

---

**TITULO: APLICACIÓN DEL SOFTWARE "DESSAS" EN ESTACIONES  
DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.****AUTOR PRINCIPAL: VIRGINIA ALARCÓN MARTÍNEZ****1. ANTECEDENTES**

Una afirmación trascendental que se estableció en la constitución de la organización mundial de la salud, ha sido la manifestación de que “el goce del grado máximo de salud que se pueda lograr, es uno de los derechos fundamentales de todo ser humano sin distinción de raza, religión, ideología política o condición económica y social” Para la OMS la salud es un estado de completo bienestar físico mental y social quedando fijado el nivel de salud por el grado de armonía que exista entre el hombre y el medio que sirve de escenario o de recurso a su vida.

La contaminación de las aguas es uno de los factores importantes que rompe esa armonía entre el hombre y su medio ambiente, precisándose en consecuencia luchar contra ella para recuperar el equilibrio necesario.

Para fijar la situación actual de la técnica de la depuración de aguas residuales, es necesario interpolar entre dos puntos. El primero situado en las primeras referencias históricas de las que se dispone y el segundo basado en los objetivos fijados actualmente por las administraciones gubernamentales para garantizar el bienestar social y la protección del medio ambiente.

En la Edad antigua, las aguas residuales discurrían a través de un canal de ladrillos situado en el interior del muro y cuya salida se disponía de forma tal, que el agua al bajar no salpicaba a los peatones. En Egipto, en relación con las instalaciones de elevación de agua, utilizaban ya un sistema de tornillo, cuyo descubrimiento se le atribuye a Arquímedes.

Este es hoy uno de los sistemas comúnmente empleados en el bombeo de las aguas residuales brutas en la entrada de las actuales estaciones depuradoras. (Muñoz, 1976).

Todo lo anterior es suficiente para señalar los antecedentes del problema y la preocupación del ser humano para eliminar residuos.

En contraste con todo lo anterior, pasemos a analizar las tendencias más avanzadas de los científicos y técnicos actuales.

Nos encontramos en una trayectoria que partiendo del año 1000 a DC con los balbuceos de una sedimentación de las aguas residuales (iniciación del tratamiento físico actual), pasa a los resultados actuales donde se apuesta por la regeneración de las aguas por procedimientos químico- sintéticos y por acción de los microorganismos.

Es conocido, que el problema actual, para dotar de la depuración necesaria a nuestros núcleos urbanos y a nuestras industrias, es principalmente de tipo económico. También se sabe que los efectos de la contaminación sobrepasan las barreras de la

industria aislada, de los barrios, de los municipios, de las provincias e incluso de las cuencas hidrográficas, para convertirse con los imprescindibles trasvases en ejecución y proyectos, en problemas a nivel nacional e incluso internacional.

Por otro lado, unos límites preestablecidos en los vertidos, con independencia de las características del cauce receptor, lleva en unos casos de vertidos importantes y de caudal receptor escaso, a unos valores absolutos de contaminación que en ningún caso son admisibles, pese a cumplirse las normas y , por el contrario, en cauces con caudales importantes, los vertidos de pequeñas poblaciones o de escasa importancia se ven atezados por unas condiciones que le señalan rendimiento fijo a su depuración y con fuertes inversiones económicas no respaldadas por la necesidad.

Centrándonos en las bases teóricas de los conocimientos actuales que rigen la tecnología de la depuración de las aguas residuales, con relación a las aguas residuales urbanas normales, se sabe que la contaminación queda integrada por una serie de productos inorgánicos y orgánicos, siendo estos los que realmente producen las perturbaciones más importantes.

Se sabe también que de forma natural, millones de microorganismos, utilizan para su alimentación la transformación de la materia orgánica de los residuos, siendo los elementos esenciales que garantizan la permanencia de la vida, manteniendo entre otros, los ciclos esenciales del nitrógeno y carbono.

Estos procesos, debidos a la actividad de los organismos, se conocen bajo la denominación de "metabolismo"

Puede decirse que el desarrollo normal de una depuración biológica estriba en la adecuada producción de las enzimas en el metabolismo de las células, por lo que es conveniente señalar aquí la existencia de factores que influyen sobre su actividad y que son determinantes en el proceso de depuración.

Es preciso, en actuaciones futuras, tener en cuenta ciertas consideraciones a lo largo del proceso de depuración de aguas residuales en función de la fase de tratamiento en la que nos encontremos. (Muñoz, 1976)

En una EDAR se suelen distinguir 4 etapas: pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

Una vez, definido la importancia del agua, y del proceso de depuración de las aguas residuales se va a realizar una aplicación con la disciplina matemática.

Un modelo matemático describe teóricamente un objeto que existe fuera del campo de las Matemáticas. Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí.

En un modelo matemático advertimos 3 fases:

1. La construcción, proceso en el que se convierte el objeto a lenguaje matemático.

- 2.El análisis o estudio del modelo confeccionado.
3. La interpretación de dicho análisis, donde se aplican los resultados del estudio al objeto del cual se partió.

La utilidad de estos modelos radica en que ayudan a estudiar cómo se comportan las estructuras complejas frente a aquellas situaciones que no pueden verse con facilidad en el ámbito real.

Puede decirse que los modelos matemáticos son conjuntos con ciertas relaciones ya definidas, que posibilitan la satisfacción de proposiciones que derivan de los axiomas teóricos. Para ello, se sirven de diversas herramientas, como pueden ser el álgebra lineal que, por ejemplo, facilita la fase de análisis, gracias a la representación gráfica de las distintas funciones.

En este estudio, se describen las principales características del programa "Dessas", así como sus posibles aplicaciones para representar los procesos biológicos que tienen lugar en las EDARs.

La elevada complejidad de los procesos biológicos que tienen lugar en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) así como su naturaleza dinámica hace necesario el uso de modelos matemáticos en el campo del tratamiento de aguas residuales.

Las principales aplicaciones de los modelos matemáticos se pueden resumir en cuatro puntos:

1. Los modelos matemáticos permiten representar los resultados obtenidos en el laboratorio o en investigaciones a escala piloto, predecir las tendencias observadas al modificar parámetros de operación y optimizar la planificación de experimentos.
- 2.Permiten diseñar nuevas EDARs y comprobar la influencia de variaciones en las condiciones de entrada y/o las condiciones de operación en la calidad del agua efluente así como de los fangos obtenidos.
- 3.Permiten probar estrategias de control y optimizar el funcionamiento de las plantas de tratamiento existentes.
- 4.Permiten interpretar los datos históricos de la planta, detectar posibles anomalías, sugerir las causas y proponer las modificaciones correspondientes.

El auge de la modelación en el campo de tratamiento de las aguas residuales comienza a principios de la década de los 80 cuando la IAWPRC (luego IAWQ y ahora IWA, International Water Association) formó un grupo de trabajo para revisar los trabajos de modelación de sistemas de fangos activados y desarrollar un modelo que incluyera los procesos de eliminación biológica de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación.

Como resultado del trabajo de este grupo se publicó en 1987 el Modelo de fangosactivados No. 1 (Activated Sludge Model No. 1, ASM1; Henze et al., 1987).

El ASM1 considera 2 grupos de bacterias (heterótrofas y autótrofas) y los procesos de nitrificación y eliminación biológica de materia orgánica en condiciones aerobias y anóxicas (desnitrificación).

Debido al éxito del modelo ASM1 y a la cantidad de artículos publicados al respecto de la eliminación biológica de fósforo, el grupo de trabajo de modelación matemática recibió el encargo de desarrollar un modelo de consenso capaz de predecir el funcionamiento de sistemas de fangos activados con eliminación biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo.

Como resultado de las deliberaciones del grupo de trabajo se publicó en 1995 el modelo de fangos activados No. 2 (Activated Sludge Model No. 2, ASM2; Henze et al., 1995).

Este modelo puede considerarse una extensión del ASM1 con los procesos de eliminación biológica de fósforo llevados a cabo por las bacterias acumuladoras de polifosfato (Polyphosphate Accumulating Organisms, PAO).

Ante los numerosos estudios que demostraban la capacidad de las bacterias PAO para crecer y tomar fósforo en condiciones anóxicas, el grupo de trabajo de modelación matemática publicó en 1999 el Modelo de fangos activados 2d (Activated Sludge Model No. 2d; ASM2d; Henze et al., 1999) incluyendo el proceso de desnitrificación llevado a cabo por las PAO.

Este modelo es el más utilizado en la actualidad para representar los procesos de eliminación biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Penya-Roja et al. (2002) desarrollaron una metodología para la calibración de los parámetros del modelo y comprobaron la capacidad de predicción de este modelo en sistemas de fangos activados con eliminación biológica de nutrientes.

Dado el éxito de estos modelos y la falta de un modelo universalmente aceptado para los procesos de digestión anaerobia, la IWA formó un grupo de especialistas en este tema con la finalidad de desarrollar un modelo consensuado.

Así, en 2002 se publicó el Modelo de digestión anaerobia No. 1 (Anaerobic Digestion Model No. 1, ADM1; Batstone et al., 2002).

