

# UTILIZACIÓN DE SISTEMAS INFORMÁTICOS PARA EL DISEÑO DE ESTACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

José Ferrer<sup>1</sup>, Carmen Gabaldón<sup>2</sup>, Aurora Seco<sup>2</sup>, Paula Marzal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia

<sup>2</sup>Dep. de Ingeniería Química. Universitat de València

**RESUMEN:** Los sistemas informáticos para el diseño de Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR) resultan de gran utilidad para la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la calidad del agua en el medio natural. En este artículo se presenta el sistema DATAR, desarrollado para el diseño completo y riguroso de una ETAR que cumpla las especificaciones impuestas al vertido. Para ello se han desarrollado modelos matemáticos que describen los procesos que tienen lugar en los distintos elementos de tratamiento considerando los parámetros de calidad demanda biológica de oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno Kjeldhal (NKT) y fósforo total (PT). Se realiza un diseño simultáneo del tratamiento de fangos, considerándose los parámetros sólidos suspendidos volátiles (SSV) y su fracción biodegradable (SSVB) para el diseño riguroso de los sistemas de digestión de fangos. En este artículo se incluye la formulación de los modelos correspondientes a los procesos de tratamiento biológico por fangos activados y digestión aerobia y anaerobia de fangos. El diseño generado por DATAR incluye los aspectos relacionados con las dimensiones y maquinaria de todos los elementos del tratamiento, su disposición en planta y alzado así como las necesidades de potencia instalada y consumo de energía

## INTRODUCCIÓN

Una Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR) es una instalación industrial en la que a partir de una materia prima, el agua residual, se genera un producto, el agua tratada, y unos subproductos, los fangos. El funcionamiento correcto de una ETAR supone la obtención de un agua tratada que cumpla las especificaciones de calidad que se le exigen. En el caso de la legislación Española, las especificaciones de calidad están contenidas en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

Una ETAR convencional consta de los siguientes procesos:

- Pretratamiento.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario o biológico.
- Tratamiento terciario.
- Tratamiento de fangos.

Los cuatro primeros provocan sucesivas modificaciones de la calidad del agua. En el pretratamiento se eliminan los sólidos de mayor tamaño que

pueden atascar o dañar la instalación posterior así como las gravas y arenas. En el primario se elimina parte de los sólidos suspendidos y la materia orgánica asociada a ellos, normalmente mediante operaciones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario contiene frecuentemente un contenido en materia orgánica relativamente elevado. El tratamiento de este efluente para eliminar la materia orgánica residual y la materia suspendida se conoce como tratamiento secundario. Este tratamiento se realiza normalmente mediante procesos biológicos con utilización de microorganismos. El tratamiento terciario consiste, normalmente, en una desinfección, generalmente por cloración, aunque la reutilización del agua o el control de la eutrofización de las aguas receptoras puede hacer necesario algún otro tratamiento terciario, con el fin de eliminar los sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes que quedan tras del tratamiento secundario.

Los fangos generados en una ETAR convencional están constituidos mayoritariamente por materia orgánica. Previamente a su vertido, los fangos deben quedar estabilizados para evitar que se produzcan problemas asociados a la degradación de dicha materia

orgánica en el punto de vertido, y además queden eliminados los microorganismos patógenos. La estabilización puede ser biológica, química o térmica. Antes de la eliminación final de los fangos es necesario, así mismo, disminuir su contenido en agua. Una vez estabilizados, pueden ser evacuados de la instalación para su aplicación sobre el terreno o eliminación en vertederos controlados.

En base a esta descripción general de una ETAR, puede considerarse que en todo proceso de tratamiento intervienen tres corrientes de materiales: línea de agua, línea de fangos y línea de sobrenadantes. Esta última está constituida por el agua resultante del proceso de concentración de los fangos y se recircula a la línea de agua para su tratamiento.

La explotación satisfactoria de una ETAR pasa por el correcto diseño y operación tanto de los elementos de tratamiento del agua como de los correspondientes al acondicionamiento de los fangos. En este sentido, el diseño riguroso de una ETAR deberá contemplar simultáneamente las tres líneas anteriormente descritas.

En los últimos años, se está llevando a cabo un importante esfuerzo para el desarrollo e implantación de programas integrales de gestión de la calidad del agua en el medio natural. La experiencia adquirida en este campo ha mostrado que, en la mayor parte de los casos, las decisiones finalmente consideradas como más adecuadas implican unas determinadas exigencias de calidad de los vertidos de aguas residuales. Estas exigencias han ido aumentando a lo largo de los años debido tanto a la presión social como a la legislativa, y finalmente se plasman en la construcción, ampliación o adecuación de Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR).

Por todo ello, disponer de una herramienta capaz de diseñar en un tiempo muy breve una ETAR, de forma que sea posible comparar distintas alternativas, resulta de gran utilidad para la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la calidad del agua en el medio natural.

El uso de modelos matemáticos, implementados en ordenador, para la simulación de ETAR, está poco extendido comparado con la utilización de métodos equivalentes en otras ramas de la ingeniería. Las razones para ello son fundamentalmente de dos tipos:

- La complejidad de los procesos físico-químicos y biológicos que se producen y, por tanto, la dificultad de representarlos mediante un modelo matemático.
- La escasa disponibilidad de valores o expresiones de los parámetros de los modelos utilizados.

Los primeros modelos de simulación implementados en ordenador aparecen al final de los años 60 (Smith y Eilers, 1968) y su evolución ha sido continua hasta hoy (Environment Canada, 1974; Keinath y Wanielista, 1975; Tyteca y col., 1977; Morley, 1979; Ramalho, 1983; James, 1984; IAWPRC, 1986; Padukone y Andrews, 1989; Dupont y Henze, 1992; Pons y col., 1993; Sheintuch, 1993; Stokes y col., 1993; Griffiths, 1994).

Paralelamente al desarrollo de los modelos de simulación han ido apareciendo programas de diseño de ETAR. Entre las aportaciones más destacables en este campo se pueden citar a Smith y Eilers, 1968; Environment Canada, 1974; Chen y col., 1972; Shoemaker y Barkley, 1977; Eilers y col., 1978; Rossman, 1979, 1980; Pineau y col., 1985; Liaw y Chang, 1986; Getty y col., 1987; Bidstrup y Grady, 1988; Gasso y col., 1988, 1989; Oles y Wilderer, 1991; Spinos y Marinokouris, 1992; Kao y col., 1993; Crabtree y Rowell, 1993. Sin embargo, a pesar de la extensa labor realizada, los programas anteriores presentan ciertas limitaciones, unas derivadas de su escasa flexibilidad en la comunicación con el usuario y en la selección y ensamblaje de elementos de tratamiento, y otras, más importantes, derivadas de simplificaciones del proceso admitidas en el desarrollo del programa.

Así, exceptuando algunos de los programas más recientes (Gasso y col., 1988, 1989; Spinos y Marinokouris, 1992 y Crabtree y Rowell, 1993), la entrada y salida de datos se realiza por medio de archivos editados externamente al propio programa. Asimismo, la mayoría de los programas han sido concebidos para diseñar ETAR con un determinado esquema de tratamiento prefijado. Únicamente Gasso y col., 1988, 1989 y Crabtree y Rowell, 1993; permiten seleccionar libremente el esquema de tratamiento.

Desde el punto de vista legislativo, la limitación más importante de los programas anteriores se encuentra en los parámetros de calidad considerados para representar los procesos de tratamiento. Estos programas únicamente tienen en cuenta los parámetros demanda biológica de oxígeno a los 5 días ( $DBO_5$ ), sólidos suspendidos (SS) y, en algunos casos, sólidos suspendidos volátiles (SSV), mientras que la actual legislación impone además otras restricciones a los vertidos en cuanto a demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno Kjeldhal total (NKT), nitrógeno total (NT), y fósforo total (PT). En particular, la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en ETAR no ha recibido hasta el momento suficiente atención y se hace cada día más imprescindible para evitar problemas de eutrofización en los cauces receptores de los vertidos.

Otras limitaciones que presentan los programas anteriores son, por un lado, el no considerar en el diseño la maquinaria asociada a cada tratamiento y su influencia sobre el propio diseño, ni la hidráulica de la ETAR, y por otro, el no tener en cuenta la posibilidad de condiciones distintas de caudal, calidad o temperatura en distintas épocas del año. Este último aspecto es de gran importancia en el diseño de ETAR ubicadas en zonas turísticas, con grandes variaciones estacionales de población, y en zonas con apreciables diferencias de temperatura media en invierno y verano que afectan considerablemente a la eficacia de los procesos de tratamiento biológico.

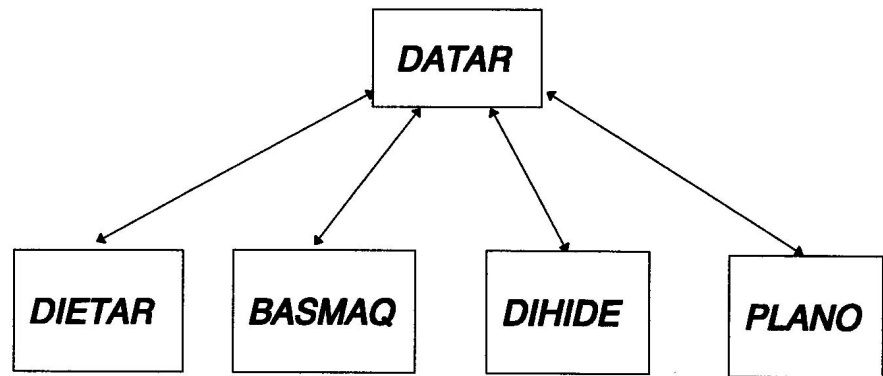


Figura 1. Estructura general de DATAR

En este trabajo se presenta un sistema informático para el Diseño Automatizado de Tratamientos de Aguas Residuales (DATAR), que pretende solucionar las limitaciones expuestas y obtener en tiempos muy breves el diseño completo de una ETAR, incluyendo todos aquellos aspectos relacionados con:

- Elementos para el tratamiento de las aguas residuales y fangos producidos.
- Canales, tuberías, bombas y demás elementos relacionados con la hidráulica de la instalación.
- Maquinaria asociada.
- Distribución en planta y alzado de los distintos elementos de la instalación.

Todo ello considerando la variación que cada elemento del tratamiento produce sobre los parámetros de calidad DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, NKT, NT y PT. El diseño así obtenido constituye directamente un diseño completo de ETAR a falta de la obra civil.

#### **PARÁMETROS DE DISEÑO DE ESTACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

La modelación del tratamiento de aguas residuales constituye el núcleo fundamental de DATAR. Previamente al desarrollo del modelo es necesario fijar cuales serán los contaminantes a considerar. La legislación Española y Comunitaria sobre el vertido de aguas residuales obliga a considerar, como mínimo, los siguientes parámetros: DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, NKT, NT, y PT.

Para poder efectuar el diseño completo y riguroso de los elementos del tratamiento debe distinguirse, en estos parámetros la fracción asociada a la materia suspendida presente en el agua residual y la fracción

disuelta, así como la fracción volátil de los SS (SSV) y dentro de éstos, la fracción biodegradable (SSVB).

