

- Envío de los últimos datos recibidos de un cliente.
- Envío de consignas a un cliente.
- Petición de desconexión del cliente.

Estas son las posibles órdenes actualmente implementadas, pero se trata de un sistema abierto fácilmente modificable, que admite la ampliación.

La última acción que debe efectuar el proceso hijo antes de finalizar es la desconexión, para que el socket pueda ser eliminado y no reste recursos al sistema.

4.4.1.3 EL PROCESO CLIENTE

El proceso cliente ha sido desarrollado para su funcionamiento en un ordenador personal compatible con sistema operativo DOS. Por este motivo se han debido utilizar unas librerías de funciones adicionales al C estándar, el "Microsoft Development Kit". Mediante estas librerías podemos acceder a funciones de los sockets que en sistemas UNIX ya vienen con el sistema operativo.

El procedimiento para crear el socket de conexión con el servidor es el siguiente:

- Rellenar una estructura con los siguientes datos:
 - la dirección IP del servidor remoto
 - el puerto TCP/IP utilizado para la conexión.
- Creación del socket, mediante la llamada a la función *socket()*, determinando su tipo y la familia de direcciones utilizada. La función retorna un número de socket por el cual se podrá escribir y leer.
- Conexión del socket creado, mediante la llamada a la función *connect()*, con la dirección y puerto del servidor especificados en la estructura anterior.

A partir de este momento de la conexión es posible leer y escribir en el socket. En el caso de la planta piloto se ha desarrollado un protocolo de comunicación para facilitar el intercambio de datos. Los dos procesos, tanto el cliente como el servidor podrían iniciar la comunicación, lo que no sería una situación controlable. Por este motivo se decidió que el cliente iniciaría la comunicación con el servidor, el envío de un carácter por el cliente indicaría el tipo de acción que debería efectuar el servidor. De este modo el cliente debe efectuar el envío mediante la función *send()* de un carácter, mientras que el servidor debe efectuar su lectura mediante la función *recv()*.

El carácter enviado por el cliente y recibido por el servidor establecerá la acción a efectuar por el

servidor. El intercambio de datos se realiza mediante el envío de un búffer de 512 bytes. En este búffer deben introducirse los datos a enviar representados por caracteres ASCII. Es necesario este paso intermedio, transformar la representación de los números en el ordenador por una representación en formato carácter, no es posible enviar los datos directamente, ya que la representación simbólica de los valores mediante los bits es diferente en un PC que en una SUN. Por ejemplo, para un mismo tipo de valor real de 32 bits, el número de bits dedicado a mantisa y exponente es diferente en ambas representaciones.

A parte de los datos, se ha considerado necesario introducir unos caracteres de control, "checksum", para comprobar que los datos enviados son correctos. La corrección del envío de un datagrama TCP/IP ya es controlado por el protocolo TCP, que comprueba si ha llegado realmente a su destino y si ha llegado correctamente.

El "checksum" introducido en el caso de la planta piloto es un entero largo (long int) correspondiente a la suma de todos los caracteres del buffer desde la posición 0 a la 499, e introducido en formato carácter en la posición 500. Este chequeo permite efectuar una verificación de que los datos mandados por el cliente y por el servidor han sido correctamente introducidos, ya que la corrección en el envío del datagrama es controlada por el protocolo TCP. De este modo estamos parcialmente protegidos a cambios de consignas incorrectas o adquisición de datos erróneos.

En todos los envíos de datos se comprueba el checksum y se envía un carácter indicando si el checksum ha sido o no correcto, para que el cliente o servidor puedan efectuar las acciones de control de errores que crean convenientes. Por ejemplo, cuando se envían datos de la planta piloto del cliente al servidor y no llegan correctamente, el cliente vuelve a enviarlos nuevamente. Si el checksum sigue fallando el cliente cierra la conexión y no intenta enviarlo de nuevo hasta el siguiente intento programado.

Una vez efectuado el intercambio de datos, es necesario pedir la desconexión del servidor, advertir al sistema mediante la función *shutdown()* que ya no se debe atender a ningún intercambio de datos por el socket y por último cerrar el socket con la función *close()*.