Debido a la complejidad de todos estos modelos se hace necesario su implementación en programas informáticos para resolver los balances de materia planteados.

En la actualidad, existen diversos programas comerciales que tienen incorporado alguno o varios de los modelos anteriormente citados.

Entre los más conocidos se encuentran: GPSX ([www.hydr mantis.com](http://www.hydr mantis.com)), EFOR ([www.efor.dk](http://www.efor.dk)), BioWin ([www.envirosim.com](http://www.envirosim.com)), Simba ([www.ifaksystem.com](http://www.ifaksystem.com)) y WEST ([www.hemmiswest.com](http://www.hemmiswest.com)).

Durante los últimos años, diferentes grupos de investigación, como por ejemplo la Politécnica de Valencia vienen trabajando sobre un nuevo concepto de simulación de plantas de tratamiento basado en el uso de un único modelo para representar todos los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en las EDARs.

Fruto de este trabajo nació el modelo Biological Nutrient Removal Model No.1 (BNRM1, Seco et al. 2004) recientemente presentado a la comunidad científica.

El modelo BNRM1 ha sido implementado en el programa informático DESASS (DEsign and Simulation of Activated Sludge Systems), desarrollado por el grupo de investigación Calagua para su uso como herramienta de diseño, simulación y optimización de plantas de tratamiento.

## **2.INTRODUCCIÓN**

DESASS es un simulador de estaciones depuradoras de aguas residuales configurado bajo Windows, desarrollado y optimizado para el diseño y simulación de EDARs.

El simulador trabaja en un entorno intuitivo y permite evaluar una gran diversidad de sistemas de tratamiento, pudiéndose representar desde esquemas tan sencillos como un proceso de oxidación total para la eliminación de materia orgánica hasta esquemas de tratamiento mucho más complejos diseñados para la eliminación biológica de nitrógeno y fósforo en los que se incorporan los tratamientos de digestión de fangos

Diseñado para un rápido y fácil uso, el programa posee muchas herramientas que permiten la realización de análisis de sensibilidad y la comparación de múltiples condiciones de operación.

Las principales características de DESASS se enumeran a continuación:

1.Es capaz de diseñar, simular y optimizar estaciones de tratamiento en su globalidad, puesto que están considerados la mayoría de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en las EDARs.

2.Simula una gran variedad de configuraciones de plantas permitiendo fijar los volúmenes, dimensiones, caudales y concentraciones que van desde plantas de experimentación (piloto), hasta plantas de gran tamaño.

3.Calcula las dimensiones de los diferentes elementos de tratamiento y la calidad del agua y de los fangos obtenidos en condiciones estacionarias.

4.Permite la simulación dinámica de variaciones de cargas en régimen transitorio (variación de carga en el agua residual influente, modificaciones en los caudales de recirculación y/o purga...), pudiendo definir la situación inicial de las plantas.

5.Permite considerar varias líneas de tratamiento en serie o en paralelo, lo que le confiere una mayor flexibilidad al programa.

6. Es un programa multiejecutable, es decir se puede ejecutar varias veces al mismo tiempo, permitiendo una rápida comparación de las diferentes alternativas de operación simuladas.

7. Permite representar gráficamente, tanto en régimen estacionario como en régimen transitorio, la evolución de las variables involucradas en los distintos procesos de tratamiento. Entre éstas se incluyen las concentraciones en los diferentes elementos de tratamiento de los componentes considerados en el modelo, representando asimismo la variación en función de la altura en los decantadores primarios, secundarios y espesadores.

8. Facilita la comparación inmediata de resultados para condiciones de verano e invierno, en régimen estacionario.

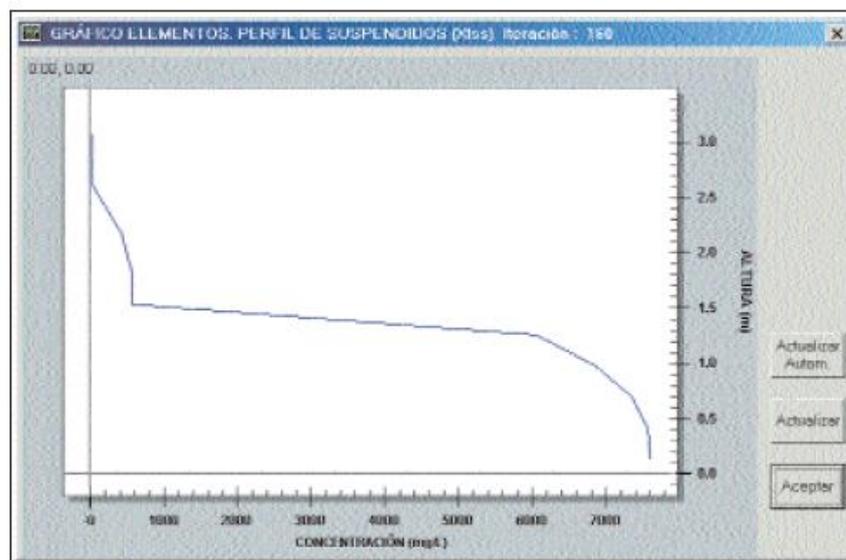


Fig. 1: Comparativa de resultados en régimen estacionario  
Fuente: [http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta\\_258\\_3\\_05.pdf](http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta_258_3_05.pdf)

9. Ofrece una gran rapidez en el cálculo numérico, tanto para régimen transitorio como estacionario.

10. Es capaz de diseñar los sistemas de aireación, mediante tres tipos de dispositivos (difusores, turbinas, venturi).

11. Incluye un módulo específico para la actualización de la base de datos de los sistemas de aireación.

12. Contiene un módulo de control de la concentración de oxígeno disuelto en reactores de fangos activados y digestores aerobios basado en lógica difusa.

13. Permite exportar los valores mostrados en las pantallas de resultados a una hoja de cálculo (en formato Microsoft Excel).

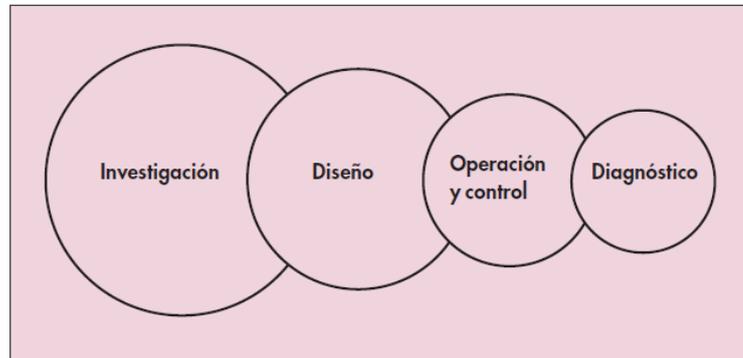


Fig. 2. Complejidad de los modelos según su finalidad  
Fuente: (Olsson y Newell, 1999)

En el presente estudio se van a trabajar la descripción de las características de la herramienta informática para el diseño, simulación y optimización de los procesos biológicos que tienen lugar en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) mediante una investigación no experimental.

### **3. METODOLOGÍA UTILIZADA**

#### **3.1. PROGRAMA DESASS**

El programa DESASS ha sido diseñado para funcionar bajo el sistema operativo Windows (en sus diferentes versiones), en una plataforma PC (ordenador personal compatible).

Los compiladores utilizados para el desarrollo del programa fueron el Visual Basic 6.0 y el Fortran Power Station (FPS) 4.0, ambos diseñados por Microsoft.

Mediante la selección del lenguaje Visual Basic se facilitó el uso de la filosofía Windows para el entorno donde se desarrolla el programa. Por otra parte, el programa FPS permitió el desarrollo de potentes subrutinas de cálculo numérico con la ayuda de las librerías de matemáticas IMSL contenidas en éste programa. El vínculo de las subrutinas compiladas en FPS con el lenguaje de programación Visual

Basic se llevó a cabo mediante la utilización de librerías enlazadas dinámicamente (DLL) que son características del entorno Windows.

Se ha aplicado básicamente la técnica de programación modular, que consiste en la división del programa en pequeños módulos que contienen y comparten procedimientos afines. De esta forma se hace una mejor gestión de la memoria RAM del ordenador debido a que los procedimientos de cada módulo sólo se utilizan en caso de que algún otro módulo lo requiera, en caso contrario permanecen sin valor alguno para el programa.

##### **3.1.1. VENTANA PRINCIPAL**

La comunicación con el usuario se realiza de una manera gráfica e interactiva a través de la ventana principal que se muestra una vez el usuario haya ejecutado el archivo DESASS.exe (Fig. 3). Se pueden ejecutar simultáneamente varios proyectos en diferentes ventanas principales de DESASS, con el fin de analizar de forma rápida y sencilla los resultados obtenidos con distintas alternativas (Windows administrará la memoria para ello).