Además del efluente vertido por la planta es necesario considerar las características de los fangos producidos. Si bien la legislación en este momento no impone restricciones a las características de los fangos, éstos deben cumplir una serie de condiciones para que sea posible su eliminación o vertido exteriormente a la propia ETAR sin ocasionar problemas medioambientales. Para poder establecer las posibilidades de vertido del fango es necesario considerar en el modelo los parámetros SSV y SSVB.

El modelo desarrollado para su inclusión en DATAR considera los 8 parámetros citados. Esto permite representar con suficiente precisión las transformaciones que experimenta el agua residual y los fangos a medida que van sufriendo los distintos tipos de tratamiento. Así mismo se considera la influencia que los sobrenadantes procedentes de la línea de fangos tienen en el proceso de diseño de los elementos de la línea de agua. A excepción de los SSVB, el resto de los parámetros son habitualmente analizados en una ETAR en la que se realiza un adecuado control del proceso. El reducido número de parámetros necesarios, y la disponibilidad de valores de los mismos representa una gran ventaja frente a modelos más complicados que incluyen un elevado número de parámetros, como el de la IAWPRC.

#### **ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA DATAR**

En la Figura 1 se muestra un esquema de la estructura de DATAR. Actualmente esta implementado en ordenadores tipo PC compatibles. La interacción entre el usuario y DATAR se realiza dentro del entorno WINDOWS.

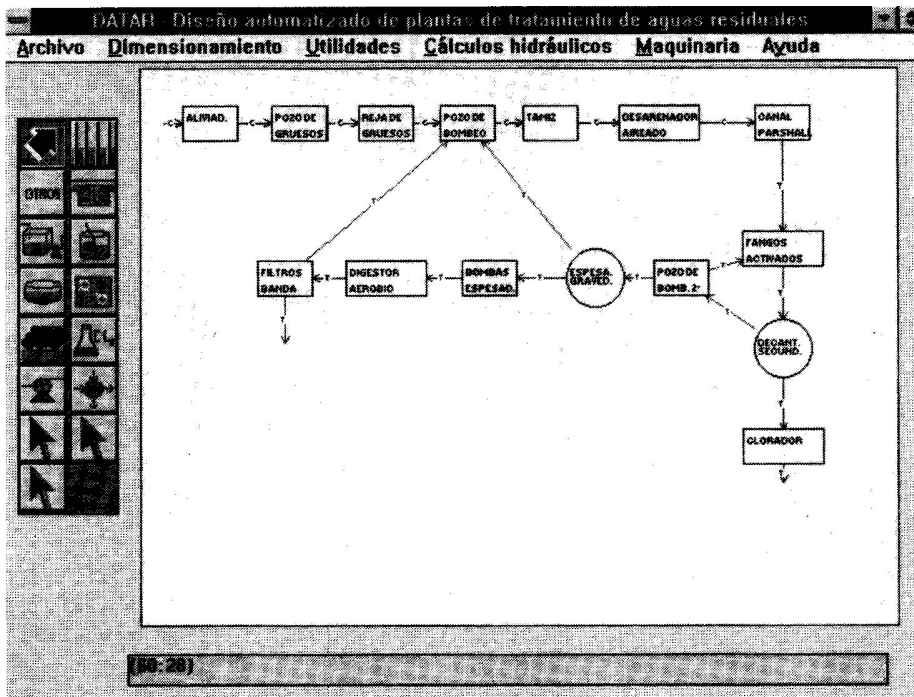


Figura 2. Pantalla principal de la interfaz GENTAR

| Entrada  |                            |
|--|----------------------------|
| Dotaciones de agua residual  |                            |
| N° habitantes  | 5000                       |
| Dotación media   | 170.0 200 l/hab/día        |
| Relación Qpunta/Qmedio   | 2 2.2                      |
| Relación Qpluvial/Qpunta máx.  | 2.00                       |
| <input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>       |                            |
| <input checked="" type="radio"/> Invierno<br><input type="radio"/> Verano<br>T 15 °C |                            |
| Cargas, g/hab/día  |                            |
| DBO <sub>5</sub> 51.0 70   | NKT 8.0 10                 |
| DQO 102.0 140  |                            |
| SS 59.5 80   | P <sub>total</sub> 1.9 2.5 |
| Alcalinidad, mg/L CaCO <sub>3</sub>  |                            |
| 350.0 350  |                            |
| N-NO <sub>3</sub> 7.0  |                            |
| <input type="checkbox"/> Agua residual doméstica                                     |                            |
| % de soluble   |                            |
| DBO <sub>5</sub> 30 30%  | DQO 30 30%                 |
| NKT 65 65%   | P <sub>total</sub> 65 65%  |
| % SSV 65 60 - 95%  | % SSVNB 25 20 - 40%        |

Figura 3. Ejemplo de datos correspondientes al influente de la ETAR

El módulo DATAR constituye el primer nivel en el que se encuentra el menú y pantalla principales. Desde él se puede acceder a los siguientes módulos:

- DIETA R, en el que se efectúa el diseño de los elementos de tratamiento de agua y fangos, seleccionándose la maquinaria que influye en este diseño.
- BASMAQ, es un gestor de la base de datos de maquinaria. En dicha base de datos se encuentra

almacenada toda la maquinaria necesaria para el diseño del tratamiento de agua y fangos así como los elementos relacionados con la hidráulica de la ETAR.

- PLA NO, permite efectuar la distribución en planta de los distintos elementos del tratamiento de aguas y fangos, y fijar las cotas de aquellos elementos de la línea de agua o fangos que se requieran para la posterior distribución vertical de todos los elementos de la ETAR.

- DIHIDE, en el que se fijan todos los criterios de diseño de tipo hidráulico, se efectúan los cálculos de pérdidas de carga, se seleccionan las bombas necesarias y se diseñan los canales, tuberías y pozos de bombeo de las líneas de agua y fangos.

A continuación se describen los distintos módulos que componen DATAR, incluyendo los aspectos relativos al tratamiento de agua y fangos, de hidráulica del proceso y los relacionados con las interfaces de conexión entre DATAR y el usuario.

## EL MÓDULO DATAR

El módulo DATAR gestiona la comunicación con el usuario en todo lo referente a la definición de datos de entrada y salida del tratamiento, generación del diagrama de flujo del proceso definiendo las líneas de agua y fangos, salidas a través de impresora, almacenamiento o recuperación de la información, así como la transmisión de información entre los distintos módulos.

Este módulo DATAR actúa como sistema experto para el diseño de tratamientos de aguas residuales en tres campos:

- Propone o desaconseja elementos de tratamiento, en función de los previamente seleccionados por el usuario.
- Propone criterios de diseño de cada elemento seleccionado por el usuario, en función del conjunto de elementos de tratamiento que constituye la ETAR.
- Asigna, como última fase del proceso de diseño, la maquinaria auxiliar que, siendo necesaria, no influye en el diseño de los elementos de tratamiento de aguas residuales.

### La interfaz GENTAR

La transferencia de información con el usuario se realiza a través de la interfaz GENTAR. Esta comunicación se efectúa de forma gráfica e interactiva. La sencillez y comodidad de esta forma de operación evita que el usuario dedique tiempo y esfuerzo a actividades que nada tienen que ver con el diseño de la ETAR.

En la Figura 2 puede verse una imagen de la pantalla principal. La zona central constituye el área de trabajo. En la parte superior aparece la barra de menús, a través de los cuales el usuario indica las acciones a efectuar por DATAR. En la parte izquierda se muestra la caja de herramientas en cuyo interior se encuentran ordenados un conjunto de iconos. Cada uno de estos iconos representa un elemento o grupo de elementos del tratamiento, o bien suministra la herramienta para efectuar uniones entre distintos elementos.

Para proceder al diseño de una ETAR el primer paso es establecer el diagrama de flujo del proceso, seleccionando de la caja de herramientas los elementos de tratamiento deseados y colocándolos en el área de trabajo. La unión entre los elementos se realiza automáticamente, aunque existe la posibilidad de que el usuario modifique dichas uniones. Quedan así establecidas las líneas de agua, fangos y sobrenadantes. Un ejemplo de esquema de tratamiento puede verse en el área de trabajo de la Figura 2.

Los datos necesarios para proceder al diseño de la ETAR son:

| Salida                 |       |     |                    |      |    |
|------------------------|-------|-----|--------------------|------|----|
| Concentraciones (mg/L) |       |     |                    |      |    |
| DBO <sub>5</sub>       | 25.0  | 25  | NKT                | 15.0 | 15 |
| DQO                    | 125.0 | 125 | N <sub>total</sub> | 50.0 |    |
| SS                     | 30.0  | 30  | P <sub>total</sub> | 10.0 | 10 |

Figura 4. Ejemplo de datos correspondientes al efluente de la ETAR

| Criterios de diseño de fangos activados  |         |                          |        |
|--|---------|--------------------------|--------|
| Carga másica, 1/día  |         |                          |        |
| Convencional   |         |                          |        |
| Invierno   | 0.10    | <20 °C: 0.1 - 0.4 (0.15) |        |
| Verano   | 0.30    | 20 °C: 0.2 - 0.45 (0.25) |        |
|  |         | >20 °C: 0.25 - 0.6 (0.4) |        |
| SS, mg/L   |         |                          |        |
| en el reactor, 2000-4000   |         |                          |        |
| Invierno   | 3000.0  | Verano                   | 3058.8 |
| en la recirculación  |         |                          |        |
|  | 10000.0 |                          | 10000  |
| Oxígeno disuelto, mg/L   |         |                          |        |
| a Qmedio   | 2.      |                          | 2      |
| a Qpunta   | 1.      |                          | 1      |
| <input checked="" type="checkbox"/> Parámetros cinéticos para aguas residuales urbanas |         |                          |        |

Figura 5. Ejemplo de criterios de diseño de un proceso de fangos activados

- Características del influente o influentes a la ETAR.
- Calidad exigida al efluente o efluentes de la ETAR.
- Criterios de diseño de los elementos de tratamiento del diagrama de flujo.

En lo que respecta a las características del influente de la ETAR, se precisan los siguientes datos: caudal medio, punta y de pluviales, temperatura, e información relativa a la calidad del agua residual (DBO<sub>5</sub>, DQO, NKT y PT con sus fracciones solubles, SS, SSV, SSVB, NO<sub>3</sub> y alcalinidad). Estos datos se suministran para dos estaciones del año, por medio de una pantalla como la mostrada en la Figura 3.

La pantalla de características exigidas al efluente de la ETAR se muestra en la Figura 4.