4.4.1.4 MEMORIA COMPARTIDA

En el proceso servidor ejecutándose en la estación de trabajo se ha comentado que cuando algún cliente pide una conexión, se crea un proceso hijo a partir del padre. El proceso hijo es el que se encarga de

atender las peticiones del cliente. Este proceso hijo hereda prácticamente todas las características del padre, es decir, se crea un programa copia del anterior, exactamente con el mismo código fuente y en el mismo punto de ejecución del padre. El dato que se encuentra implícito, y que conviene hacer explícito, en estas características del proceso hijo, es que es un proceso igual que el padre hasta ese momento. Cualquier modificación del proceso hijo, o de sus variables sólo afectan a este proceso, no al padre. Es decir, cuando intercambiamos datos entre el cliente y el proceso hijo, el proceso padre no va a recibir esos datos. Debe utilizarse alguna técnica para que el proceso hijo pueda contactar con el padre y sea capaz intercambiar información.

En sistemas UNIX existen algunos procedimientos para el intercambio de información entre procesos (IPC, interprocess system communications), como "pipes", "FIFOs" o "shared memory" (memoria compartida) [Stevens, 1990]. Los dos primeros tienen características comunes con los sockets, ya que están construidos sobre una base de sockets pertenecientes al dominio UNIX, es decir que operan en el mismo ordenador multitarea.

El procedimiento para la utilización de "pipes" y "FIFOs" es similar al de los sockets. En el caso de los "pipes" sólo pueden ser utilizados para la comunicación de un proceso padre y un proceso hijo. Los "FIFOs" pueden considerarse una extensión de los "pipes". En ellos se ha implementado un descriptor (un nombre que los diferencia) que permite su utilización por dos procesos, aunque no tengan la relación de parentesco padre - hijo. El uso de estas dos herramientas es más sencilla que la de los sockets, pero sigue siendo necesario que los procesos sepan que tienen que leer o escribir en cada momento. Para su utilización sería necesario realizar una estructura rígida de comunicación hijo - padre que sería susceptible de acumular retrasos y no permitiría la ampliación al acceso de datos por otros procesos, objetivo del cual se verá su necesidad más adelante.

El tercer elemento señalado que permite la comunicación entre procesos es la memoria compartida. Esta es una herramienta más potente, que permite su utilización por todos los procesos. Tal como su nombre indica, es una zona de memoria de un tamaño determinado que puede ser reservada para el acceso de varios procesos ejecutados en el mismo ordenador. La zona de memoria compartida se distingue por un descriptor (un entero largo, long int) que permite diferenciarla del resto de zonas de las mismas características.

Este método si que puede utilizarse para la comunicación entre un proceso padre y uno hijo, ya que el proceso hijo hereda del padre todos los

descriptores de memoria compartida, es decir, puede acceder a esos segmentos de memoria.

El proceso encargado de crearla debe efectuar los siguientes pasos:

- Crear el segmento de memoria compartida, con una llamada a la función *shmget()*. En la llamada deben incluirse estos parámetros:
 - el identificador designado para la memoria compartida
 - el tamaño del segmento en bytes
 - los permisos de acceso al resto de usuarios
 - la orden de creación

La función devuelve un entero que identifica al segmento de memoria compartida en el proceso.

- Obtener la dirección del segmento de memoria compartida a partir del identificador obtenido en el paso anterior, mediante una llamada a la función *shmat()*. Esta función devuelve un puntero a una variable de tipo carácter, con dirección hacia el primer byte del segmento de memoria compartida.

A partir de este momento ya es posible escribir y leer en la zona de memoria compartida desde este proceso. Puede accederse a ella leyendo o escribiendo caracteres (bytes) en las posiciones deseadas, pero para escribir y leer variables de otros tipos como enteros, reales o dobles debe accederse de otro modo, a más bajo nivel. Mediante llamadas a la función *memcpy()* podemos utilizar el segmento de memoria compartida como almacenamiento de datos desde el cual copiar los bytes almacenados a otra estructura con el tipo de variables que nosotros deseamos, así como realizar el proceso inverso, copiar nuestra estructura de datos al segmento de memoria. De este modo podemos almacenar todo tipo de variables, ocupando el número de bytes necesarios.