En la ventana principal se encuentran dos zonas bien definidas, la primera es la zona gris, destinada para las opciones del proyecto y a la vez para los botones de rápido acceso, y la segunda es la zona amarilla destinada para la configuración del proyecto.

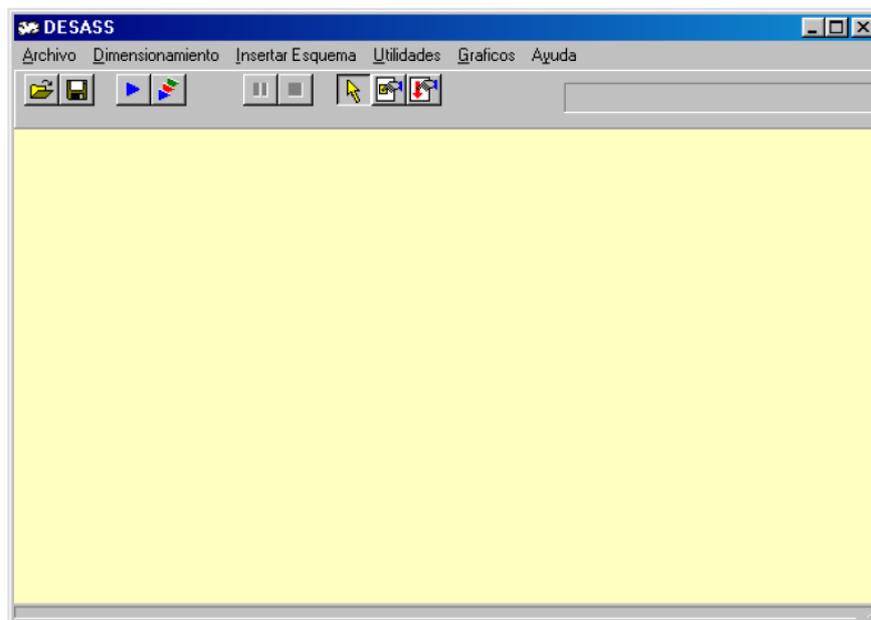


Fig.3: Ventana principal DESASS  
Fuente: Elaboración propia, 2016

**La ventana principal consta de los siguientes elementos:**

<p><b>Barra de título</b></p>	<p>Se encuentra en la parte superior de la ventana y en ella aparece el nombre del programa, junto con los botones de ajuste de tamaño de la ventana. Cuando se abre o se guarda un proyecto, aparece la ruta donde se encuentra el proyecto.</p>
<p><b>Ventana de trabajo</b></p>	<p>Es el área de color amarillo donde se construye el diagrama de flujo del esquema de tratamiento.</p>
<p><b>Barra de menú</b></p>	<p>Se encuentra bajo la barra de título y a través de ella el usuario indica las operaciones generales a efectuar por</p>

	DESASS.
<b>Línea de botones</b>	<p>Se encuentra bajo la barra de menú y facilitan la ejecución de las acciones.</p> <p>Los últimos dos botones sirven para la construcción del diagrama de flujo.</p>
<b>Contador</b>	<p>Está colocado en la parte derecha de la ventana principal, junto a la Línea de botones.</p> <p>En diseño muestra el número de iteraciones realizadas en el cálculo del estado estacionario, en simulación muestra el tiempo simulado (en formato,Días:Horas:Minutos:Segundos).</p>

Tabla 1.Elementos de la ventana principal

Fuente: Elaboración propia, 2016

### 3.1.2. BARRA DE MENÚ

La barra de menú está compuesta de las siguientes opciones:

**3.1.2.1.Archivo:** ejecutan las acciones relacionadas con el manejo de archivos de los proyectos que se van a construir o aquéllos que se van a recuperar.

<b>Nuevo</b>	Inicia un nuevo proyecto preguntando al usuario si desea abandonar el proyecto actual, pero antes llama a la acción Borrar pantalla.
<b>Borrar pantalla</b>	Borra el diagrama de flujo actual en la ventana de trabajo.
<b>Abrir</b>	Abre un proyecto recuperando los datos correspondientes a la última vez que se guardó el proyecto. La extensión del fichero principal del proyecto es.dsp. Existen otros ficheros con extensión .dat donde se almacenan los resultados necesarios para las representaciones gráficas.
<b>Guardar/Guardar como</b>	Graba un Proyecto. La ejecución de un proyecto por primera vez requiere que éste se guarde en un directorio. Los archivos .dat se almacenarán en ese directorio.
<b>Listados</b>	Permite exportar los resultados obtenidos en los distintos elementos de tratamiento a un archivo de Microsoft Excel (.xls).
<b>Salir</b>	Termina la ejecución del programa DESASS.

Tabla 2.Archivo

Fuente: Elaboración propia, 2016

**3.1.2.2. Dimensionamiento:** se ejecutan todas las acciones para el inicio del cálculo del proyecto. El cálculo del proyecto solo debe realizarse cuando se haya introducido el diagrama de flujo completo de la planta y se hayan asignado todas las propiedades a cada uno de los elementos del proyecto.

<p><b>Iniciar</b></p>	<p>Inicia los cálculos tanto en régimen estacionario (Diseño) como en régimen transitorio (Simulación) (esta función también se puede realizar desde el teclado mediante la tecla F5). Esta opción activa el algoritmo general de cálculo para todos los elementos (operaciones unitarias) que contiene el proyecto. Dicho algoritmo se ha diseñado para que cada elemento en particular sea resuelto como un módulo independiente. Una vez el cálculo se ha terminado, el usuario puede activar las ventanas de resultados para cada elemento con el botón derecho del ratón.</p>
<p><b>Iniciar paso a paso</b></p>	<p>Realiza las mismas funciones que la acción Iniciar pero una vez terminado el cálculo, muestra una a una las ventanas de resultados para cada elemento (esta función también se puede realizar desde el teclado mediante la tecla F6).</p>
<p><b>Maquinaria auxiliar</b></p>	<p>Esta acción ejecuta el módulo de maquinaria donde el usuario puede consultar o modificar los datos existentes para diversos tipos de maquinaria.</p>

Tabla 3. Dimensionamiento  
Fuente: Elaboración propia,2016

**3.1.2.3.** La opción **Insertar Esquema** permite al usuario la creación de aquellos es que mas más frecuentemente utilizados en los sistemas de fangos activados y de fermentación de fango primario evitando tener que colocar los elementos y las líneas de unión entre ellos.

Los esquemas de fangos activados que se pueden crear de esta forma incluyen desde el esquema típico para la eliminación de materia orgánica(1 único reactor aerobio)hasta esquemas diseñados para la eliminación de nitrógeno (Ludzack Ettinger modificado ,Bardenpho), fósforo(A/O) o ambos nutrientes (A2O y UCT).

Los esquemas de fermentación de fango primario que se pueden crear de esta forma contemplan la posibilidad de realizar la fermentación del fango primario en el propio decantador y/o en un fermentador y la elutriación de los ácidos en el decantador primario o en un espesador .

Una vez insertado el esquema el usuario debe definir las propiedades de cada uno de los elementos antes de proceder con el cálculo.

3.1.2.4. Desde la opción **Utilidades** se puede controlar la ejecución del proyecto actual.

Opciones:

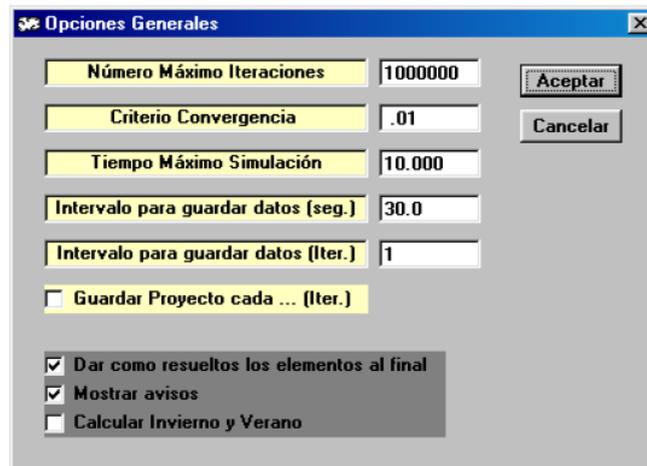


Fig.4. Pantalla de opciones generales  
Fuente: Elaboración propia, 2016

Opciones de cálculo: Desde esta opción se pueden establecer de forma global propiedades y opciones de cálculo para todos los elementos, sin necesidad de definir las para cada elemento en particular.

Así el usuario puede fijar condiciones de diseño o de simulación para todos los elementos (Poner todo en Diseño, Poner todo en Simulación), activar el cálculo del sistema de aireación en reactores y digestores aerobios así como el sistema de control (Calcular Aireación, Simulación con Control), activar el cálculo de la sedimentación en decantadores primarios, secundarios y espesadores (Calcular Sedimentación), y fijar la utilización de la solución anterior para el inicio de un nuevo cálculo (Utilizar Solución Anterior).