Cada elemento del diagrama de flujo del proceso lleva asociado una pantalla de criterios de diseño para su

| Resultados del reactor de fangos activados |                              |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
|--|------------------------------|--------|--------------|--------|--|----------|---|-------------|------|----------|------|-----------|-----|-----------|-----|-------------------------|-----|--------------------|--|-----------------------------------|-------------|------------------------------|------------|-------------------------------|------------------|
|  | Datos entrada                |        | Datos salida |        | Diseño   |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
|  | Invierno                     | Verano | Invierno     | Verano |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
|  | Caudales (m <sup>3</sup> /d) |        |              |        | <table border="1"> <tr><td>Unidades</td><td>1</td></tr> <tr><td>Longitud, m</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>Ancho, m</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>Calado, m</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>Altura, m</td><td>3.9</td></tr> <tr><td>Volumen, m<sup>3</sup></td><td>999</td></tr> <tr><td colspan="2">Salida del reactor</td></tr> <tr><td>Longitud*calado s/aliviadero, m*m</td><td>8.92 * 0.30</td></tr> <tr><td>Marca - altura(mm) vertedero</td><td>COUTEX 166</td></tr> <tr><td>Ancho,calado,altura canal (m)</td><td>.30 , .213 , .30</td></tr> </table> | Unidades | 1 | Longitud, m | 16.0 | Ancho, m | 16.0 | Calado, m | 3.0 | Altura, m | 3.9 | Volumen, m <sup>3</sup> | 999 | Salida del reactor |  | Longitud*calado s/aliviadero, m*m | 8.92 * 0.30 | Marca - altura(mm) vertedero | COUTEX 166 | Ancho,calado,altura canal (m) | .30 , .213 , .30 |
| Unidades                                   | 1                            |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Longitud, m                                | 16.0                         |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Ancho, m                                   | 16.0                         |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Calado, m                                  | 3.0                          |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Altura, m                                  | 3.9                          |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Volumen, m <sup>3</sup>                    | 999                          |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Salida del reactor                         |                              |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Longitud*calado s/aliviadero, m*m          | 8.92 * 0.30                  |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Marca - altura(mm) vertedero               | COUTEX 166                   |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Ancho,calado,altura canal (m)              | .30 , .213 , .30             |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Medio                                      | 850.0                        | 2600.0 |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Punta                                      | 1700.0                       | 5200.0 |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| Pluvial                                    | 5200.0                       | -      |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
|  | Concentraciones (mg/L)       |        |              |        |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| DBO5                                       | 269.1                        | 269.1  | 15.8         | 19.0   |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| DQO  | 538.2                        | 538.2  | 78.3         | 83.0   |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| NKT  | 44.6                         | 44.6   | 3.4          | 9.0    |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| N total                                    | 60.7                         | 60.7   | 47.2         | 47.2   |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |
| P total                                    | 12.0                         | 12.0   | 9.7          | 8.7    |  |          |   |             |      |          |      |           |     |           |     |                         |     |                    |  |                                   |             |                              |            |                               |                  |

|                           | Caract. funcionamiento |        |
|---------------------------|------------------------|--------|
|                           | Invierno               | Verano |
| Tipo de proceso           | Convencional           |        |
| Carga másica, 1/d         | .1                     | .3     |
| SS en el reactor, mg/L    | 3000.0                 | 3058.8 |
| t retención hidráulico, h | 21.7                   | 7.1    |
| t retención celular, d    | 9.64                   | 3.21   |

| Maquinaria                  |                |        |
|-----------------------------|----------------|--------|
| Turbinas                    |                |        |
| Marca-Modelo                | COUTEX-AS-1015 |        |
| Nº turbinas                 | 4              |        |
| Potencia instalada, Kw      | 44.2           |        |
|                             | Invierno       | Verano |
| Potencia máx. utilizada, Kw | 37.9           | 44.2   |
| Consumo medio, Kwh/día      | 245            | 697    |

Continuar

dimensionamiento. DATAR asigna criterios típicos de diseño por defecto en función de las características del efluente y la/s línea/s de tratamiento elegidas. Sin embargo estos criterios pueden ser modificados por el usuario para obtener un diseño más ajustado. En la Figura 5 puede verse una pantalla de criterios de diseño, correspondiente, en este caso, a un tanque de fangos activados. En aquellos elementos en los que la maquinaria disponible afecta a su dimensionamiento (elementos con aireación, deshidratación por filtros banda, sistemas de calefacción de la digestión anaerobia...) la selección previa al diseño de dicha maquinaria se puede realizar directamente desde la pantalla de criterios de diseño.

Figura 6. Ejemplo de resultados de fangos activados

Tabla 1. Elementos de tratamiento incluidos actualmente en DATAR

|   |  |
|---|--|
| Regulación de caudal:   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aliviadero</li> <li>■ Depósito de regulación</li> <li>■ Canal Parshall</li> </ul>   |
| Operaciones de desbaste:                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pozos de gruesos</li> <li>■ Reja de gruesos</li> <li>■ Reja de finos</li> <li>■ Tamices de limpieza mecánica</li> <li>■ Tamices autolimpiables</li> </ul> |
| Operaciones de desarenado:                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Desarenador de flujo horizontal</li> <li>■ Desarenador aireado</li> <li>■ Desarenador-desengrasador</li> </ul>  |
| Tratamiento físico-químico:                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sistemas de adición de reactivos</li> <li>■ Tanque de mezcla rápida</li> <li>■ Tanque de floculación</li> </ul>   |
| Decantación:  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Decantación primaria</li> <li>■ Decantación secundaria</li> <li>■ Tanque Imhoff</li> </ul>  |
| Tratamiento biológico por fangos activados con nitrificación: | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Oxidación total</li> <li>■ Convencional</li> <li>■ Alta carga</li> </ul>  |
| Desinfección:   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cloración</li> </ul>  |
| Tratamiento de fangos:  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Espesado por gravedad</li> <li>■ Digestión aerobia</li> <li>■ Digestión anaerobia</li> <li>■ Filtros banda</li> <li>■ Eras de secado</li> </ul>           |

Con los datos anteriores, DIETAR realiza el diseño completo de todos los elementos de la ETAR. Los resultados obtenidos en cada elemento van siendo mostrados en pantalla a medida que se efectúa el cálculo. En la Figura 6 puede verse un ejemplo de resultados, correspondiente a un tanque de fangos activados. Si los resultados no son satisfactorios pueden cambiarse los criterios de diseño y/o las características de la maquinaria utilizada; DIETAR procede de nuevo al cálculo del elemento y actualiza los resultados de elementos previamente diseñados.

Terminado el diseño del tratamiento se puede acceder al módulo

PLANO para fijar la situación en planta de los distintos elementos y las cotas necesarias para el cálculo hidráulico.

Posteriormente, el módulo DIHIDE completará el diseño hidráulico proporcionando la distribución en vertical de la ETAR.

Finalmente, DATAR asigna la maquinaria auxiliar (valvulería, compuertas, carros...). Previamente, el usuario debe seleccionar la marca de la maquinaria a través de las correspondientes pantallas.

La generación de distintas alternativas de tratamiento es muy sencilla, pues basta cambiar en el diseño original aquellos elementos que se considere conveniente y actualizar el diseño. La actualización incluye el recálculo de las dimensiones de los equipos y su redistribución en planta y vertical.

Los resultados obtenidos en cada alternativa pueden ser consultados por pantalla o impresos. En cualquiera de las fases expuestas es posible archivar toda la información introducida por el usuario o generada por DATAR. Al recuperar esta información el proceso de diseño podrá reanudarse donde se detuvo.

Desde GENTAR es posible así mismo acceder a BASMAQ, para la introducción y mantenimiento e la base de datos de maquinaria.

## EL MÓDULO DIETAR

Este módulo agrupa el diseño de los elementos de tratamiento de aguas residuales. Se accede a él seleccionando, en la barra de menús de la interfaz GENTAR, Dimensionamiento.

Este módulo contiene actualmente el diseño de los elementos recogidos en la Tabla 1. Para cada uno de ellos se ha desarrollado el modelo matemático correspondiente. En el diseño de cada uno de estos elementos se tiene en cuenta que como dato de entrada pueden aparecer condiciones referentes a dos épocas distintas del año. El dimensionamiento de cada elemento se realiza optimizando su volumen por modificación de las condiciones de operación en cada una de las dos épocas del año.

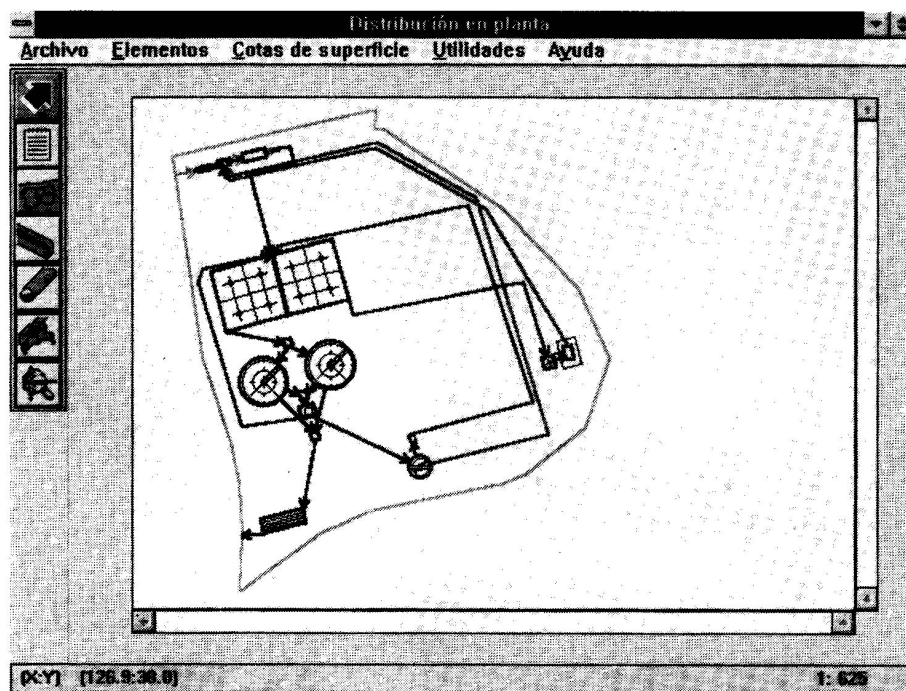


Figura 7. Ejemplo de pantalla principal del módulo PLANO

A modo de ejemplo, se exponen posteriormente tres de los modelos matemáticos desarrollados para su aplicación en DATAR y que suponen una aportación a la generalización del proceso de diseño de ETAR. Estos son los modelos correspondientes a:

- Tratamiento Biológico por Fangos Activados.
- Digestión Aerobia de Fangos.
- Digestión Anaerobia de Fangos.

## EL MÓDULO PLANO

Al módulo PLANO se accede desde la interfaz GENTAR a través de la barra de menús.

En la primera ejecución del plano, se especifica la escala del plano y el tamaño y orientación del papel donde se imprimirá la distribución en planta.

La pantalla principal del módulo PLANO (Figura 7) presenta la misma estructura general que la interfaz GENTAR, con área de trabajo, caja de herramientas y barra de menús.

Los elementos de la caja de herramientas permiten introducir el perímetro exterior de cada una de las áreas del terreno situadas a distinta cota, situar todos

los elementos de tratamiento calculados en DIETAR y establecer los canales y tuberías de conexión. Estas disposiciones geométricas pueden ser modificadas fácilmente por el usuario.

Definida la distribución en planta, el módulo PLANO calcula las longitudes de las tuberías y canales así como los accidentes que deban situarse (arquetas de reparto, codos, uniones en T...) y permite introducir las cotas de agua o fangos necesarias para la distribución vertical de la ETAR.