Una vez finalizada la utilización de la memoria compartida es necesario indicar al sistema que ya no será necesaria y que puede eliminarla. Esto se consigue con los pasos siguientes:

- Eliminar la relación de la dirección obtenida con la función *shmat()* con el segmento de memoria compartida, mediante la llamada a la función *shmdt()*.
- Eliminación de la memoria compartida, mediante la función *shmctl()*, con parámetro el identificador del segmento.

Hasta aquí son los procedimientos necesarios para el proceso servidor. Si se trata de un proceso ajeno que quiere acceder al segmento de memoria compartida, los procedimientos son algo diferentes:

- Averiguar la identidad del segmento de memoria compartida, con una llamada a la función *shmget()*. En la llamada deben incluirse estos parámetros:
 - el identificador designado para la memoria compartida
 - el tamaño del segmento en bytes
 - los permisos de acceso al resto de usuarios

La función devuelve un entero que identifica al segmento de memoria compartida en el proceso.

- Obtener la dirección del segmento de memoria compartida a partir del identificador obtenido en el paso anterior, mediante una llamada a la función *shmat()*. Esta función devuelve un puntero a una variable de tipo carácter, con dirección hacia el primer byte del segmento de memoria compartida.

En este momento ya es posible acceder a ese segmento y efectuar las mismas operaciones que realizábamos en el proceso que creaba la zona de memoria compartida. Cuando finaliza la utilización del segmento, es necesario decirle al sistema que ya no va a ser accedida más. Esto se consigue mediante una llamada a la función *shmdt()*, que elimina la relación de la dirección obtenida con la función *shmat()* con el segmento de memoria compartida.

En este proceso no debe llamarse a la función que elimina el segmento de memoria compartida (*shmctl()*), únicamente debe efectuarse el paso anterior, eliminar la relación mediante *shmdt()*. En caso contrario eliminaríamos la memoria compartida y no podría acceder ningún proceso, incluido el que la ha creado.

4.4.1.5 SEMÁFOROS

Hasta este momento se ha considerado que en ningún caso dos procesos deberían acceder simultáneamente al mismo segmento de memoria compartida. Esta situación, que a priori puede parecer poco probable, es normal que se produzca en el caso del servidor. Pueden existir varios clientes simultáneos atendiendo peticiones, y será necesario que otros procesos ejecutándose en la misma estación de trabajo puedan acceder a ese segmento, la probabilidad de un acceso simultáneo es bastante alta.

El acceso simultáneo de varios procesos puede provocar la finalización no controlada de todos los

procesos que se encuentren utilizando dicho segmento. La consecuencia directa sería la eliminación de la recepción de datos de la planta piloto por la SUN. Este hecho explica la búsqueda de un sistema que regule el acceso de los diferentes procesos al segmento de memoria compartida.

Una posible solución es la utilización de semáforos que regulen el acceso. Los semáforos son unas herramientas del sistema operativo que permiten la creación de funciones para controlar el acceso a recursos del ordenador. Generalmente son utilizados para que dos procesos no accedan simultáneamente a una impresora, un disco duro o como en nuestro caso, a un segmento de memoria compartida.

Con los semáforos se optimiza el uso compartido de recursos del ordenador. Un método común utilizado para acceder a un recurso del ordenador es preguntar su estado. En el caso de no estar ocupado es posible acceder a él. Si está ocupado esperamos un intervalo de tiempo determinado y volvemos a preguntar su estado. Efectuamos esta operación hasta que el recurso queda libre. Este es un método utilizable, pero no estamos optimizando el uso del ordenador en ningún modo. El medio para acceder a un recurso debería ser mediante la implementación de semáforos.

Es posible crear un semáforo que sólo permita acceder a un proceso al dispositivo. Si otro proceso quiere acceder a él debe indicarlo al sistema operativo. Éste es el que se encarga de avisar al segundo proceso de que el primero ha liberado el recurso. No es el proceso el que pregunta el estado, es el sistema operativo el que una vez que ha terminado el primer proceso indica al segundo que puede utilizarlo. La diferencia es muy grande. No estamos cargando al sistema operativo de preguntas sobre el estado de un dispositivo hasta que es liberado, únicamente le comunicamos nuestra intención de utilizar un dispositivo, y que cuando esté libre nos avise.

