes condiciones de trabajo.

Desde el año 2005, el CEIT está desarrollando un proyecto de I+D para la empresa SPA denominado "*Optimización del proceso de bioreactor de membrana para la eliminación de nitrógeno y fósforo de aguas residuales*" orientado a estudiar las posibilidades de esta avanzada tecnología en el tratamiento de nutrientes.

2.2.6.- Tratamiento de lodos de EDAR

La normativa internacional referente a los lodos de depuradora está relacionada con las Directivas del Agua ya que el lodo es inseparable del tratamiento de las aguas residuales urbanas e industriales por ser su subproducto principal. Los sistemas de tratamiento de lodos están a su vez ligados al destino que se desee dar a los lodos tratados. Exceptuando los casos de incineración de lodos, las características que se exigen al producto final del tratamiento de lodos requieren la ausencia de materia orgánica fermentable. Así pues, la estabilización biológica (digestión) parece un elemento indispensable en la línea de lodos de una EDAR.

Al intentar aplicar sistemas biológicos de tratamiento de lodos, resulta necesario conocer muy bien las bases por las que se rigen dichos procesos. Existen numerosos estudios del proceso mesófilo de digestión anaerobia pero hay muchos menos referentes a los procesos termófilos tanto anaerobios como aerobios. Con el grado de conocimientos actual se realizan los diseños de configuraciones de digestión y su dimensionado con cierto grado de fiabilidad, y se establecen pautas de operación. Ya existen algunos modelos de biodegradación anaerobia y, en menor grado, de digestión aerobia que pueden llegar a ser una eficaz ayuda en diseño y operación de reactores.

Aunque en esa línea ya se trabaja desde hace tiempo en la comunidad investigadora internacional, aún queda bastante tarea por delante en el conocimiento de estos procesos en rango de temperaturas termófilo y en la adecuación de los modelos a casos reales. Un paso más en esa dirección conducirá a una mayor fiabilidad en el diseño de configuraciones avanzadas en este campo, en más seguras estrategias de operación de esos sistemas menos conocidos, una optimización de toda la línea de fangos y un posterior control automático.

Teniendo en cuenta esta situación, en el periodo 1996-97 el CEIT desarrolló el proyecto ***“Estudio de métodos de mejora de las características clave de los lodos antes de su vestido último”*** con el fin de comenzar a situar bases de conocimientos científico y tecnológico de los procesos de estabilización biológica de lodos orgánicos teniendo en cuenta siempre las características exigidas al lodo tratado en función de su destino final. Se revisaron los métodos de tratamiento de lodos de EDAR urbanas, su viabilidad y las características que tenía el producto final de dichos tratamientos, en especial respecto a las normativas de aplicación del lodo a suelos y a los requisitos exigidos por los destinatarios de otros usos.

Simultáneamente al anterior proyecto, durante 1996 se realizó la primera aplicación concreta de los conocimientos que empezaban a asentarse. Aguas del Añarbe contrató al CEIT el ***“Estudio de alternativas de tratamientos de fangos en la EDAR de Loiola y del mercado de utilización del fango tratado”***. En dicho trabajo colaboraron también Diputación Foral de Gipuzkoa y Confederación Hidrográfica del Norte y la empresa Degremont. Se obtuvieron los datos necesarios, tanto de gabinete como experimentales, para predecir la producción de fangos de la EDAR de Loiola, según las dos variantes previstas para la línea de agua. Se estudiaron los posibles destinos que se puede dar al fango producido, en el caso particular de la citada planta, mediante bibliografía y hablando con las entidades y empresas de la zona implicadas o interesadas en este problema. A continuación se evaluó la situación del fango de esta EDAR dentro del marco legal vigente, comparando los límites establecidos con los resultados experimentales que se obtuvieron a partir del agua residual real actual. Por último se exploraron las alternativas de tratamiento del fango de la futura planta, acordes con el tipo de fango, con la producción de lodo prevista y

con el destino final del lodo tratado. Se hizo un pre-dimensionado de los procesos seleccionados y un cálculo de costes de inversión y mantenimiento de la línea de fango futura. Con estos datos Aguas del Añarbe redactó el pliego de bases y la empresa constructora efectuó el proyecto y construcción de la línea de lodos de la EDAR de Loiola: Digestión Anaerobia seguida de secado térmico enviando el lodo final a la fábrica de cemento de ITALCEMENTI en Añorga.

En el periodo 1997-99 el CEIT comenzó a iniciarse en el campo de la modelización de los procesos de digestión de lodos mediante el proyecto ***“Optimización de procesos biológicos de estabilización de lodos de EDAR para producir biosólidos”***, proyecto de Cooperación INTEK financiado por SPRI en cooperación con Degremont, ATM, Gipuzkoako Urak, Diputación de Gipuzkoa y Cementos Rezola. La optimización se enfocó en cuanto al diseño-dimensionado y operación, y se consideró el resto del proceso de la EDAR: deshidratabilidad del lodo y corrientes de retorno a la línea de agua. Se trabajó en planta piloto con lodo real. Los usos contemplados al principio, de cara a la tecnología de digestión, fueron agricultura-mejora de suelos y fabricación de cemento. Al evaluar los tipos de tecnología de digestión, se tuvieron en cuenta las características del fango final como producto útil (“biosólido”): contenido de metales pesados, gérmenes patógenos, grado de estabilidad y sequedad. Se elaboró un primer modelo del proceso anaerobio mesófilo (seleccionado durante los trabajos) y se verificó en primera instancia con los datos de la planta. Durante el proyecto se continuó, a la vez, explorando posibilidades de destino del lodo tratado

Durante 1997-98 simultáneamente se realizó el proyecto ***“Experimental work on two-phase anaerobic digestion of sewage sludge”*** contratado al CEIT por CERDEG (centro de I+D de Degremont situado en París). El trabajo estuvo orientado a estudiar en planta piloto un proceso avanzado de digestión anaerobia aplicado a los lodos generados en la etapa A de la EDAR de Badiolegi (Azpeitia). Era un proceso Anaerobio en Dos Fases Termo-Meso. Los resultados concluyeron que dicha configuración duplicaba la carga orgánica aplicable, daba gran estabilidad al proceso de digestión y mantenía el ratio de producción de metano. Es un proceso planteable para la puesta al día de Digestores Anaerobios Mesófilos sobrecargados.

Durante 1998-2001 la empresa de seguros Zurich encargó al CEIT el proyecto "**Introducción de un sistema sostenible de tratamiento de lodos y de una aplicación a suelos**". El trabajo estaba enfocado ya a la aplicación de lodo urbano para mejora de suelos pobres. Se estudió una tecnología novedosa –sobre todo en nuestro país- Aerobia Termófila Autosostenida (ATAD). El trabajo tuvo una parte tecnológica que más tarde sirvió para darle aplicabilidad a escala real en el territorio de Navarra, y otra parte de estudio exhaustivo de las propiedades agronómicas y edafológicas del lodo así tratado, mediante la colaboración de Departamentos de Ciencias de la UN.

Desde 2002 hasta el momento presente el CEIT ha desarrollado en estrecha colaboración técnica con la empresa NILSA y financiado por ella el proyecto "**Tratamiento centralizado de los lodos de EDAR de Navarra. Estudio de diferentes escenarios relativos a los procesos biológicos de digestión de lodos de EDAR mediante simulación por ordenador de modelos dinámicos**". El proyecto ha permitido desarrollar toda una metodología, a partir de un serio trabajo de I+D enlazado con el aspecto práctico y real aportado por NILSA, para la evaluación experimental de la viabilidad de un tratamiento semi-centralizado de lodos urbanos en áreas de población dispersa. Se ha hecho énfasis en la optimización energética y económica, una vez se vio la viabilidad tecnológica de una combinación innovadora de procesos anaerobios y aerobios de digestión termófila. Los resultados, que enlazan con un proyecto antes citado, han permitido a la empresa afianzar su ingeniería de diseño de este tipo de reactores. El CEIT ha dado, durante estos años, un fuerte paso adelante en la modelización de la Digestión Anaerobia y Aerobia de tanques CSTR, como queda patente en los resultados presentados en las siguientes publicaciones científicas:

- E. Huete, J. Garcia, N. Echeverria, A. M. Lasheras, J. Gomez and J.L. Garcia-Heras (2006). *Upgrading a conventional sludge line in WWTPs in compliance with the current and developing regulations concerning the land application of sludge*. Proceedings of the IWA Specialized Conference -Sustainable Sludge Management: state of the art, challenges and perspectives. Moscow, 29-31 May, 2006.

- J. Gomez, J. Garcia and J.L. Garcia-Heras (2006). *A mathematical tool to design an Autothermal Thermophilic Aerobic Digester as first reactor in a Dual system*. Proceedings of the IWA Specialized Conference -Sustainable Sludge Management: state of the art, challenges and perspectives. Moscow, 29-31 May, 2006.
- Huete E., de Gracia M., Ayesa E. and García-Heras J.L. (2006). *ADM1-based methodology for the characterization of the influent sludge in anaerobic reactors*" Water Science and Technology (In press).