**EL MÓDULO DIHIDE**

Al módulo DIHIDE se accede desde la interfaz GENTAR como se observa en la Figura 8.

Este módulo efectúa la totalidad de los cálculos hidráulicos, determinando los diámetros de las tuberías, los sistemas de bombeo de agua y fangos, considerando las pérdidas de carga en todos los puntos de la instalación (incluyendo válvulas, compuertas, canales...). La información necesaria para ello procede del módulo PLANO (longitudes y cotas) y de las pantallas de criterios de diseño hidráulico, donde se seleccionan las velocidades máxima y mínima de paso por las tuberías de agua y fangos, y el material y rugosidad de cada tubería y/o canal.

En lo que respecta a los sistemas de bombeo de agua y fangos, el usuario debe seleccionar el fabricante de las bombas y el número mínimo de bombas a instalar. DIHIDE optimiza la selección de la bomba proporcionando el modelo más adecuado y sus características de

funcionamiento.

El cálculo de las pérdidas de carga entre los elementos se realiza utilizando la fórmula de Colebrook para las tuberías y las clásicas expresiones del tipo  $K v^2/2g$  para los elementos singulares.

Una vez finalizados los cálculos hidráulicos, la distribución vertical de la ETAR queda perfectamente definida.

**EL MÓDULO BASMAQ**

Este módulo gestiona el mantenimiento de la base de datos relacional en la que se encuentra almacenada toda la maquinaria necesaria para el diseño de la ETAR. Se accede desde GENTAR seleccionando

Maquinaria.

BASMAQ permite introducir, borrar o modificar las características de cualquier elemento de maquinaria. En las Figuras 9 y 10 se muestran las pantallas sucesivas correspondientes a las bombas centrífugas.

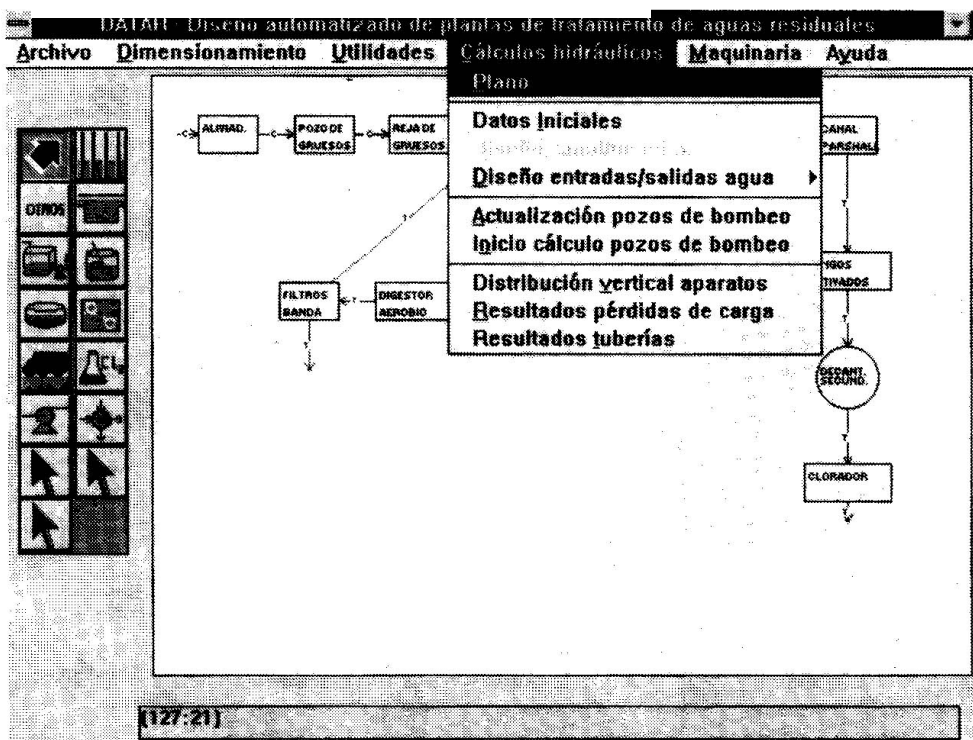


Figura 8. Ventana desplegable de entrada a DIHIDE

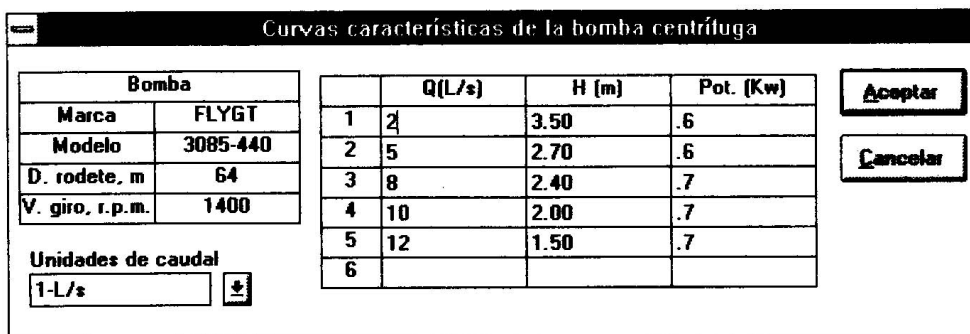


Figura 9 Ejemplo de primera pantalla de mantenimiento de bombas centrífugas



**TRATAMIENTO BIOLÓGICO POR FANGOS ACTIVADOS**

El tratamiento biológico constituye la parte fundamental del tratamiento de aguas residuales cuando lo que se pretende es obtener una eliminación importante de materia orgánica. De entre todos los posibles tratamientos biológicos, el de fangos activados es el más habitual siendo el único tratamiento biológico implementado hasta el momento en DIETAR.

En el tratamiento biológico por fangos activados el agua a tratar se pone en contacto con microorganismos que degradan la materia orgánica (heterótrofos), produciendo tejido celular. Para conseguir la degradación de la materia orgánica es necesario mantener una concentración de O<sub>2</sub> disuelto en el tanque del orden de 2 mg/L, lo que se consigue con una maquinaria de aireación/agitación adecuada.

El modelo utilizado para este elemento considera el efecto del tratamiento sobre todos los contaminantes anteriormente enunciados: DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, NKT, NT, PT, SSV, y SSVB. Además el modelo tiene en cuenta la recirculación de nutrientes desde la digestión biológica de fangos, considerando la cantidad y especiación química como una función de los parámetros de diseño de dicha digestión. Estas características le permiten diseñar con la seguridad de satisfacer la legislación vigente.

El diseño de este elemento se realiza tomando como parámetros de diseño la carga másica y la concentración de SS en el tanque (X<sub>T</sub>). La carga másica representa la relación existente entre la carga orgánica alimentada al reactor y los microorganismos presentes en él. Dada la dificultad de cuantificar los microorganismos, suele definirse como:

$$C_m = \frac{\text{Kg de DBO}_5 \text{ entrantes en el tratamiento}}{\text{Kg de SSV en el reactor día}} \quad (1)$$

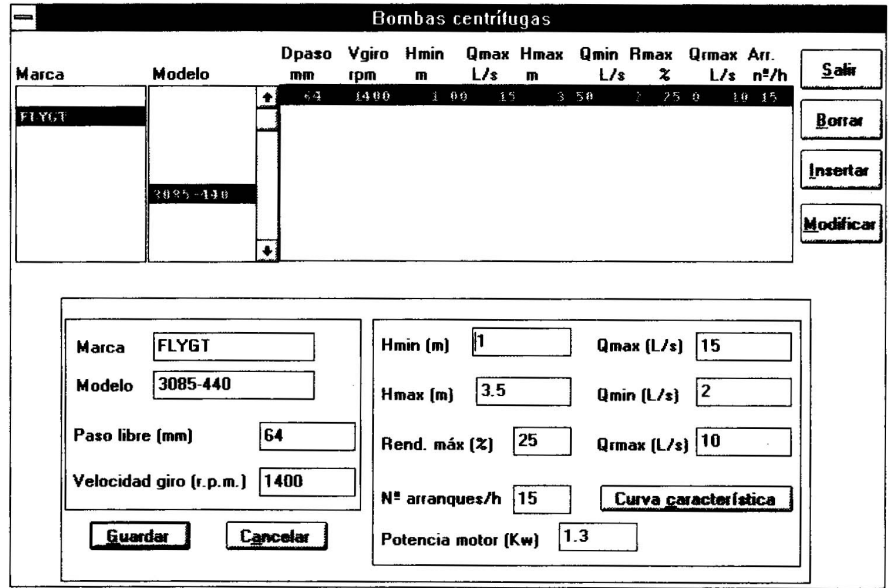


Figura 10. Ejemplo de segunda pantalla de mantenimiento de bombas centrífugas

Tabla 2. Clasificación de los procesos de fangos activados en función de la carga másica

| Proceso                                | C <sub>mT</sub> (Kg DBO <sub>5</sub> /Kg SST.día) | X <sub>T</sub> (Kg SST/m <sup>3</sup> ) |
|--|---|---|
| Alta carga                             | 1.5 - 2.3   | 2.5 - 4.5                               |
| Convencional                           | 0.2 - 0.6   | 4 - 10                                  |
| Aireación prolongada u Oxidación total | ≤ 0.12  | 3 - 6                                   |

Generalmente, por razones de sencillez, la carga másica se refiere a los sólidos suspendidos totales (SST) en el reactor (en vez de los SSV), ya que éstos son más fáciles de determinar que los volátiles. En el diseño del proceso de fangos activados se utilizará este último criterio, más operativo, tomándose la notación C<sub>mT</sub>.

Las condiciones de operación de numerosas ETAR han mostrado que la sedimentación adecuada de los fangos biológicos en el decantador secundario sólo se produce dentro de unos intervalos de carga másica, lo que ha conducido a clasificar el proceso de fangos activados en función de este parámetro. Dicha clasificación se muestra en la Tabla 2 en la que se han incluido, asimismo, los valores medios de la concentración de SST en el reactor (X<sub>T</sub>).

La oxidación total se utiliza preferentemente en plantas pequeñas (generalmente entre 1.000 y 15.000 habitantes) en las que el mayor consumo de energía asociado al equipo de aireación que conlleva este proceso es compensado por la mayor simplicidad de

explotación y gestión, puesto que se elimina la mayor parte de la línea de tratamiento de fangos. El proceso convencional o media carga se utiliza preferentemente para poblaciones de tamaño superior a los 15.000 habitantes, compensando la mayor complejidad de explotación y gestión con el menor coste de energía. El proceso de alta carga sólo se utiliza para tratar algunas aguas residuales industriales con muy elevada carga.

**Diseño para eliminación conjunta de materia orgánica y nitrificación**

La nitrificación es el proceso de oxidación del NKT presente en el agua residual a nitrato por unos microorganismos denominados nitrificantes (autótrofos). Es importante resaltar que la nitrificación puede producirse en cualquiera de los procesos de fangos activados citados, siempre y cuando se mantengan las condiciones de temperatura, oxígeno disuelto, etc. adecuadas para el crecimiento de los microorganismos nitrificantes. De hecho la nitrificación siempre tiene lugar en un proceso de fangos activados en mayor o menor medida.