Esta ha sido el tipo de control implementado sobre la memoria compartida. Para ello se han utilizado una serie de funciones que permiten la utilización intuitiva de estos conceptos, sin necesidad de acceder al modo en que trabajan las instrucciones a bajo nivel.

Las funciones desarrolladas permiten las siguientes acciones:

- Creación de un semáforo, a partir de un identificativo de semáforo (un entero largo de cuatro bytes).
- Eliminación de un semáforo.
- Apertura de un semáforo que ya existe para su utilización.

- Cierre de un semáforo cuando ya no es requerida su utilización.
- Acceso al recurso si no está ocupado o espera a que el semáforo quede liberado para acceder al recurso.
- Liberación de un semáforo.

En estas funciones también se han implementado controles para evitar contratiempos en la utilización de los semáforos. Se han incluido operaciones para que en procesos que finalicen sin liberar el semáforo o procesos que reciban una señal de finalización externa (*kill()*) no dejen bloqueado el semáforo, que sea el propio sistema operativo quien lo haga automáticamente.

La utilización por el proceso que crea los semáforos (el servidor) debe ser la siguiente:

- Llamada a la función *sem_create()* con el identificativo del semáforo. Esta función crea un semáforo y devuelve un número entero que le identificará en el proceso.
- Llamada a la función *sem_wait()* cuando quiera accederse al recurso. Esta función acabará su ejecución cuando el sistema operativo vea liberado el recurso.
- Una vez utilizado el recurso deberá llamarse a la función *sem_signal()* para avisar al sistema operativo que se ha terminado su utilización.
- Cuando el proceso que ha creado los semáforos desee eliminarlos será necesario llamar a la función *sem_rm()*.

El resto de procesos que quieran acceder al recurso deberán efectuar los pasos siguientes:

- Averiguar la identidad del semáforo, con una llamada a la función *sem_open()*. Esta función devuelve un número entero que identificará al semáforo en el proceso.
- Igual que en el caso del servidor, deberá llamar a la función *sem_wait()* cuando quiera obtener el recurso.
- Llamada a la función *sem_signal()* para indicar al sistema operativo que el recurso ha sido liberado.
- Cuando el proceso considera que no va a ser necesario más el recurso debe llamar a la función *sem_close()*.

El procedimiento utilizado por los procesos para leer datos de la memoria compartida del servidor, una vez que ya hallan sido creados tanto los semáforos como la memoria compartida, será el siguiente:

- Llamada a la función *sem_wait()* para acceder a la memoria compartida.

- Copiar los datos del buffer de la memoria compartida a la estructura de datos.
- Llamada a la función *sem_signal()* para liberar la memoria compartida y permitir al resto de procesos su acceso.

De tal forma tendremos en nuestra estructura los últimos datos recibidos. Si en lugar de leer queremos escribir, el primer y último paso serán iguales, sólo varía el segundo. En él, en lugar de copiar los datos del buffer a la estructura de datos, debe rellenarse la estructura de datos y posteriormente copiarse al buffer de la memoria compartida. De este modo habremos introducido los datos en la memoria compartida.

4.4.1.6 APLICACIÓN

Con todas las herramientas anteriores se ha construido un sistema capaz de intercambiar datos (procesos de entrada y salida), con un sistema externo (mediante los sockets TCP/IP) y con cualquier proceso interno (mediante la memoria compartida regulada con los semáforos). Este proceso recibe el nombre de "miserver". Como ejemplo del acceso a los datos, se ha realizado un programa que accede a la memoria compartida periódicamente, lee algunos de los datos disponibles y crea automáticamente una página HTML (<http://eq3.uab.es/depuradoras/plantatr2.html>) donde se muestran esos datos (figura 4.41).

PLANTA PILOTO: DATOS ACTUALIZADOS EN TIEMPO REAL

	REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3
pH	6.2	6.2	5.9
Temperatura (C)	22.7	23.0	21.8
Oxígeno (ppm)	0.0	3.1	3.0
Redox (mV)	-167	169.	63.0
Hora de la adquisición de datos:	Tue May 19 08:58:48 1998		

Fig. 4.41 Página Web con los datos actualizados automáticamente en tiempo real

La implementación del servidor permite el acceso a la adquisición de datos y a la actuación remota del sistema desde cualquier ordenador conectado a Internet, lo que en nuestro caso implica que es posible acceder desde cualquier ordenador personal que disponga de un módem. Este hecho abre el camino al telemando y al telecontrol, situación ya disponible en nuestro sistema.