Durante los años 2002 y 2003, la fundación INASMET llevó a cabo el proyecto "**Desarrollo de un gasificador para el tratamiento de lodos secos de EDAR**", junto al Instituto de Carboquímica de Zaragoza. Los objetivos del proyecto fueron el desarrollo a nivel piloto de un gasificador de lecho fluidificado burbujeante capaz de tratar unos 20-30 kg/h de lodo de depuradora (EDAR) previamente deshidratado y secado térmicamente, el estudio de las posibles alternativas de aprovechamiento del gas generado (syngas) y de los residuos. Como resultado del proyecto, se construyó un reactor fácilmente desplazable, según las características previamente establecidas por los estudios previos. El reactor funcionó correctamente alcanzando un nivel de conversión de materia orgánica en syngas cercano al máximo termodinámico. Al mismo tiempo se estudiaron las alternativas más ventajosas para la utilización del syngas; producción eléctrica en grandes instalaciones; secado de los lodos en pequeñas instalaciones, etc. Respecto de los residuos, se concluyeron diversas alternativas de solución para los sólidos (cenizas), aguas de lavado y gases de postcombustión.

Como continuación de esta línea, durante los años 2003 y 2004, la fundación INASMET, junto a las empresas ELECNOR, ECOMAT e INSECSA han estudiado, a nivel de planta piloto en la EDAR de Badiolegi, tecnologías de secado térmico, gasificación en lecho fluidizado y combustión de gases (con aprovechamiento de calor) analizando posibles soluciones de tratamiento de los alquitranes generados, así como la naturaleza de los residuos sólidos generados, todo ello dentro del proyecto "**Secado, gasificación y aprovechamiento energético de lodos secos de EDAR**". Los resultados de la planta piloto mostraron la viabilidad técnica de la tecnología y sus posibilidades futuras de comercialización ante una legislación más restrictiva.

Finalmente, en relación con las tecnologías de reducción de los fangos generados en las EDAR, durante 2002-06 el INTEK ha financiado al consorcio CEIT / Air Liquide / INITEK / Helados MIKO / con la colaboración de Gipuzkoako Urak y Diputación Foral de Gipuzkoa, el proyecto "***Desarrollo de tecnología de ozonización para reducir la generación de fango***". El trabajo ha consistido en evaluar una tecnología no biológica para minimizar la cantidad de lodo generada en EDARs y el proceso de ozonización se ha validado satisfactoriamente en planta piloto. Los resultados de esta línea de trabajo se han presentado recientemente en una Conferencia Internacional especializada:

- G. Manterola, I. Uriarte and L. Sancho (2006). *Evaluation of operational parameters of sludge ozonation in industrial-scale plant. Effect on organic and nitrogenous compounds*. Proceedings of the IWA Specialized Conference - Sustainable Sludge Management: state of the art, challenges and perspectives. Moscow, 29-31 May, 2006.

2.3.- TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

La entrada en vigor de las IPPC en diferentes sectores industriales, ha llevado en los últimos años a un impulso en el estudio de tecnologías de tratamiento y de estrategias de control en la industria con el fin de aplicar conceptos de cierre de circuitos y reutilización del agua. Para ello se han realizado proyectos de I+D tanto a nivel de tecnologías de tratamiento como a nivel de la gestión óptima de los circuitos de agua con el fin de conocer el efecto real de posibles fuentes alternativas de agua sobre la calidad del producto final. Dichos estudios, en muchos casos satisfactorios a escala piloto o de laboratorio, han presentado escaso reflejo en su aplicación real, especialmente en el caso de pequeñas y medianas empresas.

2.3.1.- Tecnologías de tratamiento de aguas residuales del sector papelerero

La aplicación de diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales así como de explotaciones ganaderas con el fin de conseguir calidades aceptables con el fin de reducir el impacto de su vertido sobre el medio receptor o plantear posibilidades de reutilización en la industria ha sido abordada en diferentes proyectos de I+D. Así, en el año 2003 el CEIT llevó a cabo un proyecto de I+D titulado "***Tratabilidad físico-química y biológica de aguas de papeleras de la comarca de San Sebastián***" realizado para la Confederación Hidrográfica del Norte y Aguas del Añarbe, con el fin de determinar el potencial de eliminación de sólidos suspendidos, DQO y turbidez de los vertidos de las cuatro papeleras (Zicuñaga, Papresa, Gure-Ola y Fore-Sur) situadas en la comarca de San Sebastián. El trabajo realizó un análisis comparativo en planta piloto de la tecnología de decantación convencional frente a un tratamiento físico-químico de coagulación-floculación-sedimentación, tratando de minimizar la dosis de coagulante y de determinar los parámetros óptimos de operación del proceso de alta carga para una mezcla de agua doméstica y de las papeleras Zicuñaga y Papresa. Este trabajo ha permitido también evaluar las características de biodegradabilidad de los vertidos de las cuatro papeleras a partir de ensayos en reactores discontinuos. En este estudio se han conseguido eliminaciones de sólidos suspendidos entre el 60 y 90% por decantación. Además, el tratamiento físico-químico empleando como coagulante policloruros de aluminio (Al_2O_3) y como floculante polímero aniónico AP-91 ha resultado muy satisfactorio obteniendo concentraciones bajas de sólidos suspendidos y de turbidez en el sobrenadante. La determinación de la biodegradabilidad del vertido de las cuatro papeleras llega hasta el 70% que se considera un valor elevado. Por último, el estudio del proceso de alta carga operado con un tiempo de retención hidráulico de 1.5 horas y un tiempo de retención celular real de 1.8 días, obtuvo resultados satisfactorios. La DQO filtrada influente de 170 mg/l era eliminada en un 60%. La concentración de SST en el efluente era de 20 mg/l y el rendimiento de eliminación de DQO total fue elevado situándose en torno al 70%.

La aplicación de tecnologías avanzadas de tratamiento en la industria papelera se estudió en detalle por el CEIT durante los años 2000 a 2003 con la participación de Cadagua S.A., ATM, S.A., Neurtek, M.A., S.A., Papelera Etxezarreta, S.A., Aguas del

Añarbe, S.A. y Diputación Foral de Gipuzkoa, dentro del proyecto de I+D "**Desarrollo de biofiltros para la eliminación de carbono y nitrógeno en aguas residuales industriales y urbanas**". En el proyecto se analizaron a escala de laboratorio y a escala piloto tecnologías avanzadas de tratamiento biológico, mediante biofiltros, para la reducción de la carga orgánica y de nitrógeno en aguas de papeleras. El diseño de los equipos de la planta piloto de gran escala y las conclusiones de los resultados experimentales permitieron el posterior diseño y construcción de la planta real de Papeleras Echezarreta con la novedosa tecnología.

Del mismo modo, ya fuera del ámbito de Gipuzkoa, durante los años 1998-2001 se han estudiado tecnologías avanzadas de tratamiento a través de bioreactores de membrana, con tecnologías aerobias y anaerobias, para la recirculación de agua en proceso en papeleras, obteniéndose calidades de agua reutilizables como aguas blancas y para preparación de reactivos. Este trabajo de I+D, en el que participaron además del CEIT, Cadagua, Papeleras Saica, PTS, Paques y Oudegem Papier BV, fue parte de un proyecto de I+D Europeo BRITE-EURAM de título "**Advanced water treatment technologies for kidney operation of zero effluent water systems for paper and board production**". Los resultados de este proyecto se presentaron públicamente en Conferencias Internacionales y fueron también recogidos en las siguientes publicaciones:

- J Lopetegui y L. Sancho (2000). *Tratamiento biológico de efluente UASB de papeleras a altas temperaturas*. Tecnología del Agua, nº 205, pp.70-78. Octubre 2000.
- J. Lopetegui and L. Sancho (2003). *Aerated Thermophilic Biological Treatment with Membrane Ultrafiltration – Alternative to Conventional Technologies treating Paper Mill Effluents*. Water Science and Technology: Water Supply 5-6, vol.3. 2003.

2.3.2.- Tecnologías de tratamiento de aguas residuales del sector agroalimentario

Además del sector papelerero, el CEIT ha realizado actividades de I+D en otro sector estratégico en Gipuzkoa como es el alimentario. Durante los años 1999 a 2001 se llevó a cabo el proyecto Oferta/Demanda financiado por la SPRI "***Tratabilidad de residuos industriales orgánicos mediante sistemas biológicos; viabilidad técnica. Aplicación a residuos líquidos de mataderos***" en el que, además del CEIT, participaron ATM S.A. y Mafrido. En este proyecto se evaluó el Reactor Híbrido para aguas residuales con alto contenido en proteínas y grasas, como son las de mataderos, obteniéndose una comparativa ventajosamente con un UASB. Las razones serían la presencia de proteínas en el agua imposibilita la creación y mantenimiento de gránulos en el UASB y en el Reactor Híbrido, por lo que el lecho de fango está formado por partículas floculentas. Con ese tipo de lodo en el fondo, el UASB no puede alcanzar las altas velocidades ascensionales que le dan ventaja (ya que permiten a los sistemas UASB procesar caudales influentes mayores y por tanto trabajar a menores HRT) ya que con este tipo de aguas residuales escaparían sólidos por el efluente. Los valores de velocidad ascensional máximos admisibles de un UASB con este agua son similares a los del Reactor Híbrido, y quizá éste admita algo mayores valores pues el filtro anaerobio superior captura los sólidos que se escaparían del UASB inferior.