En DIETAR se efectúa el cálculo simultáneo de eliminación de materia orgánica y nitrificación, teniendo en cuenta todas las variables involucradas, lo que supone una ventaja importante respecto los métodos habituales de cálculo. En climatologías como la española, con elevadas temperaturas en verano, la nitrificación completa es la norma, no la excepción. No considerarlo lleva a infravalorar las necesidades de oxígeno de la instalación lo cual puede provocar problemas en la explotación de la ETAR.

En la Figura 11 se muestra un esquema de reactor de fangos activados, detallándose a continuación la notación utilizada en el modelo matemático.

- V: Volumen del reactor, m<sup>3</sup>.
- S<sub>0</sub>: DBO<sub>5</sub> en el influente, g/m<sup>3</sup>.
- S: DBO<sub>5</sub> en el reactor y efluente del mismo, g/m<sup>3</sup>.
- NH<sub>0</sub>: NKT en el influente, incluyendo el aporte de los sobrenadantes, g/m<sup>3</sup>.
- NH: NKT en el reactor y efluente del mismo, g/m<sup>3</sup>.
- X: Microorganismos en el reactor y efluente del mismo, g/m<sup>3</sup>.
- X<sub>r</sub>: Microorganismos en la recirculación, g/m<sup>3</sup>.
- X<sub>0</sub>: Microorganismos en el influente, g/m<sup>3</sup>.
- f<sub>N</sub>: Fracción de microorganismos autótrofos.
- X<sub>v</sub>: SSV (microorganismos más SSV no biodegradables) en el reactor y efluente del mismo, g/m<sup>3</sup>.
- X<sub>T</sub>: SST en el reactor y efluente del mismo, g/m<sup>3</sup>.
- X<sub>Tr</sub>: SST en la recirculación, g/m<sup>3</sup>.
- Z<sub>i</sub>: sólidos suspendidos no volátiles (SSNV) en el influente, g/m<sup>3</sup>.
- Z<sub>n</sub>: SSV no biodegradables en el influente (SSVNB), g/m<sup>3</sup>.

Se establecen las siguientes hipótesis de cálculo:

- 1) No existen microorganismos en las aguas residuales sin tratar; X<sub>0</sub> = 0.
- 2) No se produce actividad microbiana en el clarificador y conducciones.
- 3) Se consigue una mezcla completa en el tanque de aireación.
- 4) Se consiguen unas condiciones estables en todo el sistema

El criterio utilizado para el cálculo del proceso de fangos activados es el basado en el control de la carga másica..

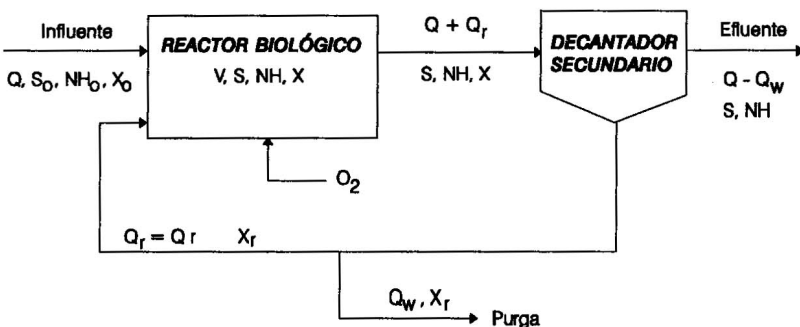


Figura 11. Esquema de reactor de fangos activados con recirculación

- Q: Caudal influente, m<sup>3</sup>/día.
- Q<sub>r</sub>: Caudal recirculado, m<sup>3</sup>/día.
- Q<sub>w</sub>: Caudal de fangos purgados, m<sup>3</sup>/día.

Fijada la carga másica, es necesario establecer la concentración de sólidos (SST ó SSV) en el reactor, para que el diseño quede definido. En el proceso de cálculo que se desarrolla a continuación se ha fijado el valor de los SST.

Para proceder al diseño del proceso de fangos activados con nitrificación DIETAR precisa de tres bloques de información. El primero de ellos lo constituyen las características de caudal (Q) y concentraciones (DBO<sub>5</sub> (S<sub>0</sub>), NKT (NH<sub>0</sub>), SSNV (Z<sub>i</sub>), SSVNB (Z<sub>n</sub>)) del influente. Cabe destacar que los valores de S<sub>0</sub> y NH<sub>0</sub> considerados por DIETAR incluyen el aporte debido a los sobrenadantes de la digestión de fangos, lo que permite un diseño mucho más ajustado del proceso.

El segundo bloque de información lo constituyen los criterios de diseño: carga másica total ( $C_{mT}$ ) y concentración de SST ( $X_T$ ). DIETAR selecciona estos valores por defecto en función del proceso elegido y los elementos presentes en la línea de agua y fangos. El usuario puede, en cualquier caso, seleccionar valores distintos.

Por último, DIETAR precisa de los valores de las constantes cinéticas de degradación biológica de la materia orgánica y del NKT. Dichas constantes cinéticas son:

- $\mu_m$ : tasa máxima de crecimiento específico de los microorganismos heterótrofos,  $d^{-1}$ .
- $Y$ : masa de microorganismos heterótrofos formados por masa de  $DBO_5$  consumida.
- $K_s$ : constante de velocidad mitad de los microorganismos heterótrofos,  $g\ DBO_5/m^3$ .
- $K_d$ : fracción de microorganismos heterótrofos que por unidad de tiempo se consume en respiración endógena y muerte,  $d^{-1}$ .
- $\mu_{mN}$ : tasa máxima de crecimiento específico de los microorganismos autótrofos,  $d^{-1}$ .
- $Y_N$ : masa de microorganismos autótrofos formados por masa de amonio consumido.
- $K_{NH}$ : constante de velocidad mitad de los microorganismos autótrofos,  $g\ NKT/m^3$ .
- $K_{dN}$ : fracción de microorganismos autótrofos que por unidad de tiempo se consume en respiración endógena y muerte,  $d^{-1}$ .

Para aguas residuales urbanas se ha efectuado una revisión bibliográfica (IAWPRC, 1986; Ramalho, 1990), así como una recopilación y análisis de datos de ETAR en funcionamiento que han permitido establecer como expresiones de los parámetros cinéticos anteriores las que aparecen recogidas en la Tabla 3.

Para aguas residuales distintas de las urbanas, los valores correspondientes a los parámetros cinéticos deben introducirse en la fase de asignación de criterios de diseño.

Con la información anterior, DIETAR determinan el volumen del reactor, la calidad del efluente y fangos producidos, y las condiciones de operación.

**Tabla 3.** Expresiones de los parámetros cinéticos del proceso de fangos activados para aguas residuales urbanas

| Parámetro  | Expresión                                       | Unidades       |
|------------|---|----------------|
| $\mu_m$    | $4.0\ 1.02^{(T-20)}$                            | $d^{-1}$       |
| $Y$        | $0.614\ (\theta_c + 1)^{-0.012}\ 0.99^{(T-20)}$ |                |
| $K_d$      | $0.062\ (\theta_c + 1)^{0.15}\ 1.04^{(T-20)}$   | $d^{-1}$       |
| $K_s$      | $60.0\ 0.98^{(T-20)}$                           | $g\ DBO_5/m^3$ |
| $\mu_{mN}$ | $0.5068\ 1.103^{(T-20)}\ OD/(1.3+OD)$           | $d^{-1}$       |
| $Y_N$      | $0.01\ T$                                       |                |
| $K_{dN}$   | $0.05$  | $d^{-1}$       |
| $K_{NH}$   | $10\ (0.051\ T - 1.158)$                        | $g\ NKT/m^3$   |

$T$ : temperatura en  $^{\circ}C$   
 $\theta_c$ : tiempo de retención celular en días  
 $OD$ : Oxígeno disuelto en  $g/m^3$

A continuación se describen las ecuaciones que definen el proceso cuando se fija la concentración de SST ( $X_T$ ).

**Volumen del reactor**

El volumen del reactor se obtiene de la propia definición de  $C_{mT}$ :

$$V = \frac{QS_o}{C_{m_r} X_T} \tag{2}$$

**$DBO_5$  soluble en el efluente**

Para representar la eliminación de sustrato en tanques de mezcla completa se utiliza la expresión de Lawrence y Mc. Carty, quedando el balance de  $DBO_5$  como:

$$\frac{Q(S_o - S)}{V} = \frac{\mu_m(1 - f_N)XS}{Y(K_s + S)} \tag{3}$$

**NKT soluble en el efluente**

La ecuación a plantear es formalmente idéntica a la anterior, utilizando los parámetros cinéticos correspondientes al crecimiento de los microorganismos nitrificantes:

$$\frac{Q(NH_o - NH)}{V} = \frac{\mu_{mN} X f_N NH}{Y_N (K_{NH} + NH)} \tag{4}$$

**Producción de microorganismos**

El crecimiento neto de la biomasa heterótrofa ( $Q\Delta X_s$ ) y autótrofa ( $Q\Delta X_n$ ) viene dado por las siguientes expresiones:

**Heterótrofos :**

$$Q \Delta X_S = Y Q (S_o - S) - K_d V X (1 - f_N) \quad (5)$$

**Autótrofos :**

$$Q \Delta X_N = Y_N Q (NH_o - NH - K_{dN} V X f_N) \quad (6)$$

donde el primer término del segundo miembro representa la biomasa formada y el segundo término, la biomasa consumida por respiración endógena y muerte celular.

El balance total de microorganismos será la suma de (5) y (6):

$$\text{Total} : Q \Delta X = Q \Delta X_S + Q \Delta X_N \quad (7)$$

### Fangos totales

Los fangos totales a la salida del proceso biológico vienen dados por la suma de los microorganismos autótrofos y heterótrofos producidos más las fracciones no biodegradables de los SST que se introducen en el reactor, y que por su carácter no biodegradable pasan inalterados por el sistema. Estas son, los sólidos suspendidos no volátiles y los volátiles no biodegradables.

$$Q \Delta X_T = Q \Delta X + Q Z_i + Q Z_n \quad (8)$$

### Tiempo de retención celular

Un parámetro asociado a la carga másica es el denominado tiempo de retención celular  $\theta_c$ , definido como el tiempo medio que los microorganismos permanecen en el proceso. El tiempo de retención celular se puede expresar en función de los SST, o de los microorganismos autótrofos, o de los heterótrofos o de los microorganismos totales:

$$\theta_c = \frac{V X_T}{Q \Delta X_T} = \frac{V X}{Q \Delta X} = \frac{V X (1 - f_N)}{Q \Delta X_S} = \frac{V X f_N}{Q \Delta X_N} \quad (9)$$

De la última igualdad, teniendo en cuenta las ecuaciones que representan la producción de microorganismos heterótrofos y autótrofos respectivamente (ecs. (5) y (6)), se obtiene:

$$Y \frac{(S_o - S)}{\theta X (1 - f_N)} - K_d = Y_N \frac{(NH_o - NH)}{\theta X f_N} - K_{dN} \quad (10)$$

### Microorganismos en el reactor

De la definición del tiempo de retención celular (ecuación 9), la concentración de microorganismos en el reactor (X) queda:

$$X = X_T \frac{Q \Delta X}{Q \Delta X_T} \quad (11)$$

habiendo sido  $X_T$  asignada previamente como criterio de diseño.