Ver: Permite al usuario conocer qué elementos de tratamiento se encuentran resueltos (Elementos Resueltos), cuáles se están resolviendo en ese instante (Elementos en Resolución), así como la estructura de resolución de cálculo utilizada por el programa (Estructura de los Bucles).

3.1.2.5. La opción **Gráficos** permite activar todas las acciones para la representación gráfica de cada una de las variables en los distintos elementos.

3.1.2.6. **Ayuda** permite el acceso a los archivos que contienen la ayuda general del programa. Ahí se explican las características más importantes de DESASS y se facilita el manejo del mismo.

### 3.1.3. LÍNEA DE BOTONES

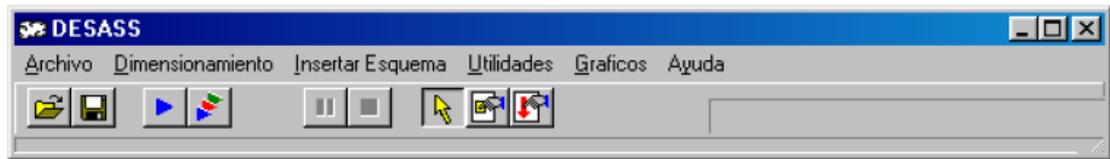


Fig.5. Línea de botones del programa

Fuente: Elaboración propia, 2016

Los dos primeros botones representan las acciones de abrir y guardar un proyecto, ya comentadas en el apartado anterior dentro de la opción Archivo.

Los dos siguientes representan las acciones de Iniciar Inicio paso a paso. Los botones situados debajo de la opción Insertar Esquema permiten interrumpir el cálculo y abortarlo respectivamente.

Los botones más importantes son los dos últimos a través de los cuales se configura el diagrama de flujo del esquema de tratamiento a calcular.

El diagrama de flujo es la representación lógica del sistema de tratamiento y contiene los elementos que representan a las diferentes operaciones unitarias.

Para cada elemento DESASS asigna una estructura de datos que sirve para el almacenamiento de la información necesaria para los cálculos relativos a dicho elemento. Los elementos están conectados mediante líneas de unión que contienen la información que se traslada de un elemento a otro y representan las corrientes de agua, fango, aire, entre otros.

Mediante esta forma de construcción de la planta, se ofrece una gran flexibilidad en la configuración con el fin de poder simular la mayoría de los esquemas utilizados en el campo del tratamiento de aguas residuales por medio de sistemas biológicos.

Para la introducción del diagrama de flujo de la planta es necesario que se utilicen los últimos dos botones cuyos respectivos nombres son Poner elementos y Unir elementos. Con estas dos acciones el usuario puede construir cualquier tipo de configuración de planta que necesite.

Pulsando el botón señalado en la fig.6 aparece otra línea de botones donde se esquematizan los diferentes elementos que están disponibles en el programa.

Acercando el puntero del ratón a cada botón aparece el nombre del elemento que representa.

Los elementos de tratamiento disponibles actualmente en el programa son: Decantador primario, Reactor de fangos activados, Decantador Secundario, Fermentador, Nudo, Espesador, Digestor Anaerobio, Depósito Tampón, Digestor Aerobio, Deshidratación Mecánica, añadir Reactivos y Soplante.

Una vez seleccionado el elemento deseado su colocación se realiza automáticamente al activar la ventana de trabajo (zona amarilla) mediante el botón izquierdo del ratón.



Fig.6. Línea de botones con los distintos elementos de tratamiento disponibles  
Fuente: Elaboración propia, 2016

Pulsando el botón señalado en la fig. 7 aparece otra línea de botones donde se esquematizan las diferentes uniones que están disponibles en el programa.

Acercando el puntero del ratón a cada botón aparece el nombre de la unión que representa.

Las uniones existentes son:

Entrada de Agua, Línea de Agua, Línea de Fango, Línea de Sobrenadante, Línea de Aire, Línea de Gas, Recirculación de Fango, Recirculación de Agua, Salida de Agua, Salida de Fango, Salida de Gas.

Para unir los elementos de tratamiento hay que seleccionar la línea deseada y activar el elemento de partida de dicha línea y el elemento de llegada (si es el caso).

El diagrama de flujo puede modificarse en cualquier momento en el que no se esté llevando a cabo ningún cálculo. Las modificaciones que se pueden hacer al diagrama de flujo se resumen a continuación:

Agregar nuevos elementos o uniones según el procedimiento explicado anteriormente.

Cambio de posición de un elemento o de una línea de unión mediante el arrastre del ratón.

Borrar un elemento o una línea de unión. Para ello se deberá seleccionar el objeto con el ratón (el borde cambia a color rojo) y posteriormente pulsar la tecla Suprimir del teclado. Cuando se elimina un elemento el programa automáticamente borra todas las líneas de unión que parten o llegan a este elemento.

Una vez configurado el proyecto, el usuario deberá definir las características del agua de entrada y asignar las propiedades a cada elemento.

Para ello se debe activar el botón izquierdo del ratón sobre la flecha de entrada y sobre los distintos elementos.

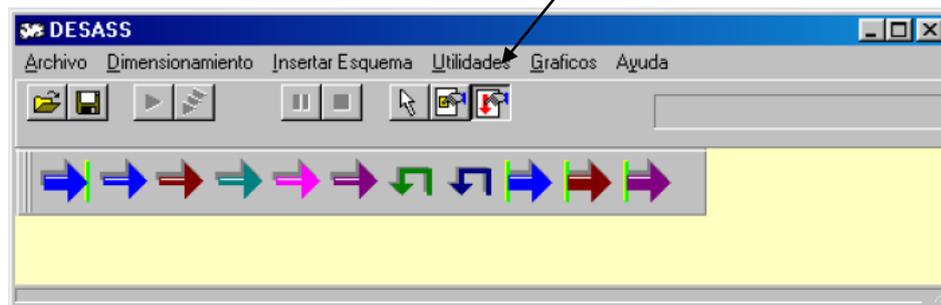


Fig.7. Línea de botones con las distintas uniones disponibles.  
Fuente: Elaboración propia, 2016

### 3.2.MODOS DE OPERACIÓN DE CÁLCULO.

El programa DESASS se ha desarrollado de modo que permite el cálculo tanto de las condiciones estacionarias(Diseño) como de condiciones transitorias (Simulación).

Para las condiciones de Diseño, el usuario deberá escoger, en todos los elementos que configuran el esquema de tratamiento, la opción de Diseño que aparece en la parte inferior de cada una de las ventanas de propiedades de los elementos (se puede hacer en todos los elementos simultáneamente a través del menú Utilidades).

Con ello, se calcula el estado estacionario para las condiciones de invierno y de verano simultáneamente, ofreciendo así una comparación rápida de los resultados obtenidos en cada una de las estaciones.

En régimen estacionario el programa desarrolla una solución basándose en las condiciones medias establecidas en planta (caudal y calidad del agua de entrada, parámetros de diseño caudales de recirculación interna)

Escogiendo la opción Simulación en cada una de las ventanas de propiedades de los elementos, se calculará el estado transitorio.

En régimen transitorio el usuario simulará el funcionamiento del esquema de tratamiento por lo que dicho esquema deberá estar perfectamente definido (dimensiones y caudales de todos los elementos).

El programa puede simular la evolución del sistema ante una entrada constante o ante variaciones en el caudal o la calidad en el agua de entrada.

También es posible establecer en condiciones de simulación variaciones temporales de los caudales de recirculación y de purga del fango en los decantadores y espesadores.

En cada una de las ventanas de propiedades de los elementos existen algunas opciones que se activan o desactivan según se esté realizando el cálculo en condiciones de una u otra forma.

### 3.2.1. Características del agua residual influente.

Las características del agua residual influente a la planta deben definirse en la flecha de Entrada de Agua. En esta flecha se introducen los datos medios para ambas estaciones (Invierno o Verano) en el caso de Diseño y los temporales en el caso de Simulación.

Para introducir los caudales y características del agua debe activarse el botón izquierdo del ratón sobre la flecha de agua. Al activar dicho botón aparece la ventana que se muestra en la Figura 8.

Cargas (mg/l) Soluble		Cargas (mg/l) Suspendida	
Invierno	Verano	Invierno	Verano
So2		Xi	
Sf		Xs	
Sa		Xh	
Snh4		Xpao	
Sno3		Xpp	
Spo4		Xpha	
Si		Xaut	
Salk			
Sn2		Xmeoh	
Spro		Xfep	
Sh2		Xnv	
Sch4		Xacid	
Sco2		Xpro	
		Xmac	
		Xmh2	

Fig.8. Se definen el caudal y las características del influente.

Fuente: Elaboración propia, 2016

La ventana de propiedades de la flecha Entrada de Agua consta de tres sub ventanas : Dotaciones y Temperatura, Cargas y Sedimentabilidad.

En la primera sub ventana, se introducen para ambas estaciones los caudales de entrada a la planta en condiciones medias y punta, la temperatura, el pH y el factor punta de contaminación.

Para cálculos en estado transitorio (Simulación) que estación se va a simular y si el cálculo partirá del estado estacionario o del último cálculo realizado.