Posteriormente, durante los años 2002 a 2004 el CEIT, ATM S.A., Hijos de José Serrats y Mafrido llevaron a cabo un proyecto de cooperación INTEK titulado "***Reactor híbrido anaerobio para tratar aguas residuales. Desarrollo de tecnología propia***" en el que se estudió un reactor híbrido anaerobio para tratar aguas residuales procedentes de la industria conservera de pescado. A lo largo del proyecto se realizó un diseño y dimensionado de un reactor híbrido anaerobio a escala real y se evaluó su viabilidad técnica, basándose en ensayos en una planta piloto a escala industrial tratando agua residual de conservas de pescado o tipos similares (alto contenido en grasas y proteínas). Con el diseño y dimensionado realizados, se obtuvieron las pautas de operación óptimas del sistema.

Parte de los resultados de este proyecto se presentaron en el VIII Taller y Simposio Latinoamericano sobre Digestión Anaerobia - DAAL IWA 2005 celebrado en Punta del Este, Uruguay en Octubre de 2005 y han sido recientemente aceptados para su publicación en la siguiente revista científica internacional:

- S. Soroa, J. Gómez, E. Ayesa and J.L. García-Heras (2006). Mathematical modelling of the anaerobic hybrid reactor. Accepted in *Water Science and Technology*, 54, 2.

Desde el año 2002, INASMET ha venido desarrollando un producto con características de oxidante, coagulante, floculante y bactericida para su utilización en aguas industriales de diversos sectores (textil, siderúrgico, alimentación, etc.). En el proyecto titulado "**Aplicaciones en el tratamiento de vertidos industriales del reactivo ferrato**", la fundación INASMET-TECNALIA, en colaboración con la empresa LAMIK y otros institutos y empresas europeas está estudiando su aplicación a aguas urbanas, industriales y naturales. El producto analizado ha demostrado un alto poder de oxidación-coagulación-floculación, en muchos casos superior a otros productos tradicionales como el cloruro férrico, así como una mejora de la combinación de ambos productos respecto a su utilización separada. El producto no se ha comercializado de momento a la espera de rebajar sus costes de producción.

En el sector conservero cabe destacar también la publicación en 1999 por parte de IHOBE y AZTI del "**Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones: Conserveras de Pescado**", una guía práctica que resalta las principales problemáticas ambientales del sector conservero de pescado.

Actualmente el CEIT esta llevando a cabo el proyecto "**Tratamientos biológicos avanzados y membranas para la eliminación de DQO y nitrógeno de aguas residuales con alta DQO y nitrógeno**" que está enfocado al tratamiento de purines de cerdo. El proyecto está investigando el potencial de la eliminación de nitrógeno mediante procesos de lecho móvil e híbrido para después adentrarse en el proceso bioreactor de membrana y en el empleo de membranas de nanofiltración que posibilitaría su reciclaje y/o reutilización.

2.3.3.- Tecnologías electroquímicas para la purificación de efluentes industriales de tratamientos superficiales

El desarrollo y aplicación de tecnologías electroquímicas para el tratamiento y purificación de diferentes efluentes industriales es una de las líneas de I+D del Centro Tecnológico CIDETEC, que en los últimos años ha venido realizando un gran número de estudios, diagnósticos y proyectos de I+D sobre el tratamiento de las aguas residuales industriales provenientes de diferentes tratamientos superficiales.

Ya en el año 1999, CIDETEC desarrolló el programa titulado "***Diagnóstico tecnológico y sensibilización para la aplicación de tecnologías electroquímicas en el tratamiento y purificación de efluentes industriales en la CAPV***", con el objetivo de poner al día y sensibilizar a nivel económico y medioambiental a las empresas de la CAPV en el empleo de nuevas tecnologías electroquímicas, para el tratamiento y purificación de efluentes industriales. En este trabajo se llevó a cabo un diagnóstico general y una caracterización de las posibilidades de aplicación de determinadas tecnologías electroquímicas al tratamiento de efluentes industriales. Además, se seleccionaron una serie de empresas del sector de tratamientos superficiales, en las que se estudió a fondo su proceso productivo, realizando un estudio de minimización de los residuos. Se estudió y se implantó a su vez, un sistema electroquímico de depuración y tratamiento de efluentes, como es la electrocoagulación y, finalmente se procedió a la difusión del diagnóstico general y además, debido a los excelentes resultados, se profundizó de manera experimental en el sector galvánico.

Algunos ejemplos de la actividad de CIDETEC en la depuración de efluentes de tratamientos superficiales se reseñan brevemente a continuación. El año 1999 CIDETEC y LAMIK llevaron a cabo el proyecto titulado "***Aplicación de los polímeros conductores de la electricidad al tratamiento de efluentes que contienen Cr (VI)***" donde se desarrolló un método innovador para la reducción del Cr (VI) a Cr (III) por medio del polipirrol generado electroquímicamente. Durante los años 2001 y 2002, CIDETEC desarrolló un procedimiento de aislamiento y recuperación de los residuos de

cinc y hierro procedentes de los baños de decapado ácido y descincado en la industria del galvanizado en caliente, dentro del proyecto "***Recuperación y reciclado de metales residuales generados durante el proceso de galvanizado en caliente***". Además, la utilización del hierro recuperado para la posterior fabricación de cloruro férrico empleado como floculante en los sistemas de depuración más modernos, supone el empleo de un residuo como reactivo en tratamiento de depuración de los propios residuos generados. Durante 2003 a 2005 CIDETEC, ASER y LAMIK llevaron a cabo satisfactoriamente el proyecto titulado "***Desarrollo de un proceso de valorización de ferrosita para su utilización como coagulante en tratamiento de efluentes de la industria galvánica***". Durante los años 2004 y 2005, CIDETEC, Carburos Metálicos y el Grupo de Electroquímica Aplicada y Electrocatálisis de la Universidad de Alicante, dentro del proyecto "***Utilización del proceso de destrucción electrolítica de contaminantes orgánicos en la fabricación de depuradoras industriales avanzadas***", han desarrollado y llevado al mercado un nuevo proceso, denominado Electro-Fenton® que permite descontaminar electroquímicamente aguas residuales de hasta 100000 ppm de DQO que presentaran contaminantes orgánicos de alta toxicidad y/o baja biodegradabilidad. Actualmente CIDETEC, CEIT y LAMIK están colaborando en el proyecto titulado "***Desarrollo de electrocatalizadores sólidos porosos y su aplicación a la eliminación de los cianuros presentes en efluentes de plantas industriales de electrodeposición de metales***", con el objetivo de desarrollar un método radicalmente innovador de destrucción de cianuros, basado en el empleo de electrocatalizadores sólidos porosos y empleando la corriente eléctrica como único reactivo. Se obtendrían así lodos metálicos exentos de cianuros, posibilitando así que puedan ser llevados a un vertedero, sin problemas de ser tratados como RTP (residuo tóxico peligroso).

En el campo de los estudios de corrosión, CIDETEC y la Mancomunidad de Aguas del Añarbe llevaron a cabo el año 2001 el trabajo titulado "***Estudio de la capacidad corrosiva de las aguas de abastecimiento tratadas en la depuradora del Añarbe***" analizando el comportamiento de tuberías de diferentes materiales como acero dulce, acero galvanizado y cobre.

2.3.4.- Tratamiento de los lixiviados de vertedero

Durante los años 1997 a 1999 se llevó a el proyecto de cooperación INTEK "***Tratamiento de lixiviados de vertederos a través de biorreactores de membrana y procesos avanzados de oxidación***" con participación de CEIT, Praxair S.L., INTAGSA y la Mancomunidad de Sasieta que consistió en un estudio a escala piloto de diferentes tecnologías para estudiar la tratabilidad de los lixiviados procedentes del vertedero de Sasieta mediante tecnologías biológicas avanzadas (bioreactores de membrana) combinadas con tratamientos oxidativos avanzados con el fin de reducir el impacto del vertido de dichos lixiviados sobre el medio receptor. Así, en estudios a escala piloto se consiguieron reducciones del 95% de la carga de nitrógeno amoniacal en los lixiviados, mediante tratamiento biológico, observándose una estabilidad elevada en el proceso. Sin embargo las reducciones en la carga orgánica resultaron ser inferiores al 50% debido a la presencia elevada de compuestos no biodegradables. Dichos compuestos fueron tratados con posterioridad mediante tratamientos oxidativos (Reacción de Fenton y ozonización combinada con radiación ultravioleta), produciéndose, en ensayos discontinuos reducciones superiores al 75% en la carga orgánica de los lixiviados.

Además de los resultados experimentales del proyecto, se ha desarrollado un modelo matemático determinístico para la reacción de Fenton, que ha sido validado satisfactoriamente frente a los diferentes resultados experimentales recogidos en el proyecto. Algunas publicaciones que recogen los resultados de este proyecto de I+D se indican a continuación.

- Marañón I. y Sancho L. (2003). *Oxidaciones avanzadas para el tratamiento de lixiviado: aplicación del Reactivo de Fenton*. Tecnología del Agua, Num. 237, pp. 30-37, Julio 2003.
- Fotinopulos, I. Marañón, L. Sancho (2003). *Tratamiento del lixiviado del vertedero de Sasieta mediante biorreactor de membrana y reactivo de Fenton*. Retema, Medio Ambiente, N°95, pp. 24-41, Julio-Agosto, 2003.

- Marañón, M. de Gracia, E. Ayesa and L. Sancho (2004). *A deterministic dynamical model for the System Fe(II)/H₂O₂. A methodology for the mass and charge balance analysis of the mathematical model*. Proceedings of the 6th International Symposium on Systems Analysis and Integration Assessment. Beijing, China, Nov. 3-5, 2004.