Las ecuaciones (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10) y (11), junto con las expresiones de los parámetros cinéticos dependientes del tiempo de retención celular ( $Y$  y  $K_d$ ) constituyen un sistema no lineal de 11 ecuaciones y 11 incógnitas, que debe ser resuelto iterativamente. Tras su resolución se conocen los valores de  $S$ ,  $NH$  y los fangos producidos con sus características.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones anterior, se obtienen las concentraciones totales y las concentraciones disueltas de DQO, NT, PT, la relación de recirculación ( $r$ ), las necesidades de oxígeno ( $M_{O2T}$ ) y los requisitos de nutrientes.

### Concentraciones de salida de los distintos contaminantes

La comprobación de la eficacia del tratamiento biológico debe hacerse en base a las concentraciones totales de contaminantes en el efluente. Dichas concentraciones totales vendrán dadas por la suma de las concentraciones disueltas y las asociadas a la materia suspendida. La fracción asociada a la materia suspendida es la presente en los SS no eliminados en el decantador secundario. Esta cantidad de SS ( $M$ ) viene fijada por las condiciones de vertido, normalmente al valor establecido en la legislación vigente. Así se tiene:

#### ■ Concentraciones disueltas:

$$DBO_{5s} = S$$

$$DQO_s = DQO_{os} - (S_{os} - S) f_s$$

siendo:

$DQO_{os}$ : DQO soluble que entra al tanque de aireación.

$S_{os}$ : DBO<sub>5</sub> soluble que entra al tanque de aireación.

$f_s$ : relación DBO<sub>L</sub>/DBO<sub>5</sub> (1.47 para aguas residuales urbanas)

$DBO_L$ : DBO para tiempo infinito  $\approx$  DBO<sub>20</sub>  
NKT<sub>s</sub> = NH

Las concentraciones disueltas de nutrientes (N y P) se estiman en función de las concentraciones totales introducidas en el reactor biológico y de las cantidades asimiladas por los microorganismos para su crecimiento. Teniendo en cuenta que el fango activado contiene aproximadamente un 12% de su peso seco como N y un 2% como P, las cantidades eliminadas del agua residual debido al crecimiento de microorganismos serán, respectivamente 0.12 Q $\Delta$ X y 0.02 Q $\Delta$ X, quedando las concentraciones disueltas como:

$$NT_s = NT_o - 0.12 Q \Delta X$$

$$PT_s = PT_o - 0.02 Q \Delta X$$

dónde:

$NT_o$  y  $PT_o$  representan, respectivamente, el nitrógeno y fósforo total que entra al tanque de aireación, incluyendo el asociado a los sobrenadantes.

■ Concentraciones totales:

$$DBO_{ST} = S + M1.42 Q\Delta X / Q\Delta X_T / f_s$$

donde 1.42 es la DBO<sub>L</sub> equivalente por unidad de masa de microorganismos.

$$DQO_T = DQO_s + M1.42 Q\Delta X / Q\Delta X_T$$

$$NKT_T = NH + M0.12 Q\Delta X / Q\Delta X_T$$

$$NT_T = NT_s + M0.12 Q\Delta X / Q\Delta X_T$$

$$PT_T = PT_s + M0.02 Q\Delta X / Q\Delta X_T$$

Como ya se ha indicado, estos últimos valores son los que deberán ser inferiores a los límites de vertido establecidos para que el diseño sea correcto. DATAR a través de GENTAR informa del cumplimiento o no de esta restricciones. Si las restricciones al vertido no se cumplen el usuario podrá modificar los criterios de diseño hasta conseguir su cumplimiento.

**Relación de recirculación**

La relación de recirculación entre el decantador secundario y el reactor de fangos activados se obtiene efectuando un balance de SST entre la entrada y la salida del reactor, obteniéndose finalmente:

$$r = (1 - \frac{\theta}{\theta_c}) \frac{X_T}{X_{rT} - X_T} \quad (12)$$

El valor de X<sub>rT</sub> que figura en la ec. (12) son los SST que se obtienen del decantador secundario. La concentración de los mismos depende de la forma en que se lleve la explotación de la planta (forma de extracción periódica o continua, etc.) o bien de la sedimentabilidad de los mismos. DATAR suministra unos valores por defecto en función de las características de las líneas de agua y fangos; estos valores pueden ser modificados por el usuario.

**Necesidades de oxígeno**

Las necesidades de oxígeno vienen dadas por la suma del O<sub>2</sub> necesario para los procesos de eliminación de materia orgánica y nitrificación, siendo respectivamente:

$$MO_{2S} = Q(S_0 - S) a' + Vb' X (1 - f_N) \quad (13)$$

$$MO_{2N} = 4.57 [Q(NH_0 - NH) \cdot 10^{-3} - 0.12 \cdot Q\Delta X] \quad (14)$$

y las necesidades totales:

$$MO_{2T} = MO_{2S} + MO_{2N} \quad (15)$$

donde:

a': fracción de la materia orgánica bruta que se utiliza en la respiración y por tanto proporciona energía para el resto de los procesos celulares. Se puede estimar como f<sub>s</sub> - Y - 1.42

b': DBO<sub>L</sub> ejercida en la degradación de la fracción anterior. Su valor es 1.42 K<sub>d</sub>.

Las necesidades de oxígeno se calculan para condiciones de operación a caudal medio y a caudal punta. El equipo de aireación deberá diseñarse para suministrar el oxígeno requerido en las condiciones de caudal punta, si bien sus condiciones normales de operación serán las correspondientes al caudal medio.

**Requisitos de nutrientes**

Para el proceso biológico de degradación de residuos es necesaria la presencia de ciertos nutrientes (N, P, Ca, Mg, etc). La mayoría de los nutrientes son necesarios en cantidades traza y suelen estar presentes en las aguas residuales. Sin embargo, muchas aguas residuales industriales son deficitarias en N y P, siendo necesaria la adición de ambos componentes.

Una estimación de las cantidades necesarias de estos nutrientes se puede realizar a partir del contenido en ambos componentes en el fango activado (2% de su peso seco como P y un 12% como N) y de las concentraciones mínimas de N y P a mantener en el agua, que se estiman normalmente como 1.0 y 0.5 mg/L respectivamente. Por lo tanto, las cantidades necesarias en Kg/día son:

$$\text{Nitrógeno} : 0.12 Q \Delta X + Q \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

$$\text{Fósforo} : 0.02 Q \Delta X + Q \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

Las cantidades de N y P disponibles pueden calcularse directamente a partir de los valores de NH<sub>0</sub> y PT<sub>0</sub>.

**Determinación de las dimensiones del tanque y la maquinaria de aireación**

Conocido el volumen necesario y fijado el tipo y marca de los sistemas de aireación, DIETAR selecciona de la base de datos de maquinaria el sistema de aireación capaz de suministrar el oxígeno necesario, con la menor potencia instalada. En base a las características de la maquinaria se reajustan las dimensiones del tanque de aireación, siguiéndose un proceso iterativo hasta adecuar las dimensiones del tanque a las de la maquinaria utilizada.

**DIGESTIÓN DE FANGOS**

La digestión de los fangos biológicos procedentes de la depuración de las aguas residuales presenta dos objetivos básicos:

- Producir un producto estable que pueda ser llevado a vertedero controlado o bien ser vertido sobre el terreno.
- Reducir la masa y el volumen que debe verterse.

La digestión de los fangos biológicos puede llevarse a cabo de forma aerobia o anaerobia. La digestión aerobia efectúa las dos funciones indicadas mediante

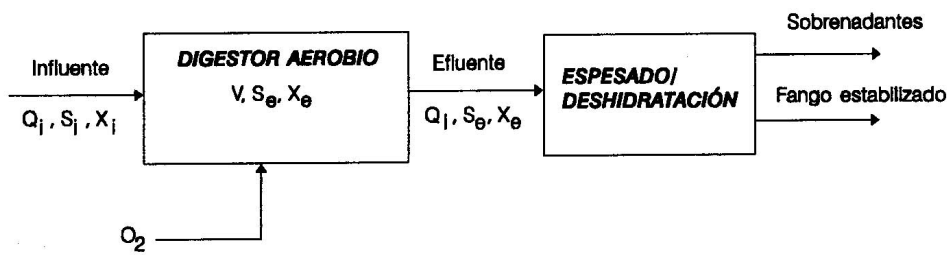


Figura 12. Esquema de reactor de digestión aerobia de fangos

microorganismos aerobios y facultativos, usando oxígeno y obteniendo energía de la materia orgánica biodegradable y de la degradación del protoplasma celular. Los productos finales de esta digestión son dióxido de carbono, agua y materias no degradables. En este proceso se produce también la oxidación de parte del amoníaco a nitratos. En la digestión anaerobia, la estabilización del fango tiene lugar mediante dos grupos de bacterias que actúan secuencialmente. El primer grupo transforma las sustancias orgánicas en ácidos y alcoholes, y el segundo convierte estos productos en metano y dióxido de carbono.

La digestión aerobia suele ser la operación seleccionada para ETAR de tamaño medio o pequeño (hasta 35000 habitantes) por su menor complejidad técnica y costo económico, mientras que la digestión anaerobia resulta más adecuada para plantas de mayor dotación.

A continuación se detalla el proceso de diseño de ambos tipos de digestión para el caso más general de tratamiento conjunto de fangos primarios (procedentes del decantador primario) y secundarios procedentes de un tratamiento de fangos activados.

En ambos casos, la información necesaria para el diseño del digestor es: calidad del influente (caudal, DBO<sub>5</sub>, concentración de microorganismos, fracción de fangos primarios a tratar y porcentajes de SSV y SSVB en el fango primario y secundario), el criterio de diseño (% SSV a la salida) y las expresiones de las constantes cinéticas de degradación de la materia orgánica.

Hasta el momento actual, el diseño de la digestión se ha venido realizando tomando como criterio de diseño el tiempo de retención hidráulico en el digestor, y presuponiendo un porcentaje de eliminación de SSV independientemente de las condiciones de operación y de la calidad del fango de entrada al proceso. Con el fin de garantizar la producción de un fango estabilizado de características adecuadas, con un contenido en sustancias volátiles determinado, se ha desarrollado un modelo tomando como criterio de diseño el porcentaje de SSV en el fango estabilizado. Para fangos procedentes del tratamiento de aguas residuales urbanas, un

porcentaje de SSV del 45-60% proporciona un fango estabilizado de características adecuadas para su deshidratación y disposición final. DIETAR comprueba que se puede alcanzar la condición prefijada en el criterio de diseño teniendo en cuenta

que únicamente será digerida la fracción biodegradable de los sólidos suspendidos volátiles.

El diseño proporciona el volumen del digestor, la calidad del fango estabilizado y del sobrenadante, y las condiciones de operación.

### Diseño de la digestión aerobia de fangos

En la Figura 12 se muestra el esquema de un proceso de digestión aerobia continua de fangos.