En la sub ventana Cargas, se introducen las concentraciones medias en el influente de todos los elementos considerados en el modelo biológico, así como, en su caso, las variaciones temporales. Para esta última acción se debe desactivar la opción Sin Curva de Datos y pulsar el botón Datos Curva.

La introducción de las variaciones temporales puede realizarse mediante la Hoja de Cálculo Excel. El programa pregunta al usuario si dispone de la Hoja de Cálculo Excel instalada y ante respuestas afirmativas abre la hoja de cálculo con la plantilla que se muestra en la Figura 9.

En la primera fila de la plantilla aparece el tiempo, el caudal, la temperatura y el resto de variables del modelo mientras que en la segunda como valores a tiempo cero aparecen los correspondientes a condiciones medias

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Tiempo (días)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>So2</b>	<b>Sf</b>	<b>Sa</b>	<b>Spro</b>	<b>Sn</b>
2	0	300	20	7	0.01	210	40	5	1
3									
4									

Fig.9 . Formato de Microsoft Excel para la introducción de las variaciones temporales de caudal y calidad del agua de entrada.  
Fuente: Elaboración propia, 2016

Cuando se haya incluido una curva de variación temporal se puede ver la interpolación de cada una de las variables en el intervalo introducido mediante el botón Gráficos.

Aunque el programa tiene implementado un algoritmo de interpolación por medio de una potente subrutina de cálculo numérico es recomendable que siempre se revise la interpolación que hace el programa para comprobar si representa la tendencia medida.

Cuantos más puntos se consideren en la curva, mejor será la aproximación. La Figura 14 muestra la representación de la variación de la variable Sa en un intervalo de tiempo de 2 días.

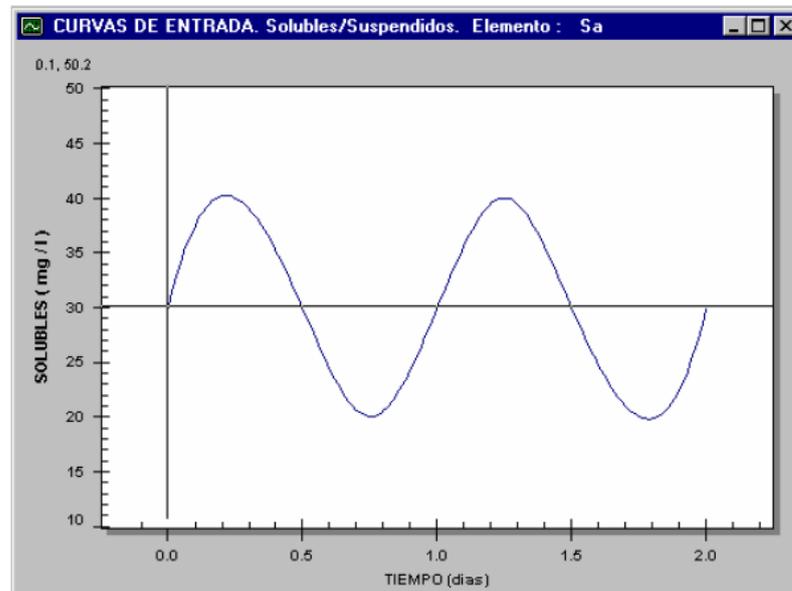


Fig.10.Representación gráfica de la Interpolación del elemento Sa en el influente  
Fuente: Elaboración propia, 2016

Pulsando el botón Constantes Estequimetricas DESASS muestra los valores de los factores de conversión para el nitrógeno, fósforo, carbono y sólidos suspendidos totales Figura 11. Estos factores se utilizan en las ecuaciones de continuidad que se aplican en la matriz estequimetrica del BNRM1.

Por defecto se utilizan los parámetros sugeridos en el modelo, aunque estos valores se pueden cambiar dependiendo de las condiciones particulares que se tengan.

Los factores de conversión únicamente se pueden modificar en las flechas de Entrada de Agua, aunque se pueden visualizar en las ventanas de propiedades de las líneas de unión.

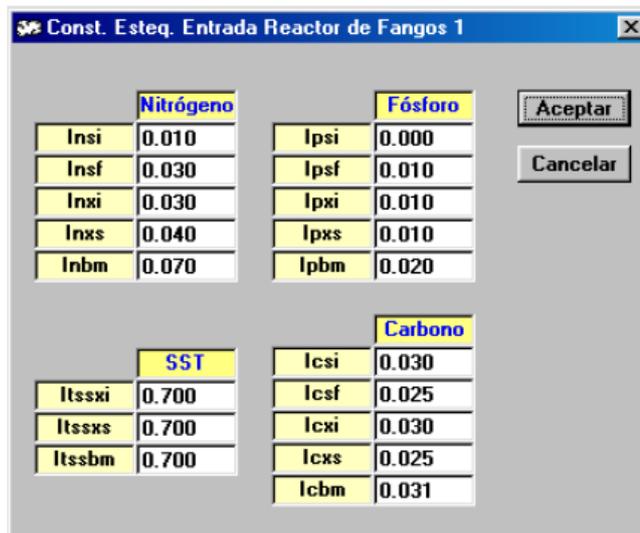


Fig.11.Ventana donde se modifican los factores de conversión

Fuente: Elaboración propia, 2016

Para los casos en los que se desee realizar simulaciones de sistemas de tratamiento biológico desconociendo las características del influente, se ha incluido un agua influente típica que se establece accionando el botón Agua Residual Doméstica.

### 3.2.2. Condiciones de vertido

Accionando el botón izquierdo del ratón sobre las líneas de unión del tipo Salida de Agua aparecerá la ventana de Condiciones de vertido que se muestra en la Figura 12.

En esta ventana se podrán introducir las restricciones en las concentraciones de los componentes en el efluente. Por defecto se han establecido unos valores de referencia, pero éstos pueden modificarse para cada caso en particular.

Los valores establecidos servirán para la comparación una vez el algoritmo general del programa finalice el cálculo, de las concentraciones obtenidas en el efluente con los establecidos en las condiciones de vertido. Si éstos últimos llegaran a ser sobrepasados por las concentraciones en el efluente se mostrará un aviso referente al límite en cuestión.

El programa no modificará ningún parámetro de diseño para cumplir con las condiciones de vertido.

El programa se limita a mostrar el correspondiente aviso, las modificaciones pertinentes deberá realizarlas el usuario.

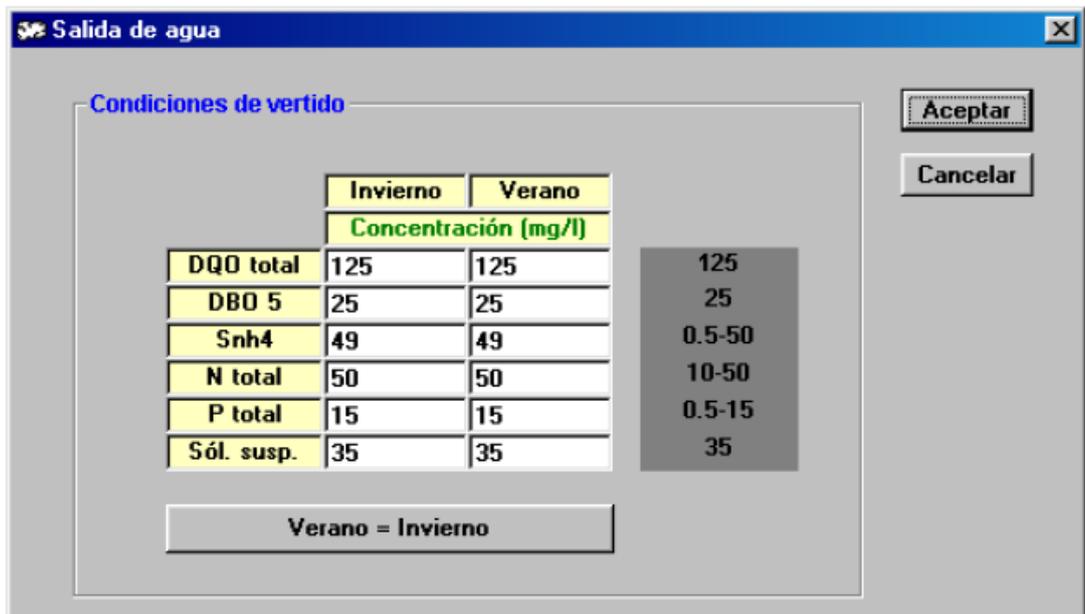


Fig.12: Ventana de introducción de las condiciones de vertido.  
Fuente: Elaboración propia, 2016

### 3.3.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

DESASS muestra los resultados obtenidos en el cálculo de los distintos elementos de tratamiento de 3 formas diferentes: a través de las pantallas de resultados de los distintos elementos, a través de las representaciones gráficas, o a través de la información contenida en las líneas de unión.