2.3.5.- Seguimiento y caracterización de vertidos industriales y lixiviados

La fundación INASMET-TECNALIA tiene una contrastada experiencia en el seguimiento analítico y caracterización y tratamiento de vertidos y lixiviados procedentes de diversos sectores industriales, para lo que dispone de laboratorios analíticos de gran capacidad.

Desde el año 2002, INASMET está realizando un proyecto titulado "***Control y seguimiento de las aguas de vertido y lixiviados en varias empresas y vertederos de Mancomunidades y empresas Gipuzkoanas***", con la participación de las Mancomunidades de SAN MARCOS y AIZMENDI, y las empresas VASCONTAINER, ARCELOR, Y HIERROS EGINO en el que se vienen realizando diversos análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos en los vertidos de lixiviados y aguas de producción industrial en las empresas participantes en el proyecto. En particular se vienen analizando de manera sistemática pH, conductividad, redox, sólidos, DQO, DBR, Nitrógeno, aniones, cationes, microcontaminantes orgánicos metales y toxicidad.

Otro ejemplo de seguimiento fue realizado por parte de la fundación INASMET-TECNALIA en el año 2005-2006 como parte del proyecto "***Control de Efluentes Líquidos de las centrales Térmicas de Pasaia y Santurce***" con la participación de las centrales Térmicas de Pasaia y Santurce, en el que se realizó la medición y evaluación en las centrales térmicas mencionadas según los protocolos preestablecidos, y de acuerdo a la legislación vigente. Además del seguimiento de diversos parámetros fisicoquímicos se prestó especial importancia al control de los contaminantes EPER en aguas (TOC, BTEX, PAH's).

2.4.- NUEVAS HERRAMIENTAS PARA OPTIMIZAR LA EXPLOTACIÓN DE EDAR

Los grandes avances experimentados en los últimos años en las tecnologías de computación, control y comunicaciones ofrecen un indudable campo de aplicación para optimizar la explotación de los sistemas de saneamiento y, especialmente, para lograr una operación segura y eficiente de las nuevas EDAR.

En este sentido, una de las herramientas de mayor potencial para optimizar la explotación de las EDAR es la incorporación de nuevas estrategias automáticas de control que gobiernan de manera adecuada las variables de operación de la planta para cumplir los objetivos de calidad frente a las diferentes perturbaciones externas. Un adecuado diseño de los controladores permite mejorar la estabilidad del proceso, garantizar la calidad del efluente y reducir significativamente los gastos de explotación. Además, las nuevas tecnologías de la información permiten una utilización remota de los sistemas de supervisión y actuación.

Otras herramientas emergentes de gran interés son la utilización de los nuevos simuladores de operación de EDAR, que permiten estudiar el comportamiento dinámico de las nuevas plantas ante diferentes escenarios de explotación o posibles perturbaciones.

2.4.1.- Estrategias automáticas de control para procesos de predesnitrificación - nitrificación

Los principales trabajos de I+D llevados a cabo en la CAPV y orientados a implantar estrategias avanzadas de control en las EDAR han sido realizados fundamentalmente por el CEIT, en colaboración con empresas y entidades responsables de la gestión del agua. De hecho, el control automático de las EDAR es

uno de los campos de trabajo prioritarios de la Sección de Ingeniería Medioambiental del CEIT, que lleva investigando en esta línea desde mediados de los años 90. La mayor parte de los proyectos de I+D en control realizados por el CEIT han estado dirigidos a optimizar la operación de las EDAR avanzadas con eliminación biológica de DQO y Nitrógeno (mediante nitrificación y desnitrificación), mediante el diseño, desarrollo, implantación de nuevos controladores automáticos avanzados. Los trabajos desarrollados se han basado en modelado matemático y estudios experimentales a escala piloto y real en diferentes ubicaciones de la CAPV (Vitoria, Bilbao y San Sebastián).

La primera versión de los controladores se desarrolló entre los años 1996 y 1997 dentro de un proyecto financiado por AMVISA titulado "***Verificación en planta piloto de la configuración y leyes de control para la futura EDAR de Crispijana-Vitoria***" que tuvo como campo de aplicación y validación la nueva depuradora de Vitoria. En este proyecto se desarrolló una primera versión de las estrategias de control para el tratamiento biológico secundario, que se validó satisfactoriamente por simulación y a escala piloto con agua residual real. Los principales resultados científicos de este trabajo se recogieron posteriormente en las dos siguientes publicaciones:

- J. Suescun, X. Ostolaza, M. García-Sanz, E. Ayesa (2000). Control strategies for a DN Activated Sludge plant. Part II: Biodegradation control. *Proceedings of the 1st World Congress of the International Water Association (IWA)*.3-7 July 2000, Paris.
- J. Suescun, X. Ostolaza, M. García-Sanz, E. Ayesa (2001). Real-time control strategies for predenitrification-nitrification activated sludge plants. Biodegradation control. *Water Science and Technology*, **43**, 1, 209-216, 2001

A finales del año 1996 se comenzó la línea de trabajo de control en la EDAR de Galindo-Bilbao a escala piloto, dentro de un proyecto de Cooperación INTEK financiado parcialmente por la SPRI y titulado "***Desarrollo de estrategias de control avanzado en procesos de tratamiento de aguas residuales***" en el que, además del CEIT, participaban MSI S. Coop, Cadagua S.A. y el Consorcio de Aguas Bilbao-

Bizkaia. En este proyecto se desarrollaron nuevas estrategias de control para la EDAR de Galindo, que se validaron también por simulación en ordenador y en planta piloto. La validación total no fue posible por las limitaciones de robustez de los analizadores on-line de nutrientes, por lo que debieron llevarse a cabo dos nuevas extensiones del proyecto para completar de manera muy satisfactoria la validación experimental a escala de planta piloto y posteriormente en la propia EDAR de Galindo. La validación final de las estrategias de control en una de las seis líneas de la depuradora se llevó a cabo a lo largo del año 2003.

La estrategia de control desarrollada propone tres lazos desacoplados de control que gobiernan automáticamente la purga de sólidos, la concentración referencia de oxígeno y la recirculación interna a partir del tratamiento de los resultados de los medidores en línea de sólidos suspendidos, amonio y nitratos. Los nuevos controladores desarrollados aumentan la fiabilidad y estabilidad del proceso, reducen los costes de explotación y mejoran simultáneamente la calidad del efluente. Su comportamiento es seguro y robusto. La gran utilidad de los controladores desarrollados ha sido confirmada durante un largo periodo de validación en una de las líneas de la EDAR de Galindo y actualmente se está trabajando en la adaptación e implantación de las estrategias de control en otras EDAR de tamaño más pequeño, con el fin de analizar su interés económico y fiabilidad.

Los excelentes resultados científicos de la línea de control en la EDAR de Galindo han dado lugar a varias presentaciones en congresos, artículos en revistas científicas y tesis doctorales. Las referencias más relevantes son:

- Rivas, E. Ayesa, A. Galarza, A. Salterain (2001). Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: the new WWTP of Galindo-Bilbao. Part I: Selection of optimum design. *Water Science and Technology*, 43, 7, 157-166, 2001.
- Galarza, E. Ayesa, M.T. Linaza, A. Rivas, A. Salterain (2001). Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: the new WWTP of Galindo-Bilbao. Part II: Selection of operational strategies and automatic controllers. *Water Science and Technology*, 43, 7, 167-174, 2001.

- Galarza, E. Ayesa, A. Salterain, M. T. Linaza and J. Flórez (2001). Real Time Control strategies for activated sludge plants – Application to RDN and DRDN processes. *Proceedings of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation – ICA 2001. Malmo, Sweden, June 3-7, 2001.*
- P. Grau, J.M. Sagarna, J. Suescun and E. Ayesa (2004). Full-scale experimental validation of new automatic control strategies for the optimum operation of WWTP with nitrogen removal. *Proceedings of the 4th IWA World Water Congress and Exhibition. Marrakech, 19-24 September 2004 (www.iwa2004marrakech.com).*
- J. Suescun, J.M. Sagarna, P. Grau y E. Ayesa (2004). Implantación de estrategias avanzadas de control automático para la eliminación de nitrógeno en la EDAR de Galindo (Bilbao). *II Jornades Tècniques de Gestió d'Estacions Depuradores d'Aigües. Sistemes de sanejament i medi ambient. Reutilització planificada de l'aigua. Agència Catalana de l'Aigua. Barcelona, 18-20 Enero 2005.*
- E. Ayesa, A. de la Sota, P. Grau, J.M. Sagarna, A. Salterain and J. Suescun (2005). Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: The long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. Accepted in *Water Science and Technology*.

En el Territorio Histórico de Gipuzkoa existen varias EDAR con eliminación de C y N que podrían incorporar las estrategias de control desarrolladas para las plantas de Crispijana-Vitoria y Galindo-Bilbao. De hecho, en el proyecto realizado por el CEIT para Cadagua entre los años 1996 a 1999 titulado "***Optimización de la explotación de EDAR avanzadas basada en la utilización de simuladores de operación***" se exploró satisfactoriamente por simulación la posibilidad de adaptar las estrategias de control desarrolladas para la EDAR de Galindo al caso de la EDAR de Badiolegi-Azpeitia y parte de esos resultados quedaron recogidos en la siguiente publicación científica internacional:

- E. Ayesa, G. Garralón, A. Rivas, J. Suescun, L. Larrea, F. Plaza (2001). New simulators for the optimum management and operation of complex WWTP. *Water Science and Technology*, **44**, 2-3, 1-9, 2001.