- Q<sub>i</sub>: caudal total de fangos que alcanza el tanque de digestión (m<sup>3</sup>/día).
- S<sub>i</sub>: concentración de DBO<sub>5</sub> en los fangos de entrada, excluida la asociada a los microorganismos procedentes del tratamiento secundario (g/m<sup>3</sup>).
- X<sub>i</sub>: concentración de microorganismos procedentes del tratamiento biológico en los fangos de entrada (g/m<sup>3</sup>).
- S<sub>e</sub>: concentración de DBO<sub>5</sub> en los fangos de salida (g/m<sup>3</sup>).
- X<sub>e</sub>: concentración de microorganismos en los fangos de salida (g/m<sup>3</sup>).

La digestión aerobia de fangos es realmente un proceso de fangos activados en régimen de oxidación total, siendo válidas las expresiones de variación de los parámetros cinéticos ( $\mu_m$ , Y, K<sub>d</sub>, K<sub>s</sub>) con la temperatura y el tiempo de retención celular expuestas en la descripción del tratamiento biológico por fangos activados (Tabla 3). Únicamente debe tenerse en cuenta que el tiempo de retención celular para el cálculo de los parámetros cinéticos en el digestor será la suma del correspondiente al tratamiento de fangos activado previo, si existe, y el de la propia digestión aerobia.

Los elevados tiempos de retención necesarios para la digestión permiten asegurar una completa nitrificación. En estas condiciones, se puede obviar el balance de microorganismos autótrofos, simplificándose el proceso de cálculo.

El fango introducido en el digestor presentará un contenido en SSV (Q<sub>A</sub>X<sub>v</sub>) igual a la suma de los volátiles biodegradables y no biodegradables presentes en el fango primario y secundario, esto es:

$$Q\Delta X_V = Q\Delta X_p + QZ_{np} + Q\Delta X + QZ_n \quad (18)$$

donde el subíndice p indica procedente del decantador primario, apareciendo los procedentes del tratamiento biológico sin subíndice.

El porcentaje de SSV en el fango estabilizado viene dado por:

$$SSV_e = \frac{QZ_{np} + QZ_n + Q_i X_e}{QZ_{np} + QZ_n + Q_i X_e + QZ_i + QZ_{ip}} 100 \quad (19)$$

donde  $QZ_i$  y  $QZ_{ip}$  representan, respectivamente, los sólidos suspendidos no volátiles (SSNV) procedentes del decantador primario y secundario respectivamente.

Una vez fijado como criterio de diseño el porcentaje de SSV ( $SSV_e$ ), de la ecuación (19) se obtiene directamente la concentración de microorganismos en el fango estabilizado ( $X_e$ ).

El porcentaje de eliminación de SSV ( $E_{SSV}$ ) se puede expresar en función de los SSV a la entrada y a la salida del digestor, esto es:

$$E_{SSV} = \frac{(Q\Delta X_p + QZ_{np} + Q\Delta X + QZ_n) - (Q_i X_e + QZ_{np} + QZ_n)}{Q\Delta X_p + QZ_{np} + Q\Delta X + QZ_n} 100 =$$

$$= \frac{Q\Delta X_V - (Q_i X_e + QZ_{np} + QZ_n)}{Q\Delta X_V} 100 \quad (20)$$

### Volumen del tanque de digestión y de la calidad del efluente

Para determinar el volumen del tanque de digestión y la calidad del fango estabilizado se plantea un balance de microorganismos en el tanque:

$$Q_i X_i - Q_i X_e = Q_i Y (S_i - S_e) - K_d X_e V \quad (21)$$

y un balance de DBO<sub>5</sub>, según la expresión de Lawrence y Mc. Carty:

$$\frac{Q(S_i - S_e)}{V} = \frac{\mu_m X_e S_e}{Y(K_s + S_e)} \quad (22)$$

Resolviendo conjuntamente las ecuaciones (21) y (22) se obtiene V y  $S_e$ .

### Tiempo de retención celular

El tiempo de retención celular, que coincide con el de retención hidráulica, viene dado por:

$$\theta_c = \theta = \frac{V}{Q_i} \quad (23)$$

### Calidad del sobrenadante

Tras la digestión aerobia, el nitrógeno y el fósforo presentes en los SSV eliminados quedan en el sobrenadante en forma de nitratos y fosfatos respectivamente. Para determinar la concentración de ambos nutrientes

en el sobrenadante, se puede admitir que primero serán eliminados los SSVB correspondientes a los fangos primarios, ya que la materia orgánica asociada a los fangos primarios es más fácilmente biodegradable que la de los secundarios. El cálculo de las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el sobrenadante se realiza, una vez conocida la cantidad de fango primario biodegradado y, en su caso, la de fango secundario, teniendo en cuenta que del fango primario biodegradado pasa al sobrenadante el NKT y PT asociado a ellos y del fango secundario biodegradado, un 12 % en forma de NKT y un 2 % en forma de PT.

### Necesidades de oxígeno

Las necesidades de oxígeno para la digestión aerobia, admitiendo nitrificación total, pueden aproximarse por la ecuación siguiente:

$$M_{O_2} = Q_i (S_i - S_e) a' + V b' X_e + 4.57 (QNKT_p + 0.12 Q_i (X_i - X_e)) \quad (24)$$

siendo  $QNKT_p$  la cantidad de NKT (g/día) presente en los fangos primarios que entran al tanque de digestión.

### Determinación de las dimensiones del tanque y la maquinaria de aireación

Al igual que para el tratamiento biológico por fangos activados, conocido el volumen necesario y fijado el tipo y marca de los sistemas de aireación, se selecciona de la base de datos de maquinaria el sistema de aireación capaz de suministrar el oxígeno necesario, con la menor potencia instalada, adaptando las dimensiones del tanque a dicho sistema de aireación.

### Diseño de la digestión anaerobia de fangos

El equipo para la digestión anaerobia de fangos consta de dos digestores. La digestión propiamente dicha se efectúa en el denominado digestor primario. Para que este proceso se produzca en un tiempo razonable es necesario mantener los fangos a una temperatura del orden de 35°C, para lo cual, el digestor primario se encuentra calefactado utilizándose parte del gas metano generado en el proceso como fuente de calor. En el segundo digestor, denominado secundario, se separan los fangos digeridos del sobrenadante.

Las ecuaciones que se desarrollan a continuación corresponden al caso más habitual de que el tratamiento biológico previo sea aerobio. En la digestión de estos fangos hay que tener presente que por una parte se produce una eliminación de SSV biodegradables, que incluyen los microorganismos aerobios procedentes del tratamiento biológico previo, y simultáneamente se generan microorganismos anaerobios.

En la Figura 13 se muestra un esquema de una instalación de digestión anaerobia de fangos con gasómetro.

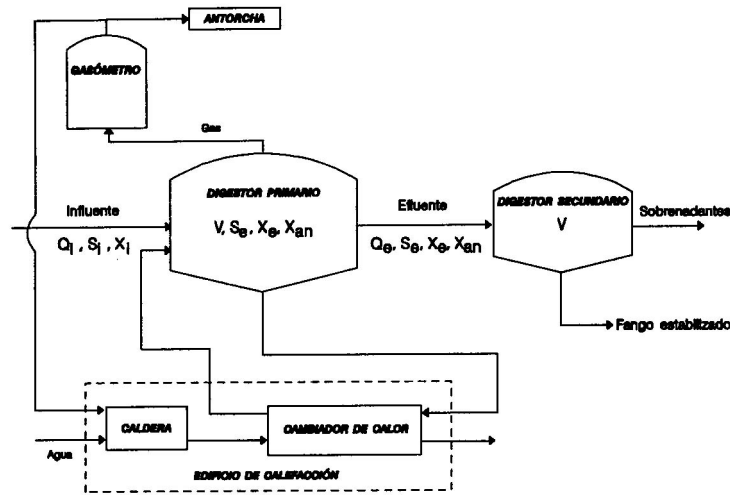


Figura 13. Esquema de un proceso de digestión anaerobia de fangos con gasómetro

El diseño de este tratamiento se realiza de forma muy similar a la digestión aerobia, estableciendo las condiciones necesarias para conseguir una concentración dada de SSV en el fango estabilizado. Además, la digestión anaerobia debe cumplir tres criterios de diseño adicionales: carga de SSV a la entrada, carga de SST a la entrada y un tiempo de retención celular mínimo, siendo los valores recomendados  $\leq 2 \text{ Kg/m}^3 \cdot \text{d}$ ,  $\leq 6 \text{ Kg/m}^3 \cdot \text{d}$  y  $> 10$  días, respectivamente.

En lo que respecta a las constantes cinéticas de degradación anaerobia de la materia orgánica, para fangos procedentes del tratamiento de un agua residual urbana, dentro del intervalo de temperaturas 10 - 35°C, pueden utilizarse las siguientes expresiones en función del tiempo de retención celular (días) y la temperatura (°C) (IAWPRC, 1986; Ramalho, 1990):

$$\mu_{man} = 0.097 \cdot 1.02^{(T-35)} \quad (25)$$

$$K_{an} = 1513 \cdot 0.899^{(T-35)} \quad (26)$$

$$Y_{an} = 0.06 (\theta_c + 1)^{-0.012} 0.99^{(T-35)} \quad (27)$$

$$K_{dan} = 0.0327 (\theta_c + 1)^{-0.01} 1.035^{(T-35)} \quad (28)$$

**Volumen del digestor primario y calidad del efluente**

El porcentaje de SSV a la salida de la digestión anaerobia, incluyendo los microorganismos anaerobios formados viene dado por:

$$SSV_e = \frac{QZ_{np} + QZ_n + Q_i X_e + Q_i X_{an}}{QZ_{np} + QZ_n + Q_i X_e + Q_i X_{an} + QZ_i + QZ_{ip}} 100^{(29)}$$

donde  $X_{an}$  representa la concentración de microorganismos anaerobios.

El porcentaje de SSV eliminados en el digestor ( $E_{SSV}$ )

vendrá dado por:

$$E_{SSV} = \frac{(Q\Delta X_p + QZ_{np} + Q\Delta X + QZ_n) - (Q_i X_e + Q_i X_{an} + QZ_{np} + QZ_n)}{Q\Delta X_p + QZ_{np} + Q\Delta X + QZ_n} 100 = \frac{Q\Delta X_V - (Q_i X_e + Q_i X_{an} + QZ_{np} + QZ_n)}{Q\Delta X_V} 100$$

Por motivos de cálculo, es conveniente definir la fracción eliminada de los SSV que entran al digestor ( $\alpha$ ), es decir, sin considerar los microorganismos anaerobios formados:

$$\alpha = \frac{E_{SSV} / 100 \cdot Q\Delta X_V + Q_i X_{an}}{Q\Delta X_V} \quad (31)$$

La concentración de microorganismos anaerobios,  $X_{an}$ , puede obtenerse del balance de sustrato ( $DBO_5$ ), quedando tras despejar  $X_{an}$ :

$$X_{an} = Y_{an} (S_i - S_e) / [1 - \frac{K_{dan} (K_{an} + S_e)}{\mu_{man} S_e}] \quad (32)$$

El balance de microorganismos anaerobios se expresa como:

$$-Q_i X_{an} = Q_i Y_{an} (S_i - S_e) - K_{dan} X_{an} V \quad (33)$$

El valor de la  $DBO_5$  del efluente del digestor primario ( $S_e$ ) se puede calcular a partir de la materia biodegradable no eliminada en la digestión, es decir, de los SSVB que quedan tras el proceso de digestión. Dado que la materia orgánica asociada a los fangos primarios es más fácilmente biodegradable que la de los secundarios, se puede admitir que se eliminará totalmente la correspondiente a los fangos primarios, y parcialmente la asociada a los fangos secundarios. Por lo tanto, la  $DBO_5$  del efluente será la correspondiente a la fracción no biodegradada del fango secundario:



$$S_e = DBO_{5sec} \frac{(Q\Delta X + Q\Delta X_p) - \alpha Q\Delta X_v}{Q\Delta X} \quad (34)$$

La resolución del sistema formado por las ecuaciones (29), (30), (31), (32), (33) y (34) junto con las expresiones que relacionan los parámetros cinéticos con el tiempo de retención celular permite obtener los valores del volumen, y calidad del efluente necesarios para conseguir la calidad del fango estabilizado fijada.