#### 3.3.1. Pantallas de resultados

Una vez finalizado el proceso de cálculo numérico, DESASS dispone para cada una de las operaciones unitarias de una ventana de resultados donde se recopila toda la información concerniente a la calidad del agua tanto en la entrada como en la salida del elemento, así como las características de funcionamiento, de diseño y otras características particulares de cada operación unitaria.

Para que DESASS muestre la pantalla de resultados de un elemento se debe accionar el botón derecho del ratón sobre dicho elemento. Si el cálculo se realizó mediante la opción Iniciar paso a paso, el algoritmo general se encarga de mostrarlas automáticamente para cada uno de los elementos.

En la Figura 13 se observa la pantalla de resultados que muestra el programa para el elemento Reactor de Fangos. En la figura únicamente se observan valores para la estación de invierno porque en el ejemplo en cuestión sólo se calculaba dicha estación.

Las pantallas de resultados de los demás elementos son similares a la que se muestra en la Figura 13 correspondiente al reactor de fangos. DESASS sólo muestra estas pantallas cuando el proceso de cálculo ha finalizado.

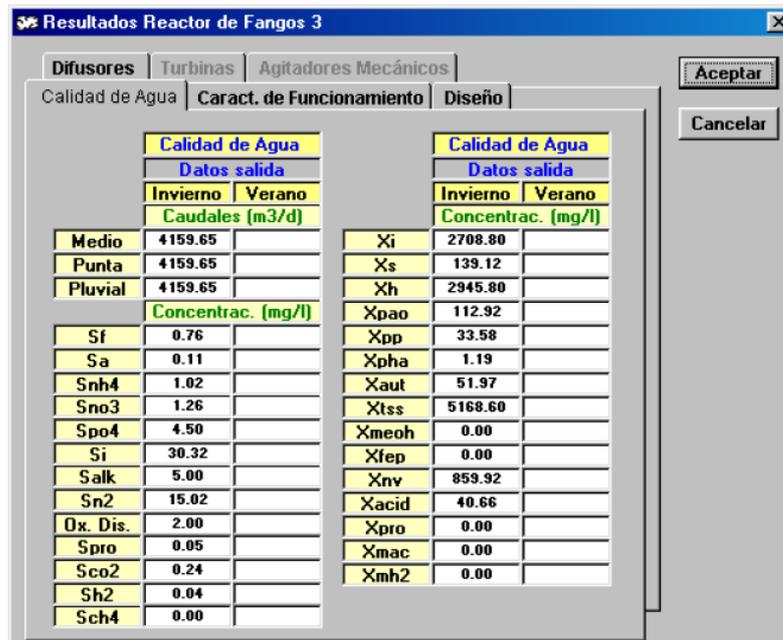


Fig. 13. Pantalla de resultados del elemento Reactor de fangos.

Fuente: Elaboración propia, 2016

### 3.3.2. Representaciones gráficas

El programa ofrece la posibilidad de mostrar la evolución de cualquiera de las variables del modelo durante el proceso de cálculo. En condiciones de Diseño, se pueden representar los datos intermedios obtenidos en el cálculo del valor estacionario en función del número de iteraciones.

En condiciones de Simulación, se representa la evolución de las variables en función del tiempo simulado. Las representaciones gráficas se muestran en la opción Gráficos de la barra de menú y se pueden observar durante el proceso de cálculo o una vez finalizado el mismo.

Las representaciones gráficas están disponibles para los reactores de fangos, fermentadores, digestores aerobios y anaerobios, depósitos tampón, decantadores primarios y secundarios y espesadores.

Las representaciones gráficas de estos tres últimos elementos (decantadores primarios, decantadores secundarios y espesadores) son diferentes a las anteriores porque permiten representar además de la evolución de las variables en función de las iteraciones o del tiempo simulado, la variación de dichas variables en función de la altura, lo que se denomina Perfil.

La Figura 14 muestra la ventana de representaciones gráficas del reactor de fangos activados.

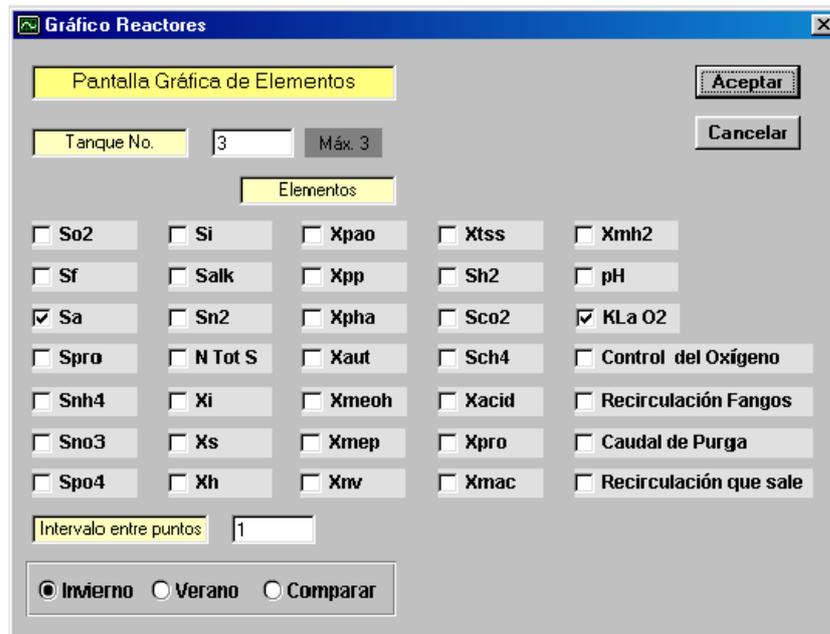


Fig. 14: Pantalla de representación gráfica del reactor de fangos activados.  
Fuente: Elaboración propia, 2016

Las pantallas correspondientes al fermentador, digestor aerobio, digestor anaerobio y depósito tampón son muy similares.

En esta pantalla el usuario debe establecer:

1. Las variables cuya evolución desea ver
2. El tanque para el que desea ver la evolución de las variables
3. En condiciones de Diseño la estación o estaciones que desea representar
4. El número de iteraciones, o el intervalo de tiempo entre los puntos de la gráfica.

La Figura 15 muestra la ventana de representaciones gráficas del decantador secundario. Las pantallas correspondientes al decantador primario y al espesador son muy similares.

En esta pantalla se debe establecer:

- Las variables que desea representar

Si desea ver la variación de las concentraciones en función de la altura del decantador(Perfil) o su evolución en función de las iteraciones o del tiempo simulado (Evolución).

En la opción Perfil la iteración o el tiempo para el que desea representar el perfil o bien si desea ver la evolución del perfil.

En la opción Evolución las capas para las que desea ver la evolución.

En condiciones de Diseño la estación o estaciones que desea representar el número de iteraciones, o el intervalo de tiempo entre los puntos de la gráfica.

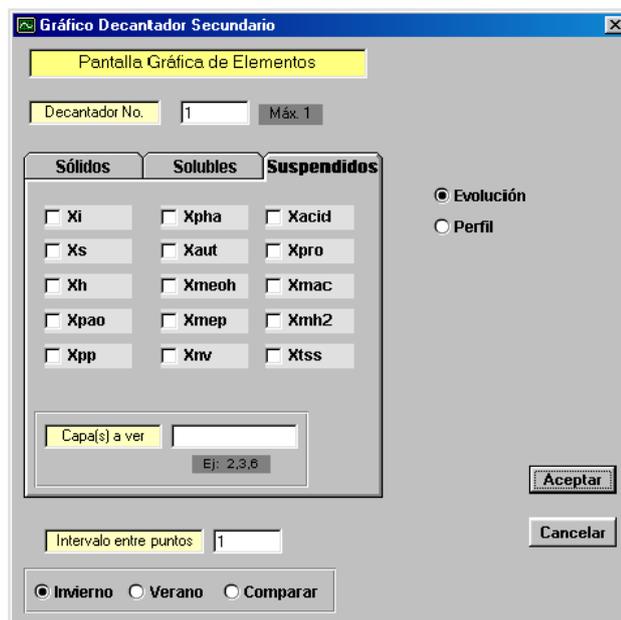


Fig. 15 Pantalla de representación gráfica para el decantador secundario.  
Fuente: Elaboración propia, 2016

La figura 16 muestra la evolución durante el proceso de cálculo de las variables XS y SF en el reactor de fangos activados. Tal y como se observa en la figura las gráficas disponen de las opciones Actualizar(al pulsar el botón incorpora a la gráfica los cálculos realizados hasta ese momento) y Actualizar Autom. (periódicamente el programa incorpora a la gráfica los cálculos realizados).