Para una implantación adecuada de los controladores en otras EDAR de Gipuzkoa sería necesario adaptarlos a las características de otras EDAR, realizando para ello un estudio de modelado matemático, simulación y recalibración de los parámetros de los controladores, para luego proceder a su validación experimental en la EDAR. Esta línea de posibles trabajos de I+D futuros en control automático de EDAR tiene un evidente interés para optimizar la explotación de las nuevas plantas que están siendo construidas en nuestro territorio y se describe con mayor detalle posteriormente.

2.4.2.- Estrategias automáticas de control para EDAR con procesos SBR

Un tipo de proceso de gran interés para la eliminación de DQO y nutrientes en las EDAR de tamaño pequeño y mediano son los reactores de fangos activados con operación batch secuencial (Sequential Batch Reactors – SBR). Su operación secuencial ofrece una gran flexibilidad de explotación, permitiendo adaptarse a diferentes tipos de agua y requerimientos de calidad en el efluente. Sin embargo, para ser operadas de manera eficiente, estas plantas requieren la implantación de estrategias de control que gobiernen de manera óptima las secuencias de llenado, agitación (con y sin aireación externa), clarificación y vaciado. La utilización de diferentes patrones de fases permite lograr una alta eficiencia en la eliminación biológica de DQO y nutrientes, como quedo demostrado en un proyecto de I+D desarrollado por el CEIT para la empresa Cadagua S.A. entre los años 1998 y 2001 titulado "***Desarrollo del diseño y operación de procesos alternados de fangos activos para eliminación de nitrógeno y fósforo***". En este proyecto se realizó un extenso estudio, basado en simulaciones de modelos matemáticos y experimentación en planta piloto, que permitió a la empresa Cadagua S.A. incorporar los procesos SBR avanzados con eliminación de nutrientes a su oferta tecnológica.

Con el objetivo de desarrollar nuevas estrategias automáticas de control para el proceso SBR, el CEIT, las empresas MSI S. Coop y Cadagua S.A. y la Diputación Foral de Gipuzkoa llevaron a cabo en 2004 y 2005 un proyecto de I+D INTEK financiado por

la SPRI y titulado "***Estrategias de Control Automático Avanzado para EDAR con operación secuencial***". El proyecto contó con el respaldo y la participación activa de los técnicos de la DFG, en virtud del interés que los procesos SBR pueden tener para Gipuzkoa en los próximos años. Los objetivos del proyecto de I+D fueron el diseño de una arquitectura de control automático para optimizar la eliminación de Nitrógeno en el proceso SBR, logrando una solución de control flexible y capaz de adaptarse a diferentes escalas de EDAR y con diferentes grados de instrumentación online. Finalmente, la estrategia de control diseñada se debía validar en planta piloto con agua residual real de la estación de bombeo de Ibaeta (propiedad de Aguas del Añarbe).

La estructura de control se diseñó según tres niveles en función del tipo de instrumentación (bajo/medio/alto coste) y del ámbito de actuación de la acción de control (corto/medio/largo plazo). El nivel inferior incluyó dos controladores destinados a interrumpir de manera automática las fases no aireadas y aireadas cuando éstas dejaban de ser efectivas. El nivel intermedio incorporó un controlador para la regulación de la masa de sólidos en los reactores SBR. Por último, en el nivel superior se diseñó un control feedback del amonio efluente que actúa sobre el set-point de oxígeno disuelto en las fases aireadas.

Toda la arquitectura de control fue validada por simulación utilizando la plataforma de simulación WEST. Posteriormente se implantó y validó la estrategia de control en la planta piloto, logrando una operación más estable del proceso, dentro de los límites de vertido y con ahorros significativos en los costes de operación. En líneas generales, el nivel inferior logró durante el período de validación reducir la duración de las fases de reacción en torno a un 30% (un 20% para las fases aireadas). Por su parte, el nivel superior logró en períodos de lluvias prolongadas reducciones de la fracción aireada próximas al 50%.

Los algoritmos de control desarrollados han mostrado, por tanto, su potencial y se encuentran preparados para su implantación en una EDAR a escala real donde poder validar su eficacia para gobernar de manera estable, segura y económica el proceso SBR.

2.4.3.- Supervisión y control remoto de EDAR

La operación diaria de las EDAR genera grandes volúmenes de información procedentes de fuentes tan diversas como la instrumentación online, los equipos de actuación o el análisis de muestras en el laboratorio. Un uso eficiente de toda esta información contribuye a una mejora significativa en el funcionamiento de las EDAR al servir de apoyo en cuestiones relacionadas con la selección de estrategias operacionales adecuadas, la detección y el diagnóstico de fallos en la planta o la optimización de las tareas de mantenimiento.

En el ámbito de las pequeñas plantas, raramente se dispone de personal destinado in-situ a la operación y el mantenimiento diario de las mismas. Más bien, estas tareas son llevadas a cabo por personal experto vinculado a compañías explotadoras de EDAR y normalmente encargado de simultanear a distancia la operación de varias plantas distribuidas geográficamente. En este contexto, el desarrollo de soluciones que permitan un acceso remoto a la información recolectada en cada una de las EDAR resulta de gran interés. Con este propósito, durante los años 2002 y 2003, el CEIT llevó a cabo el proyecto O/D financiado por la SPRI titulado "*Evaluación de WEB-Servers embebidos y su conexión con autómatas comerciales*" en el que se sentaron las bases para el posterior desarrollo de aplicaciones telemáticas de supervisión.

Precisamente con este propósito el CEIT y las empresas guipuzconas ATM S.A. y DoNewTech S.A. realizaron en 2003 y 2004 un proyecto de I+D INTEK financiado por la SPRI y titulado "*Solución integrada para la supervisión remota de procesos en Ingeniería Ambiental*". A diferencia de soluciones específicas de supervisión ya existentes, este proyecto planteó la supervisión remota de las EDAR desde una perspectiva integrada y a la vez unificada, pretendiendo con ello dar a la solución propuesta el carácter de **servicio global de supervisión de EDAR**. Un servicio con estas características supone para empresas explotadoras de aguas un importante valor añadido a su oferta tecnológica de explotación de EDAR. Dicho servicio puede ser utilizado por personal propio de la empresa y alquilado a clientes interesados en la supervisión de sus EDAR.

El servicio de supervisión ha sido realizado según una arquitectura basada en la Web, combinando para ello diferentes tecnologías de software y hardware de telecomunicación. De esta manera, los usuarios registrados pueden hacer uso del servicio desde cualquier PC que disponga de un navegador Web estándar y de una conexión a Internet. Las interfaces Web han sido implementadas siguiendo un patrón unificado e independiente de las características particulares de cada EDAR. Dicho patrón ha sido establecido teniendo presente las interfaces típicamente utilizadas dentro las aplicaciones SCADA de supervisión y control. Por otra parte, el servicio ha sido diseñado con un alto grado de flexibilidad de tal manera que puede configurarse para adaptarse a diferentes especificaciones en lo que se refiere a tipo de PLC utilizado e infraestructura de comunicación existente en las instalaciones de las EDAR.

En la actualidad, ATM S.A. está utilizando el servicio de supervisión en ocho EDAR industriales, casi todas distribuidas por la zona norte de la geografía española. Dos de ellas (EDAR de Papelera del Ebro y EDAR de Marie Brizard) están situadas en Zizurkil mientras que el resto se encuentran localizadas en Navarra y Logroño. Ante la imposibilidad, en la mayoría de las EDAR, de emplear la red de telefonía fija para el acceso remoto por Internet a los datos de la EDAR, se optó por utilizar la tecnología GPRS de comunicación "sin hilos". La comunicación vía GPRS aplica un modelo de tarificación basado en el volumen de información no en el tiempo de conexión. Por ello, el tráfico de información con las EDAR fue optimizado lográndose así una reducción de los costes asociados a las comunicaciones remotas con cada una de ellas. Finalmente, los resultados más relevantes de este proyecto han sido divulgados científicamente gracias a la siguiente comunicación en congreso internacional:

- Irizar I., Sanz J.M., Ayala I., Pérez C., Castro A., Arrizabalaga A. and Salterain A. (2006). Integrated Web-based Supervision Service for Teleoperation of Distributed WWTPs. *Proceedings of the 7th IWA Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems. Mexico DF, México, March 7-10, 2006.*

Es importante subrayar que la arquitectura utilizada permite desarrollar diferentes aplicaciones de supervisión global de sistemas, que podrían ser utilizadas para recoger, procesar y analizar datos de muy diversa procedencia (Ej.: EDAR urbanas o industriales, estaciones de medida en ríos, observatorios, redes de colectores, etc.).

2.4.4.- Simuladores de operación de EDAR

La simulación del comportamiento dinámico de las EDAR tiene también una gran utilidad como herramienta de ayuda en la explotación de las plantas. Tradicionalmente su utilización se ha centrado en estudios puntuales para la detección y el diagnóstico de posibles problemas de operación o limitaciones del proceso (detección de las sobrecargas y los “cuellos de botella” del proceso, inconsistencias en los balances de masa, contraste de los datos experimentales, etc.). Concebidos a partir de la idea de combinar la información real recogida diariamente en las EDAR junto con la utilización de modelos matemáticos específicos de EDAR debidamente calibrados, los simuladores de operación permiten establecer diagnósticos claros sobre el estado de la planta, analizar la incidencia de posibles perturbaciones y evaluar los efectos de diferentes estrategias de operación y control.