4.4.1.7 COMUNICACIÓN SUN - G2

Con el proceso "miserver" se consigue comunicar los datos de la planta piloto a la estación de trabajo donde reside el sistema experto G2, pero este no es

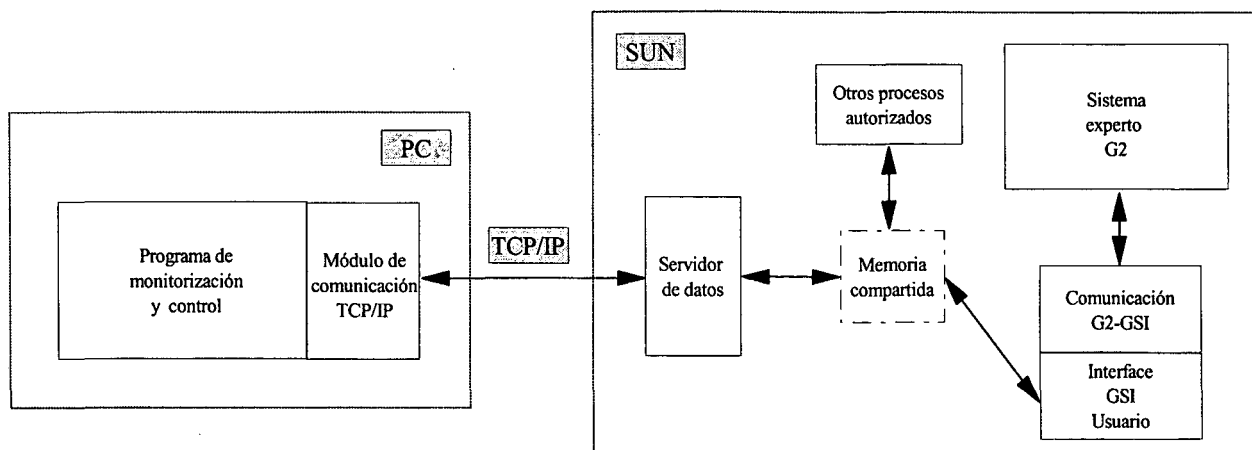


Fig. 4.42. Comunicación de datos planta piloto ↔ SUN ↔ sistema experto

el único paso necesario. Todavía queda el paso de comunicar los datos recibidos por el proceso al sistema experto. Para cumplir este paso se ha utilizado el desarrollo anterior programado en el proceso servidor.

Para poder cumplir el objetivo de intercambiar datos entre un proceso externo con el sistema experto existe la interfaz GSI (Gensym Standard Interface) [Gensym, 1992, 1995b]. Como se ha comentado en el capítulo de Materiales y Métodos, esta es una aplicación que permite el desarrollo de programas para la comunicación del sistema experto con otras aplicaciones ejecutándose en el mismo ordenador.

El sistema experto G2 ha establecido el modo en que podrá efectuar la adquisición de datos externos (mediante la interfaz GSI), por lo que es necesario adaptarse al formato que ha diseñado. GSI únicamente establece el nombre de las funciones necesarias y el formato de los datos a devolver. Para la comunicación con el proceso servidor "miserver" ha sido necesario el desarrollo de cada una de esas funciones. El proceso "miserver" se encarga por sí solo de la comunicación e intercambio de datos con la planta piloto, escribiendo los datos en la memoria compartida. Las funciones de GSI diseñadas deben acceder a la memoria compartida mantenida por "miserver" y leer los datos enviados por la planta piloto o escribir nuevas consignas que "miserver" deberá enviar a la planta piloto.

En la figura 4.42 puede observarse el esquema final de la comunicación planta piloto ↔ SUN ↔ sistema experto.

De este modo se ha programado un sistema que permite la comunicación con cualquier ordenador externo conectado vía Ethernet TCP/IP. El sistema también permite el intercambio de información con cualquier proceso interno, característica que se ha utilizado para intercambiar datos entre este proceso

y el sistema experto G2, mediante un proceso creado con la interfaz GSI.