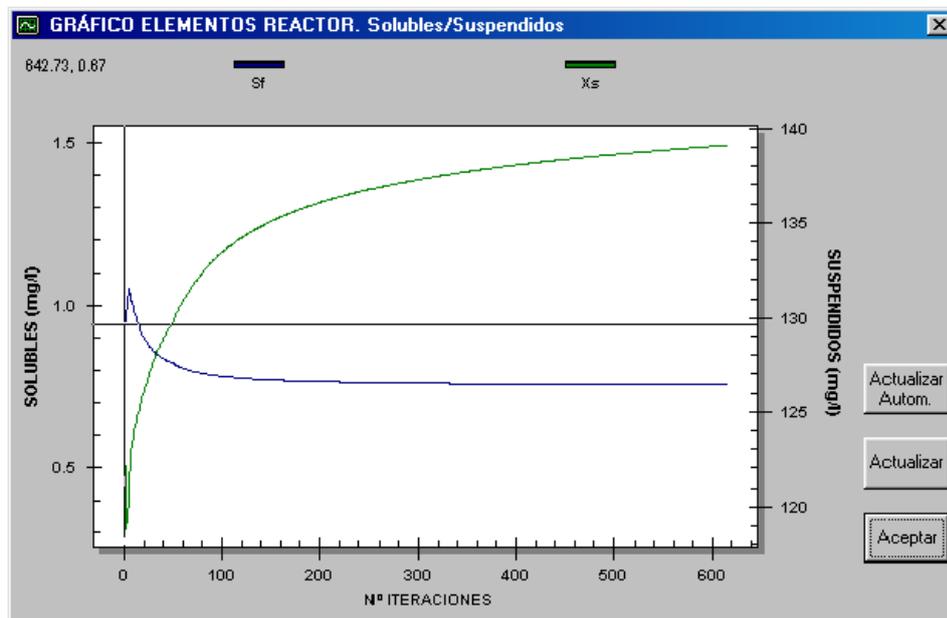


Fig. 16 Representación gráfica de la evolución durante el proceso de cálculo de las variables XS y SF en el reactor de fangos activados  
Fuente: Elaboración propia, 2016

### 3.3.3. Validación de elementos

Cuando el usuario pulsa el botón Iniciar o Iniciar paso a paso, antes de comenzar los cálculos de diseño o simulación DESASS realiza una validación de la configuración de planta diseñada.

Si detecta algún error sacará en pantalla una lista con los errores que el usuario debe subsanar antes de comenzar los cálculos. Algunos de los errores más comúnmente cometidos se enumeran a continuación explicando el por qué del error y qué debe hacer el usuario para corregirlo.

- El elemento reactor de fangos no debe tener una entrada de aire: Este mensaje aparece cuando un reactor aireado mediante turbinas o venturi está conectado a una soplante mediante una línea de aire. Para evitar este error hay que eliminar la línea de aire.

El elemento reactor de fangos debe tener una entrada de aire: Este mensaje aparece cuando un reactor aireado mediante difusores no ha sido conectado a una soplante. Para evitar este error basta conectar el reactor a una soplante.

- Revise la entrada al Decantador primario/Reactor de fangos: Este mensaje aparece cuando la entrada de agua no tiene caudal. La línea de entrada de agua no tiene valores por defecto, por tanto el usuario deberá introducir en la ventana de propiedades de la flecha de Entrada de Agua un valor para el caudal.

- El elemento Añadir Reactivos no debe tener ninguna entrada: Este mensaje aparece cuando se conecta una entrada de agua al elemento añadir reactivos. El caudal que le llega al reactor no se fija en una entrada de agua, sino en la ventana del elemento Añadir Reactivos.

- El elemento Decantador Primario/Secundario debe tener una única salida de fango/agua: Este mensaje aparece cuando al usuario se le ha olvidado colocar la purga o el efluente en un decantador primario o secundario. El error se corrige añadiendo una salida de fango o agua al decantador en cuestión.

### **3.4. APLICACIONES**

#### **3.4.1. Diseño de nuevas plantas de tratamiento.**

Diseño de estaciones depuradoras que incluyen sistemas de fangos activados con eliminación biológica de nutrientes, procesos de fermentación del fango primario para la producción de ácidos volátiles, digestión aerobia o anaerobia de fangos, precipitación química de fósforo, etc.

Además pueden estudiarse diversos modos de operación en función del caudal, la época del año... (Seco et al., 2003).

#### **3.4.2. Diagnóstico y optimización de plantas de tratamiento existentes**

Se ha estudiado y optimizado el funcionamiento de diversas EDARs en la Comunidad Valenciana (Alcoi, Alicante, Canals, Carraixet, Sagunto, Vila Real, Elx-Algorós, Orihuela, Elda, Gandía, Ibi, Valle del Vinalopó y Buñol-Alborache) mediante la calibración del modelo y posterior simulación con DESASS.

La calibración del modelo para cada planta se llevó a cabo en dos etapas.

En una primera etapa, mediante ensayos discontinuos de laboratorio (off-line) utilizando biomasa de la planta industrial, se obtuvieron los parámetros de mayor influencia en el modelo (velocidades de crecimiento y muerte y constantes de semisaturación para cada grupo de microorganismos presentes).

En una segunda etapa, con los parámetros obtenidos en la etapa anterior, se simuló las plantas con DESASS para determinar el valor del resto de los parámetros, ajustando las predicciones del modelo a los datos históricos de la planta. Tras la calibración de los parámetros de los distintos grupos de bacterias presentes en el sistema, se realizaron simulaciones para detectar funcionamientos alejados del óptimo y proponer mejoras en la operación de la planta.

#### **3.4.3. Investigación**

Este programa se ha utilizado para reproducir los resultados obtenidos en diferentes proyectos de investigación.

El funcionamiento de fermentadores de laboratorio y planta piloto, reactores discontinuos de laboratorio (SBR) y una planta piloto con esquema UCT ha sido

reproducido satisfactoriamente y se ha estudiado la influencia de los parámetros de operación mediante simulaciones con DESASS.

#### **3.4.4. Enseñanza y entrenamiento de personal**

Este programa es muy útil para visualizar el funcionamiento completo de una estación depuradora teniendo en cuenta el efecto en la corriente principal de las recirculaciones a cabeza de planta.

Además los operadores de planta pueden simular diferentes alternativas de operación y acciones de control ante cambios en el caudal o la composición del agua de entrada.

#### **3.4.5. Ensayo de nuevos esquemas de tratamiento por simulación**

La simulación de los procesos biológicos para todas las condiciones ambientales (aerobias, anóxicas y anaerobias) unido a la posibilidad de combinar de forma libre reactores de tanque agitado con digestores anaerobios y unidades de sedimentación permite la utilización de DESASS para el ensayo de nuevos esquemas de tratamiento.

Esta aplicación es especialmente útil para estudiar la viabilidad de nuevos esquemas de tratamiento para la eliminación de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales industriales, para las cuales los esquemas convencionales de tratamiento pueden no ser los más adecuados.

#### **3.4.6. Diseño y simulación de sistemas de control**

Dado que DESASS incluye una extensa base de datos de maquinaria que permite el diseño y simulación de los sistemas de aireación (difusores de membrana, válvulas de control, soplantes), ha sido utilizado para el desarrollo de algoritmos de control y optimización del sistema de aireación basados en lógica difusa (Serralta et al., 2002).

El funcionamiento del sistema de control implementado en DESASS se basa en controlar de forma independiente la concentración de oxígeno en cada tanque (mediante el uso de una válvula de control) y la presión de descarga de las soplantes (modificando la velocidad de giro con un variador de frecuencia). Este sistema de control permite optimizar el funcionamiento de la planta, mejorar su estabilidad y conseguir importantes ahorros en el consumo de energía.

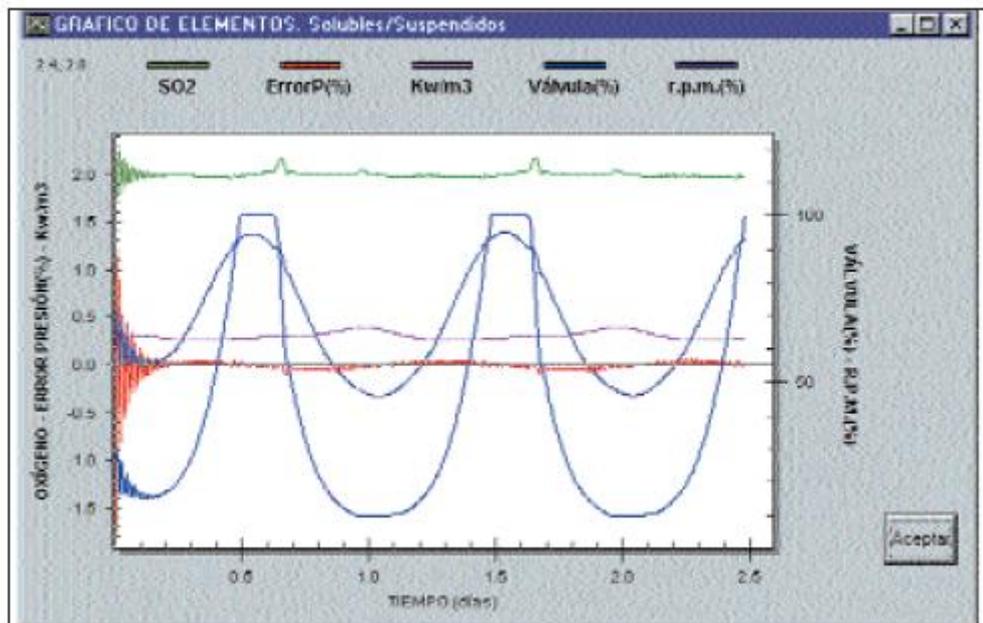


Fig. 17 Evolución del oxígeno disuelto, la apertura de la válvula, la velocidad de giro de la soplante, el error en la presión y el consumo específico de energía  
Fuente: Elaboración propia, 2016

En la Figura 17 se puede ver la evolución del oxígeno disuelto, la apertura de la válvula, la velocidad de giro de la soplante, el error en la presión y el consumo específico de energía, mostrada por DESASS en un ejemplo de control del oxígeno disuelto ante una variación de caudal en forma sinusoidal.