Aunque su uso no es todavía generalizado, esta creciendo su implantación como herramienta de apoyo en el día a día de la explotación de la planta, sirviendo de eficaz apoyo en la definición y exploración de las estrategias de operación más adecuadas ante los diferentes escenarios y perturbaciones que pueden aparecer en una EDAR. Todo ello sin olvidar su utilidad en la formación de los operadores de planta. Como ejemplo, desde el año 1995, la Fundación Holandesa de Investigación Aplicada al Agua (STOWA) viene promoviendo el uso de simuladores dinámicos de manera que, a lo largo de estos últimos años, más de cien plantas a escala real hayan sido modeladas por diferentes Autoridades del Agua de este país.

En la CAPV, el desarrollo de proyectos de I+D en Simuladores de Operación para EDAR ha sido llevado a cabo por el CEIT desde mediados de los años 90. Una primera versión de Simulador de Operación de la antigua EDAR de Crispijana-Vitoria fue desarrollada por el CEIT para AMVISA dentro del proyecto titulado “***Estrategias operacionales para el proceso de fangos activos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Vitoria*** “. Los principales resultados de aquel primer simulador permitieron estudiar la operación del proceso ante diferentes situaciones y temperaturas y permitieron además analizar por simulación las diferentes posibilidades

de diseño de la nueva EDAR con eliminación de DQO y nitrógeno. Algunos de los principales resultados del trabajo se recogieron en la siguiente publicación presentada en las Jornadas Técnicas de la AEAS:

- J. del Río, J.A. Zabala, J. Gallego, J. García, A. Urrutikoetxea, L. Larrea, E. Ayesa, G. Zalakain (1995). Simulador para operación y rediseño del proceso de fangos activos en la planta depuradora de Vitoria. *II Jornadas Ibéricas. XVI Jornadas Técnicas y Asamblea General de la AEAS*. Vitoria-Gasteiz, Mayo 1995

Posteriormente, esta línea de I+D siguió desarrollándose por el CEIT para Cadagua S.A., en paralelo a otras herramientas informáticas dirigidas a optimizar el diseño de nuevas EDAR. El proyecto "**Optimización de la explotación de EDAR avanzadas basada en la utilización de simuladores de operación**", llevado a cabo entre los años 1996 y 1999 tuvo como objetivo el desarrollo e implantación de un simulador dinámico específicamente adaptado a las características de la EDAR de Badiolegi-Azpeitia y conectado a los datos experimentales reales de la planta, con el objetivo de disponer de una herramienta de ayuda para la diagnosis y optimización de su explotación.

Como resultado del proyecto se desarrolló un novedoso simulador de operación para EDAR, totalmente adaptado a la configuración y las características específicas de la EDAR de Badiolegi, pero fácilmente adaptable a otras plantas de tratamiento de aguas. Se realizó una primera calibración experimental con los datos de planta y posteriormente un conjunto de exploraciones con el modelo calibrado, de cara a estudiar las estrategias óptimas de operación y control de la planta ante diferentes escenarios de explotación. Los resultados logrados fueron muy prometedores y de una especial relevancia científica, dando lugar a una presentación oral en el *1st World Congress of the International Water Association (IWA)* celebrado en Julio de 2000 en París y al siguiente artículo en revista científica internacional:

- E. Ayesa, G. Garralón, A. Rivas, J. Suescun, L. Larrea, F. Plaza (2001). New simulators for the optimum management and operation of complex WWTP. *Water Science and Technology*, 44, 2-3, 1-9, 2001.

La línea de I+D de los simuladores de operación para EDAR ha seguido siendo desarrollada por el CEIT para otras empresas y entidades. Un reciente ejemplo de la aplicación de esta avanzada tecnología para diagnosticar y optimizar la operación de estaciones depuradoras de tamaño medio ha sido realizado para la empresa GIA en la EDAR de Calasparra (Murcia) contando con la colaboración de ESAMUR. Los principales resultados obtenidos se han presentado recientemente en la siguiente publicación técnica:

- Irizar, S. Gómez, A. Castro y E. Ayesa (2006). Integración de los simuladores de operación en la explotación de EDAR. Aplicación a un caso práctico: la EDAR de Calasparra. Tecnología del agua, Num. 272, Mayo 2006, pp. 70-80

En estos momentos se está gestando un posible proyecto de I+D entre el CEIT, la empresa ATM S.A. y Aguas del Añarbe orientado a realizar un simulador de operación para la EDAR de Loyola que incluya las líneas de agua y fangos y que permita explorar sus condiciones óptimas de explotación. Además de su indudable interés para explorar las estrategias de operación de la EDAR de Loyola, existen asimismo varias EDAR en Gipuzkoa cuya complejidad de tratamiento justificaría sobradamente la utilización de estas avanzadas herramientas para optimizar su explotación.

Finalmente, el análisis comparativo de la eficiencia en EDAR para pequeñas y medianas poblaciones está siendo también abordado (2005-2007) por la Fundación INASMET-TECNALIA, junto a otros institutos y empresas europeas en el proyecto titulado ***“Mejora de la eficiencia de las EDAR en instalaciones pequeñas y medianas”*** que tiene como objetivo detectar los campos de mejora más relevantes en la explotación de las instalaciones, analizando, por ejemplo, el funcionamiento automatizado, la mejora o sustitución de las tecnologías de tratamiento, los sistemas de secado, la gestión de los residuos, etc. Los primeros resultados del proyecto han permitido recopilar datos estadísticos de diferentes instalaciones en Portugal, Irlanda del Norte y España y se están analizando los tamaños críticos más adecuados para las diferentes soluciones al tratamiento de residuos.

3.- LINEAS FUTURAS DE I+D PRIORITARIAS PARA EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA EN GIPUZKOA

En los siguientes apartados se desarrollan, agrupados en diferentes temáticas, las líneas prioritarias de acción propuestas para ser impulsadas durante los próximos años. Las líneas de acción propuestas están en consonancia con las prioridades existentes a nivel estatal y comunitario y tienen en cuenta las potencialidades de los distintos centros de I+D existentes en el territorio histórico.

3.1.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

A la hora de establecer las líneas prioritarias en las actividades futuras de I+D en Gipuzkoa, es necesario indicar que, aun siendo un territorio con aportes hídricos que generalmente superan la demanda, se deberá prestar especial atención durante las próximas décadas a aspectos relacionados con la calidad del agua, ya que su limitación puede producir graves impactos, no sólo en la actividad industrial y agrícola, sino también en el consumo humano. Las fluctuaciones estacionales crecientes requieren esfuerzos continuos en un uso más eficiente de los recursos hídricos y el desarrollo de nuevas soluciones que resulten efectivas para tener acceso a un agua de calidad para diferentes usos, además de preservar adecuadamente los recursos hídricos existentes.

En este sentido, las acciones prioritarias en I+D encaminadas directamente a estudiar y mejorar durante los próximos años la calidad del agua en Gipuzkoa se han agrupado en dos grandes bloques. Por una parte se sugieren acciones encaminadas a mejorar los sistemas y tecnologías existentes actualmente para medir, analizar o mejorar la calidad del agua superficial. Por otra parte se propone avanzar decididamente en optimizar la gestión sostenible e integradora de los recursos hídricos, fomentando la incorporación de nuevas herramientas como el modelado y simulación de los sistemas hídricos y las nuevas metodologías de análisis de riesgo e incertidumbre.

3.1.1.- Sistemas de detección y medida

Los sistemas utilizados para el **análisis de la calidad del agua** son una temática de gran interés para futuros trabajos de I+D. No se trata únicamente del desarrollo y validación de nuevos equipos (sensores biológicos rápidos, nano-sensores multiparamétricos, chips microbianos, sensores inteligentes, equipos portátiles robustos etc.) sino, especialmente, de facilitar la integración de los sistemas de medida mediante **tecnologías de telecomunicación** y posicionamiento para una mejor red de alerta y gestión de la calidad de los recursos hídricos. El procesamiento y análisis de los datos recogidos por los sistemas de información deberá también incorporar herramientas matemáticas y estadísticas que faciliten la detección de errores y la síntesis de información relevante. Algunas problemáticas de especial interés en esta línea son la detección de contaminantes y patógenos, el control de la contaminación difusa en los ríos, la supervisión de acuíferos y la detección de fugas y roturas en las redes de abastecimiento y saneamiento de aguas.

La investigación en los efectos producidos por distintos contaminantes sobre poblaciones acuáticas de vertebrados e invertebrados propios del territorio histórico y el establecimiento de parámetros combinados permitirían también detectar eventos de contaminación de forma sencilla y fiable. Finalmente, no hay que olvidar el interés de potenciar el desarrollo y aplicación de las nuevas herramientas de valoración y control de riesgos para posibles actividades en sistemas acuáticos, incluidas áreas costeras, actividades agrícolas e industriales.