Como ya se ha indicado, en el diseño del digestor anaerobio se consideran además otros tres criterios de diseño (carga orgánica, carga de sólidos y tiempo de retención celular). Para cada uno de estos criterios, el cálculo del volumen del tanque es inmediato. De los cuatro volúmenes calculados se escoge el mayor y, si es necesario, se recalculan los valores de  $X_{an}$ ,  $S_e$  y el % de SSV eliminado con las ecuaciones anteriores.

#### Calidad del sobrenadante

Teniendo en cuenta que en la digestión anaerobia no se produce nitrificación, el contenido en nitrógeno y fósforo del sobrenadante corresponde, directamente, al nitrógeno, en forma de NKT, y al fósforo presente en los SSV eliminados.

#### Volumen del digestor secundario

El digestor secundario se diseña fijando el tiempo de retención, normalmente en 6 días.

#### Producción de gas

El gas producido en la digestión anaerobia es una mezcla de metano, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno, ácido sulfhídrico y oxígeno. Su densidad relativa respecto del aire es de 0.86.

El gas con interés energético es el metano. El caudal de metano generado durante la digestión anaerobia de los fangos viene dado por la expresión siguiente:

$$Q_{CH_4} = 0.35 Q_i \left( \frac{S_i - S_e}{0.65} - 1.42 X_{an} \right) 10^{-3} \quad (35)$$

donde:

- $Q_{CH_4}$ : metano producido en condiciones standard ( $m^3/d$ ).
- 0.35:  $m^3/d$  de  $CH_4$  producido por Kg de  $DBO_L$  eliminada.
- 0.68: factor  $DBO_5/DBO_L$

La proporción de metano en el gas oscila entre el 60 - 72 % en volumen. Conocido el caudal total de gas producido, se diseña el tanque de almacenamiento (gasómetro).

#### Selección de la maquinaria necesaria

La maquinaria asociada a un digestor anaerobio es bastante compleja ya que incluye numerosos elementos como son:

- Sistema de agitación de los digestores primarios.
- Caldera para producción de agua caliente.
- Intercambiador de calor agua-fangos.

- Campana gasométrica.
- Antorcha de quemado del metano excedentario.
- Trampas apagallamas en las tuberías de gas.

Una vez conocidas las condiciones de operación del sistema y elegidos los tipos y fabricantes de maquinaria, la selección de los equipos se realiza de manera automática para cumplir las especificaciones del proceso.

#### CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema informático para el diseño automatizado de tratamientos de aguas residuales. El sistema permite diseñar en un tiempo muy breve una Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR) con distintas configuraciones en cuanto al esquema de tratamiento, siendo posible así comparar fácilmente diferentes alternativas para el tratamiento de una agua residual. Esta versatilidad y flexibilidad se debe en gran medida a la implementación en el sistema de un módulo interactivo-gráfico para la comunicación con el usuario, y hace que el sistema DATAR sea una herramienta muy útil para establecer el esquema de tratamiento más adecuado, que garantice la adecuación de la calidad del vertido generado en la ETAR a las restricciones marcadas por la legislación o por otros condicionantes medioambientales específicos de los cauces receptores.

Durante la fase de selección de los sistemas de tratamiento, DATAR se comporta como un sistema experto proponiendo nuevos elementos de tratamiento en función de los previamente seleccionados. Así mismo recomienda criterios de diseño para cada uno de los elementos facilitando la labor del ingeniero.

El sistema permite un diseño completo y riguroso incluyendo todos los aspectos relacionados con:

- Dimensiones y maquinaria necesaria de todos los elementos de tratamiento de aguas residuales y fangos producidos y de conducción o impulsión de ambos.
- Disposición en planta y alzado de todos los elementos de tratamiento de aguas residuales y de conducción o impulsión de agua y fangos.
- Necesidades de potencia instalada y consumo de energía por unidad de maquinaria y total.

Para poder efectuar dicho diseño de forma rigurosa, los modelos matemáticos implementados en el sistema para describir los distintos procesos de tratamiento han sido desarrollados teniendo en cuenta como parámetros de calidad para los vertidos la  $DBO_5$ , DQO, SS, NKT, NT y PT, e incluyendo el efecto de la recirculación de los sobrenadantes del tratamiento de fangos a la línea de tratamiento de agua. De este modo, se puede diseñar la ETAR asegurando que el contenido en nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el vertido de la ETAR cumplirá las limitaciones impuestas, minimizando el riesgo de eutrofización en los cauces receptores.

Los modelos implementados para la descripción de los elementos de digestión de fangos representan una novedad destacable. En estos modelos se han introducido los parámetros SSV y SSVB, permitiendo el diseño riguroso de los digestores a partir de la expresión de los balances de materia considerando la fracción que será realmente biodegradada. El diseño se realiza fijando como criterio la calidad del fango estabilizado, esto es, su contenido máximo final en materia volátil susceptible de ocasionar problemas de malos olores en los puntos de disposición final del fango, garantizándose así la producción de un producto estabilizado adecuado para su evacuación de la ETAR.

## REFERENCIAS

- Bidstrup S.M. y C.P. Grady (1988). *SSSP-Simulation of Single Sludge Processes*, Journal Water Pollution Control Federation, 60, 3, pp 351-361.
- Chen G.K., L.T. Fan y L.E. Erickson (1972). *Computer Software for Wastewater Treatment Plant Design*, Journal Water Pollution Control Federation, 44, 5, pp 746-762.
- Crabtree H.E. y M.R. Rowell (1993). *Standardization of Small Wastewater Treatment Plants for Rapid Design and Implementation*, Water Science and Technology, 28, 10, pp 17-24.
- Dupont R. y M. Henze (1992). *Modeling of the Secondary Clarifier Combined with the Activated Sludge Model N° 1*, Water Science and Technology, 25, 6, pp 285-300.
- Eilers R.G., R. Smith, S.P. Graef y J.W. Male (1978). Short Course Proceedings. Applications of Computer Programs in the Preliminary Design. EPA-600, NITS-PB289497.
- Environment Canada (1974). Workshop on Computer Aided Design and Simulation of Waste Treatment Systems. Report n° EPS 6-WP-74-1.
- Gasso S., J.M. Baldasano y F. Gutierrez (1988). *SIMTAR: Systeme CAO pour les Usines de Traitement d'Eaux Residuelles*, Recent Progres en Genie des Procedes, 2, 6, pp 69-73.
- Gasso S. (1989). Desarrollo de un Sistema CAD/CAE para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Tesis Doctoral, Departament de Projects d'Enginyeria, Universitat Politecnica de Catalunya.
- Getty B., A.D. Koussis y F.L. Parker (1987). *CAD Comparisons for Wastewater Treatment Facilities*, Environmental Technology Letters, 8, 9, pp 405-418.
- Griffiths P. (1994). *Modifications to the IA WPRC Task Group General Activated Sludge Model*, Water Research, 28, 3, pp 657-664.
- IAWPRC Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (1986). Final Report: Activated Sludge Model. IAWPRC Scientific and Technical Reports N°1.
- James A. (1984). An introduction to Water Quality Modelling, John Wiley & Sons, 234 p.
- Kao J.J., E.D. Brill, J.T. Pfeffery J.J. Geselbracht (1993). *Computer Based Environment for Wastewater Treatment Plant Design*, Journal of Environmental Engineering (ASCE), 119, 5, pp 931-945.
- Keinath T.M. y M. Wanielista (1975). Mathematical Modeling for Water Pollution Control Processes, Ann Arbor Science, 446 p.
- Liaw S.L. y S.Y. Chang (1986). *Use of Microcomputers in the Preliminary Design of Wastewater Systems*, Environmental Software, 2, 1, pp 13-18.
- Morley D.A. (1979). Mathematical Modelling in Water and Wastewater Treatment, Applied Science Publishers, 366 p.
- Oles J. y P.A. Wilderer (1991). *Computer Aided Design of Sequencing Batch Reactors Based on the IA WPRC Activated Sludge Model*, Water Science and Technology, 23, 4-6, pp 1087-1095.
- Padukone N. y G.F. Andrews (1989). *A Simple Conceptual Mathematical Model for the Activated Sludge Process and its Variants*, Water Research, 23, 12, pp 1535-1543.
- Pineau M., P. Cote y J.P. Villeneuve (1985). *Estimation of Wastewater Treatment Cost: Evaluation of the CAPDET Model for Canadian Conditions*, Canadian Journal of Civil Engineering, 12, pp 483-493.
- Pons M.N., O. Potier, N. Roche, F. Colin y C. Prost (1993). *Simulation of Municipal Waste-Water Treatment Plants by Activated Sludge*, Computers & Chemical Engineering, 17, S, pp S227-S232.
- Ramalho R.S. (1990). Tratamiento de las Aguas Residuales, Ed. Reverte, 580 p.
- Rossmann L.A. (1979). Computer Aided Synthesis of Wastewater Treatment and Sludge Disposal Systems, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, 162 p.
- Rossmann L.A. (1980). EXEC/op Reference Manual. Version 1.2. Municipal Environmental Research Laboratory. Environmental Protection Agency.
- Shoemaker T.E. y W.A. Barkley (1977). *Interactive Computer Design of Wastewater Plants*, Journal of the Environmental Engineering Division (ASCE), 103, EE5, pp 919-934.
- Sheintuch M. (1993). *Multiplicity Patterns of Activated Sludge with Substrate Inhibition Kinetics*, Water Research, 27, 5, pp 929-938.
- Smith R. y R.G. Eilers (1968). *Executive Digital Computer Program for Preliminary Design of Wastewater Treatment Systems*, Water Pollution Control Series. WP-20-14, NTIS-PB 222765.
- Spinos M. y D. Marinoskouris (1992). *Integrated Computer Aided Process Design of Wastewater Treatment Plants on a PC System*, Water Science and Technology, 25, 1, pp 107-112.
- Stokes L., I. Takacs, B. Watsons y J.B. Watts (1993). *Dynamic Modelling of Activated Sludge Plants. A Case Study*, Water Science and Technology, 28, 11-12, pp 151-161.
- Tyteca D., Y. Sweers y E.J. Nyns (1977). *Mathematical Modeling and Economic Optimization of Wastewater Treatment Plants*, CRC Critical Reviews in Environmental Control, 8, 1, 89p.