DESASS ha sido utilizado para el desarrollo de algoritmos para el diseño óptimo de esquemas de tratamiento que incluyan procesos de fermentación elutriación para la obtención de ácidos volátiles (Chanona et al., 2003) y esquemas de fangos activados con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo.

El diseño óptimo de los procesos de fermentación-elutriación se basa en el cálculo de los caudales de recirculación y purga de fango primario necesarios para obtener la concentración deseada de ácidos volátiles en el efluente.

El diseño óptimo de los esquemas de fangos activados con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo consiste en calcular los volúmenes de los distintos reactores de fangos activados (anaerobio, anóxico y aerobio), así como los caudales de recirculación interna, recirculación de fangos y purga de fangos necesarios para cumplir los requisitos de vertido.

#### 4.RESULTADOS

Los principales resultados que se pueden extraer de la investigación no experimental realizada de la herramienta informática denominada DESASS, creada para el diseño, simulación y optimización del funcionamiento global de EDARs son:

1. Tiene implementado el modelo BNRM1, que incluye los procesos físicos, químicos y biológicos más importantes que tienen lugar en las EDARs.

2. Es capaz de simular EDARs que incluyan decantadores primarios y secundarios, espesadores, sistemas de fangos activados, digestores de fango (aerobios y anaerobios) y sistemas de generación de ácidos grasos volátiles por fermentación/elutriación de fango primario.

3. Permite tener en cuenta las interacciones entre la línea de agua y la línea de fango al recircular a cabeza de planta sobrenadantes de espesadores y sistemas de deshidratación de fangos. Las cargas de nitrógeno y fósforo de estos sobrenadantes deben ser consideradas para un correcto diseño.

4. La simulación de los procesos biológicos para todas las condiciones ambientales (aerobias, anóxicas y anaerobias) unido a la posibilidad de combinar de forma libre reactores de tanque agitado con digestores anaerobios y unidades de sedimentación permite la utilización de DESSAS para el ensayo de nuevos esquemas de tratamiento.

5. Dessas ha sido utilizado para el desarrollo de algoritmos de control y optimización del sistema de aireación basados en lógica difusa.

6. Los resultados del estudio y optimización el funcionamiento mediante la calibración del modelo y posterior simulación con DESASS para las plantas de Elx-Algorós y Elda pueden encontrarse en Ferrer et al. (2004).

## **5. CONCLUSIONES**

En conclusión, DESASS permite a ingenieros y operadores experimentar, para un amplio abanico de esquemas de tratamiento, las consecuencias de la modificación de las condiciones de operación, así como realizar estudios de sensibilidad sobre el proceso.

Al aplicarse este software propuesto, se alcanzará un gran beneficio para el ecosistema y un aporte valioso para el desarrollo de la población por la importancia que tiene la depuración de las aguas residuales.

En este estudio, se ha demostrado la importancia, así como la aplicación de la utilidad de los modelos matemáticos en el campo de las aguas residuales.

Se ha realizado un estudio detallado de las unidades básicas para la generación de un modelo en distintos procesos biológicos.

Se ha realizado un despliegue de la herramientas Dessas, mostrando su aplicación práctica en el referenciado campo.

Se ha alcanzado un conocimiento satisfactorio de las principales variables de diseño y operación de una EDAR.

Por último, indicar que este programa ha sido utilizado con éxito en diferentes aplicaciones con diversos objetivos en el campo del tratamiento de aguas residuales.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

[1] Allison J. D., Brown D. S. y Novo-Gradac K. J. (1991) MINTEQA2/ PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: Version 3.0. EPA/600/3-91/021, USEPA, Washington, D.C.

[2] Batstone D.J., Keller J., Angelidakil., Kaliuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A. Sanders W.T.M., Siegrist H., Vavilin V.A. (2002) Anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). Scientific and Technical Report No. 13. IWA Publishing, London, UK.

[3] Bouzas A. (2003) Optimización de la fermentación de fango primario para la producción de ácidos grasos volátiles necesarios para la eliminación biológica de fósforo en EDARs. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

[4] Chanona J., Ribes J., Seco A. y Ferrer J. (2003) Optimum design and operation of primary sludge fermentation schemes for volatile fatty acids production. Enviado a la revista Water Research.

[5] Daigger G.T. y Roper R.E. (1985) The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics. Journal of Water Pollution and Control Federation 57 (8), 859-866.

[6] Ekama G.A., Pitman A.R., Smollen M. y Marais G.v.R. (1984) Secondary settling tanks. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes. (Ed. H.N.S. Wiechers), pp 8.1-8.14, Water Research Commission, Pretoria.

[7] Ekama G.A., Barnard J.L., Günthert F.W., Krebs P., McCorquodale J.A., Parker D.S y Wahlberg E.J. (1997) Secondary settling tanks: Theory, modelling, design and operation. IAWQ Scientific and technical report No. 6, IAWQ, London.

[8] Ferrer J., Morenilla J.J., Bouzas A. y Garcia-Usach F. (2004). Calibration and simulation of two large wastewater treatment plants operated for nutrient removal. Proceedings of the International Conference On Wastewater Treatment for Nutrient Removal & Reuse, pp. 223-231, Tailandia, 26-29 Enero-2004.

[9] Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo, T. (1987) Activated Sludge Model No.1, IAWPRC Scientific and Technical Report No.3, IAWPRC, London.

[10] Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. y Marais G.v.R. (1995) Activated Sludge Model No.2, IAWQ Scientific and technical report, IAWQ, London.

[11] Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G.v.R. y Van Loosdrecht M.C.M. (1999) Activated Sludge Model No.2d, ASM2d, Water Science and Technology, 39(1), 165-182.

[12] Merkel W. y Krauth K. (1999) Mass transfer of carbon dioxide in anaerobic reactors under dynamic substrate loading conditions. Water Research, 33 (9), 2011-2020.

[13] Muñoz, A. H. (1976). Avances y tendencias de la depuración de aguas residuales. Revista de obras públicas, Nº 3135.

[14] Olsson y Newell (1999). Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control. IWA Publishing. London. UK.

[15] Peña-Roja J.M., Seco A., Ferrer J. y Serralta J. (2002) Calibration and validation of Activated Sludge Model No. 2d for Spanish municipal wastewater. Environmental technology, 23 (8), 849-862.

[16] Ribes J., Ferrer J., Bouzas A. y Seco A. (2002) Modelling of an activated primary settling tank including the fermentation process and VFA elutriation. Environmental technology, 23, 1147-1156.

[17] Seco A., Ferrer J., Serralta J., Ribes J., Barat R. y Bouzas A. (2003) Process modelling: a useful tool for WWTP design A case study. Proceedings of the 9th IWA specialised Conference on Design, Operation and Economics of large wastewater treatment plants celebrado en Praga, 1-4 septiembre (2003).

[18] Seco A., Ribes J., Serralta J. y Ferrer J. (2004) Biological Nutrient Removal Model No.1, BNRM1. Proceedings of the International Conference On Wastewater Treatment for Nutrient Removal & Reuse, pp. 203-211, Tailandia, 26-29 enero 2004.

[19] Serralta J., Ribes J., Seco A. y Ferrer J. (2002). A supervisory control system for optimising nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants. Water Science and Technology, 45(4- 5), 309-316.

[20] Serralta J., Ferrer J., Borrás L. y Seco A. (2004) An extension of ASM2d including pH calculation. Enviado a la revista Water Research.

## **6.1.WEBGRAFIA**

[1] Asesoría Técnica y Control S.A. Recuperado el 2 de Marzo del 2015 de <http://www.envirosim.com>.

[2] Efor - Internet y Tecnología / Grupo Integra . Recuperado el 15 de Enero del 2015 de <http://www.efor.dk>.

[3] Hydromantis Environmental Software Solutions, Inc. Recuperado el 22 de Noviembre del 2014 de <http://www.hydromantis.com>.

---

[4] ifak system GmbH. Recuperado el 22 de Abril del 2015 de <http://www.ifaksystem.com>.

[5] Object-Oriented Modelling and Simulation of Physical Systems. Recuperado el 20 de Marzo del 2015 de <http://www.hemmiswest.com>.