3.1.2.- Modelado integral del agua (colectores, EDAR y ríos)

Una línea de gran interés en las actividades de I+D en Gipuzkoa puede ser el **modelado integral de las aguas superficiales** en las diferentes subcuencas, agrupando en modelos globales de calidad del agua modelos de precipitaciones, escorrentía, redes de drenaje y saneamiento, estaciones depuradoras y medios

receptores. Los modelos resultantes permitirían estudiar de manera global la calidad del agua para cada uno de los ríos del territorio, explorando los efectos de diferentes estrategias de gestión del sistema ante los diferentes escenarios actuales o futuros. En los últimos se está realizando un gran esfuerzo para hacer compatibles los modelos matemáticos existentes para cada uno de los elementos del sistema, por lo que se comienza a estar en condiciones de abordar con realismo el ambicioso objetivo de desarrollar herramientas de simulación de la calidad del agua en las cuencas del Urola, Deba, Urumea, etc. que permitan, entre otras utilidades, explorar el efecto de los vertidos de las diferentes EDAR, estimar caudales ecológicos mínimos, detectar posibles vertidos incontrolados o estimar la capacidad de autodepuración de un determinado tramo del río ante diferentes condiciones de vertidos contaminantes. También el modelado y simulación de las avenidas es un campo de especial interés.

A una menor escala, los **modelos matemáticos de los sistemas urbanos de saneamiento**, incluyendo las redes de colectores y las EDAR, se vislumbran también como una herramienta de gran interés para las entidades responsables de operar estos sistemas. La exploración de las estrategias de operación más adecuadas para diferentes periodos estacionales o ante diferentes eventos o perturbaciones (tormentas, vertidos, roturas, averías, paradas de mantenimiento, etc.) podrían entonces realizarse teniendo en cuenta las implicaciones en todo el sistema de saneamiento. La incorporación de las nuevas técnicas de **análisis cuantitativo de riesgo e incertidumbre** en las predicciones de los modelos, permitirían además estudiar el problema desde un punto de vista probabilístico, mucho más coherente con la naturaleza aleatoria de la mayoría de las perturbaciones comunes en las redes de colectores y las EDAR. Los criterios de decisión basados en índices de riesgo se vislumbran por tanto como la herramienta futura más adecuada para diseñar y gestionar eficientemente los recursos hídricos.

3.2.- TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

Las EDAR urbanas de tamaño medio y grande en el Territorio Histórico de Gipuzkoa están ya construidas o en fase de construcción, por lo que las actividades de I+D prioritarias en esta línea se deberán enfocar a optimizar su explotación y a posibles mejoras, remodelaciones o ampliaciones en las instalaciones existentes. En particular, algunos objetivos más ambiciosos como la eliminación biológica de fósforo, la posible reutilización de los efluentes de las depuradoras o la automatización avanzada de las líneas de aguas y fangos podrían irse planteando en los próximos años en Gipuzkoa. Por otra parte, el reto de construir y explotar adecuadamente las instalaciones para tratar el agua residual en pequeños núcleos autónomos demanda también nuevas necesidades tecnológicas que, en algunos casos, pueden requerir actividades de I+D en los próximos años.

3.2.1.- Gestión y tratamiento de aguas residuales y lodos

Los procesos de tratamiento innovadores que presentan hoy en día un mayor potencial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas son los reactores biológicos de membrana y los que incorporan procesos biopelícula en lecho fijo o móvil. Parece lógico, por tanto, que sean los que despierten un mayor interés de cara a realizar proyectos de I+D que faciliten su desarrollo, implantación y optimización.

Los **reactores biológicos de membrana** permiten incrementar muy significativamente la capacidad de tratamiento de los reactores biológicos convencionales, eliminando de manera simultánea los clásicos problemas de separación que condicionan con frecuencia la operación de las EDAR. Por todo ello, parece necesario potenciar las actividades de I+D relacionadas tanto con las tecnologías de membranas en sí mismas, como con sus potenciales aplicaciones para mejorar la capacidad de los reactores biológicos (optimizando la eliminación de nitrógeno o incorporando la eliminación biológica de fósforo) y para incorporar tratamientos

terciarios que sirvan para mejorar la calidad del efluente, eliminar selectivamente potenciales tóxicos y facilitar la posible reutilización de las aguas tratadas. En este sentido, un aspecto de potencial interés futuro es el estudio de las posibilidades de Gipuzkoa de cara a la reutilización de aguas de EDAR, especialmente en condiciones de estiaje, como aporte suplementario a los recursos hídricos existentes.

Los **reactores de película biológica**, con soporte fijo o móvil, son también una novedosa tecnología con un alto potencial de aplicación que permite incrementar notablemente la capacidad de tratamiento de los reactores de fangos activados convencionales. La utilización de **procesos híbridos** que combinan la biomasa adherida a soporte con la biomasa en suspensión permite además encontrar soluciones flexibles para mejorar el rendimiento de las plantas existentes, permitiendo abordar, como ejemplo, el incremento de la capacidad de tratamiento de las plantas existentes, la eliminación biológica de fósforo o la eliminación de nitrógeno en pequeñas poblaciones.

Entre las **tecnología emergentes**, una que puede tener también un gran potencial en el tratamiento de las aguas residuales son los **procesos de fango granular**, así como el tratamiento de corrientes ricas en nitrógeno (por ejemplo los sobrenadantes de digestión) utilizando la eliminación de nitrógeno **vía nitrito** y la eliminación de nitrógeno **autótrofa anaerobia**. Una posible alternativa a explorar para tratar aguas residuales urbanas de pequeñas-medianas poblaciones sería la combinación de reactores UASB modificados (mediante un filtro anaerobio superior) con un tratamiento de lodos ATAD que proporcionaría la energía para operar el UASB en rango mesófilo, y con un sistema aerobio compacto de los citados anteriormente para eliminar DQO y Nitrógeno. El sistema completo cambiaría el esquema tradicional de las EDAR, eliminando sedimentación primaria, digestión anaerobia y procesos aerobios convencionales. Además tendría un mínimo contenido de sólidos en el efluente líquido, optimizaría la energía total del sistema y minimizaría la producción de lodos saliendo éstos higienizados y estabilizados. Las tres unidades citadas requieren todavía I+D para que su combinación resulte viable.

El desarrollo y aplicación de procesos biopelícula para el **tratamiento de los olores** generados en las EDAR puede ser también una alternativa eficiente y económica frente a las tecnologías físico-químicas más convencionales, por lo que su estudio parece tener también un evidente interés en un territorio como Gipuzkoa en el que una buena parte de las EDAR se encuentra cerca de núcleos de población.

En lo referente al **tratamiento de los lodos de EDAR**, dada su situación, el territorio de Gipuzkoa no es apropiado para aplicar a su suelo el lodo urbano generado. Sin embargo, los otros posibles destinos que se le puedan dar implican –salvo caso de incineración- una digestión bien anaerobia, aerobia, mesófila o termófila, bien una combinación novedosa de algunas de ellas. Parece que los procesos colaterales que acompañan a la estabilización biológica de lodos de EDAR están relativamente bien resueltos a nivel industrial. Como reto para actividades e I+D merece destacarse el estudio del tratamiento más adecuado para las diferentes mezclas de lodo que se generan en Gipuzkoa, así como el potencial de la tecnología ATAD y sus variantes con aporte de oxígeno.

Finalmente, es importante destacar que el estudio en profundidad de todos y cada uno de los procesos unitarios descritos requiere generalmente combinar de manera complementaria los estudios experimentales (a escala piloto o real) con trabajos de modelado matemático y simulación. Por una parte, los trabajos experimentales permiten conocer el comportamiento real de los procesos estudiados y suministran la información necesaria para construir, calibrar y validar los modelos matemáticos. Por otra parte, los modelos matemáticos permiten explorar con rapidez y sin riesgos el comportamiento del proceso ante diferentes escenarios de operación. Por tanto, la combinación de ambas metodologías (experimental y matemática) es, generalmente, la manera más adecuada y eficiente de abordar el desarrollo e implantación de las nuevas tecnologías de tratamiento.

3.2.2.- Optimización de la explotación de las EDAR

La explotación óptima de las EDAR requiere entender y operar toda la planta como un único sistema, formado por un conjunto de procesos unitarios interrelacionados que deben gestionarse adecuadamente según un objetivo global. Por ello, los nuevos proyectos de I+D orientados a explotar óptimamente las EDAR buscan sincronizar la operación de cada uno de los procesos unitarios de las líneas de aguas y fangos para garantizar la estabilidad del proceso y la calidad requerida en el efluente de planta con unos costes de explotación mínimos. Es lo que en los últimos años se ha denominado **control integral de la planta** (Plant-Wide Control) y que actualmente constituye, posiblemente, la línea de investigación con mayor actividad en modelado matemático y control.

Por tanto, el desarrollo, implantación y validación de diferentes **estrategias automáticas de control** que gobiernen de manera global la EDAR constituye uno de las líneas de I+D de mayor relevancia para optimizar la explotación de las modernas EDAR. Ya se ha comentado en apartados anteriores que la implantación de estrategias de control que gobiernan automáticamente la línea de aguas de las EDAR (procesos predesnitrificación-nitrificación o SBR) ha mostrado a escala piloto y a escala real su gran utilidad. La progresiva implantación y validación de estas estrategias de control en las EDAR de Gipuzkoa constituye un actividad de I+D a corto plazo que puede contribuir notablemente a optimizar su explotación. Sin embargo, a medio plazo, se debería evolucionar desde el control de los procesos unitarios de manera independiente hacia un control global de la planta, integrando en los lazos de control todos los procesos unitarios de la EDAR y la mayor parte de los escenarios de operación y perturbaciones que puedan ocurrir en una EDAR urbana. Las estructuras jerárquicas resultantes se podrán incorporar como lazos de control supervisor sobre los SCADA convencionales de las modernas EDAR de Gipuzkoa.

Para el caso de las EDAR en pequeños núcleos de población, las **estrategias de supervisión y control automático** deben ofrecer soluciones robustas y fiables que permitan una adecuada operación descentralizada. Por ello, las soluciones de

control adoptadas deberán basarse en analizadores sencillos y robustos, con reducido mantenimiento y deberán primar la estabilidad y seguridad. Se deberán buscar por tanto estrategias sub-óptimas pero robustas, fácilmente accesibles y manipulables remotamente mediante los avanzados sistemas telemáticos disponibles actualmente. Es muy importante insistir en el interés de este tipo de estrategias de control para pequeñas EDAR, ya que los principales grupos de investigación en control de EDAR tienden generalmente a abordar los problemas de mayor complejidad conceptual sin prestar la debida atención a las soluciones para EDAR de pequeño tamaño. En el caso concreto de Gipuzkoa, un reto evidente para las próximas actividades de I+D estaría por tanto dirigido a diseñar, implantar y validar sistemas de control eficientes, robustos y fiables para las necesidades de las pequeñas poblaciones.

Una herramienta complementaria al desarrollo e implantación de estrategias de control son los **simuladores de operación de EDAR**. Al igual que en el caso del control automático, el próximo reto de I+D en los simuladores de operación está orientado a integrar en los modelos todos los procesos unitarios de las líneas de agua y fango, de cara a explorar por simulación el comportamiento global de la planta y las mutuas interrelaciones entre los diferentes elementos. Este ambicioso objetivo está actualmente limitado por la dificultad de conectar adecuadamente los modelos matemáticos existentes en la bibliografía para los diferentes procesos unitarios, por lo que se está produciendo una intensa actividad de investigación en modelado matemático orientada a desarrollar modelos globales de EDAR que sean numéricamente estables y garanticen la continuidad de masa y carga en las múltiples conexiones. Existen varias EDAR en Gipuzkoa que podrían servir de base para verificar la utilidad de esta nueva generación de simuladores de operación integrados.

Las problemáticas de operación que pueden ser abordadas al estudiar globalmente una EDAR son muy amplias. Uno de los retos clásicos en la operación y control integrado de las EDAR urbanas es la eliminación eficiente de los nutrientes (nitrógeno y fósforo), que viene generalmente limitada por las limitaciones en el sustrato carbonoso biodegradable aportado por el influente a la planta. El desequilibrio entre la DQO biodegradable y los nutrientes se ve afectado por las interrelaciones entre los diferentes procesos unitarios a lo largo de la EDAR. Por una parte, la

digestión de lodos produce retornos líquidos con alto contenido de nutrientes que retornan a cabeza de la línea de aguas y que pueden afectar notablemente su eficiencia. Por otra parte, las limitaciones de carbono se ven con frecuencia acentuadas por la eliminación de sólidos en la decantación primaria.

Ante esta situación, en los últimos años se está investigando activamente en la incorporación de diferentes tecnologías que permitan compensar los desequilibrios en las concentraciones de carbono y nutrientes dentro de la EDAR. Algunas actuaciones van dirigidas a implantar tratamientos específicos en los retornos de los digestores, como la eliminación físico-química de fósforo, la eliminación de nitrógeno vía nitrito o la eliminación de nitrógeno autótrofa anaerobia (Anammox) que ya han sido mencionadas previamente. Otras líneas de I+D van orientadas a incrementar el flujo de carbono al tratamiento secundario de la línea de aguas, bien alimentando total o parcialmente los reactores biológicos con agua bruta o bien generando sustrato biodegradable a partir del fango sedimentado. Estas variantes podrían tener un beneficio adicional en la reducción de la producción de fangos. Todas estas alternativas y otras que vayan surgiendo pueden ser exploradas de manera sencilla utilizando las nuevas herramientas de simulación.

En cualquiera de los casos, es importante considerar que la optimización global de la operación de la EDAR es generalmente diferente de la optimización individual de cada proceso unitario por separado. Es decir, una adecuada explotación de la planta requiere estimar en cada momento los requerimientos exigidos a cada proceso unitario de las líneas de agua o fangos que dan lugar a un óptimo global de operación. Este óptimo debe, lógicamente incluir, debidamente ponderados, diferentes factores relacionados con la estabilidad del proceso, la calidad del agua efluente y los costes totales de explotación.

3.3.- SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

La optimización de los sistemas de abastecimiento de aguas merece ser también incluida entre las temáticas de interés para posibles trabajos de I+D en Gipuzkoa. Por una parte, el estudio y potencial incorporación de nuevas tecnologías de tratamiento para filtrado (membranas) y desinfección puede tener una gran relevancia futura. Por otra parte, el desarrollo de nuevas herramientas para gestionar óptimamente las redes en función de las fluctuaciones de la demanda, minimizando riesgos en el servicio, costes económicos y fugas es una demanda indudable de cara a lograr un sistema eficiente y sostenible.

3.4.- GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA INDUSTRIA

La industria de Gipuzkoa, siendo en su mayor parte mediana y pequeña empresa, y quedando por tanto en muchos casos fuera de las normativas IPPC, tendrá sin embargo, durante los próximos años un reto importante en lo referente a la gestión sostenible del agua, en consonancia con las tendencias marcadas en los diferentes sectores industriales europeos. En este sentido, los trabajos de I+D encaminados a la mejora e implantación de sistemas que permitan la reutilización del agua y al desarrollo de sistemas que permitan reducir el impacto ambiental de los vertidos industriales en el medio receptor, han de contribuir, con la condición necesaria de una clara implicación de la industria en estos trabajos, a avanzar decididamente en esas mejoras.

La investigación planteada con el fin de reducir el impacto de los contaminantes industriales sobre el medio receptor se centrarían en la depuración y control de aguas residuales industriales mediante tecnologías avanzadas de tratamiento, con una implicación directa de la pequeña y mediana empresa gipuzkoana. Este tipo de tecnologías debe apuntar a soluciones a medida para los diferentes sectores industriales, combinando tecnologías avanzadas de depuración (tecnologías de

membranas, tecnologías anaerobias avanzadas, tecnologías de oxidación avanzada, etc) con soluciones que permitan abordar problemáticas específicas de los diferentes sectores industriales, prestando una atención especial a los compuestos potencialmente tóxicos presentes en los vertidos industriales. Es necesario el desarrollo de tecnologías específicas que permitan eliminar de forma selectiva y de forma económica compuestos específicos, abordando problemáticas concretas de la industria, que en muchos casos se hacen extensibles a aplicaciones urbanas, como son el bioensuciamiento, la corrosión, la precipitación de sales, etc, tanto desde el punto de vista tecnológico como desde el punto de vista de modelado matemático.

Una segunda línea de acción, que debe llevar un desarrollo paralelo a la anteriormente planteada, son las acciones de I+D encaminadas a establecer sistemas que permitan el reciclado de agua dentro de la industria con el fin de reducir de forma drástica el porcentaje de agua para usos industriales dentro de nuestro territorio histórico. Para ello será necesaria la implementación e investigación de tecnologías de tratamiento capaces de producir agua de calidades concretas para usos determinados. Uno de los principales problemas para la reutilización del agua en la industria en aplicaciones concretas es la ausencia de conocimiento acerca de las calidades de aguas requeridas en esas aplicaciones. Así resulta necesario en primer lugar establecer, dentro de los diferentes sectores industriales las calidades requeridas en los diferentes usos a los que va destinado el agua, de modo que la integración de tecnologías de tratamiento con herramientas de control de dichas tecnologías permitan, junto con herramientas de gestión integral del agua en la industria un uso más sostenible del agua en la industria. El desarrollo de las referidas herramientas de gestión integral del agua deberán incluir el modelado de procesos de tratamiento y sistemas hidráulicos, así como herramientas de optimización que permitan en todo momento minimizar el impacto ambiental de la actividad industrial sin que las acciones requeridas afecten al producto final de la industria.

No se puede olvidar tampoco la posible reutilización del agua de EDAR, debidamente tratada, como aporte de agua para la industria, especialmente en aquellas empresas que requieran grandes cantidades de agua, sin requisitos exigentes de calidad y que se encuentren ubicadas en puntos cercanos a las depuradoras.

4.- **CONCLUSIONES**

El presente informe recoge en primer lugar, junto a una breve revisión del estado del arte a nivel mundial en el sector de las aguas, las principales actividades de I+D llevadas a cabo en los últimos años por los diferentes agentes de I+D en el territorio histórico de Gipuzkoa. En el informe se recogen más de cincuenta proyectos desarrollados, en su mayoría en Gipuzkoa, junto a las publicaciones más relevantes que han surgido como consecuencia del desarrollo de estos proyectos. En esta descripción se incluyen además algunos proyectos que, aún habiéndose desarrollado fuera del territorio histórico, sus objetivos y resultados tienen especial relevancia para Gipuzkoa.

A partir del análisis de los trabajos de investigación realizados en Gipuzkoa, del análisis del estado del arte de la investigación en el sector a nivel europeo y mundial y teniendo en cuenta las potencialidades de los agentes de I+D de Gipuzkoa, se mencionan algunas líneas de I+D que parecen en principio apropiadas para las necesidades del Territorio Histórico en los próximos años. Es importante considerar cómo las líneas de I+D sugeridas en este informe están en consonancia plena con las líneas de investigación prioritarias que se están considerando a nivel europeo.