Una vez desarrolladas las funciones deben unirse a un pequeño programa principal, el cual hace las llamadas necesarias a la verdadera función principal, situada en unas librerías de funciones adicionales no accesibles por el usuario. Esta función principal será la que llamará a las funciones que se han implementado para la comunicación.

Las funciones desarrolladas, con la tarea que realizan se exponen a continuación:

- *gsi_get_tcp_port()*. Es utilizada por G2 para conocer el puerto por el cual se efectuará la comunicación entre G2 y las funciones GSI.
- *gsi_initialize_context()*. G2 llama a esta función para inicializar el sistema externo, es decir, que el sistema reinicie contadores, buffers o variables comunes. En el enlace desarrollado, esta función se utiliza para acceder por primera vez a la memoria compartida y a los semáforos creados por el proceso "miserver".
- *gsi_def_obj()*. G2 llama a la función cuando se define o actualiza un objeto, antes de ser utilizado por primera vez. Debe construirse una función que permita registrar un objeto de G2 a partir de ciertos indicadores. En el caso de la planta piloto se han utilizado tres indicadores diferentes para cada elemento:
 - REACTOR0 / REACTOR1 / REACTOR2 / REACTOR3 / SALIDA / PLC / PLANTA
 - MEDIDA / CONSIGNA / ENTRADAS / SALIDAS / MEDIDA_CAUDAL / SP_CAUDAL / ESTADOS_VARIOS / MEDIDA_TIEMPOS / SP_TIEMPOS / VARIABLE / SP_VARIABLE

- PH / T / MV / O2 / MA / VELOCIDAD / NITRATOS / NITRITOS / AMONIO / SPOXIGENO / SPVELOCIDAD / AGITACION / 0 -9 / 00 - 99

Cada variable es definida mediante un indicador de cada uno de los tres grupos. Mediante esos indicadores es posible averiguar cuál es el índice utilizado por G2 para caracterizar esa variable. Este índice debe registrarse de algún modo, ya que cuando G2 pide datos de una variable utiliza ese índice, no los identificativos.

- *gsi_get_data()*. G2 utiliza esta función para que el sistema externo devuelva valores de las variables. G2 manda a GSI una lista con los índices de las variables que requiere conocer datos. La función toma los valores del sistema externo accediendo a la memoria compartida, rellena unas estructuras de datos determinadas que, por último, devuelve a GSI para que las comunique a G2.
- *gsi_set_data()*. Esta función es utilizada por G2 para mandar datos al sistema externo. Estos datos pueden ser, como en el caso de la planta piloto, consignas que deben mandarse a un controlador externo. G2 manda a GSI una lista con los índices de las variables que deben ser cambiadas y con el valor a establecer. Para cambiar el valor de variables externas se ha programado un sistema mediante el cual es posible ir anotando en la memoria compartida todas las consignas enviadas por G2. Cuando el sistema externo (la planta piloto) se conecta al proceso "miserver" y pregunta si existen consignas, éste accede a la memoria compartida, mira si GSI ha escrito consignas y en ese caso las envía al ordenador encargado del control de la planta piloto.
- *gsi_pause_context()*. Esta función es llamada por G2 para que el sistema externo deje de obtener datos para enviárselos. Esto puede ocurrir cuando finalice la ejecución de un programa o se encuentre en pausa.
- *gsi_resume_context()*. Esta es una función complementaria a la anterior, ya que es llamada por G2 cuando desea volver a recibir datos después de una pausa.
- *gsi_shutdown_context()*. G2 llama a esta función para que el sistema externo deje de adquirir datos y para realizar las acciones necesarias con el objetivo de finalizar este programa.

En el enlace desarrollado se utiliza para eliminar la unión con la memoria compartida y con los semáforos.

- *gsi_g2_poll()*. Función implementada para permitir al sistema externo mandar datos a G2 sin que éste los haya requerido. Permite enviar un mensaje desde la planta piloto a G2, pasando por el proceso "miserver".
- *gsi_stop_data()*. Con esta función G2 puede indicar al sistema externo que deje de tomar datos de una variable, cuando ésta cambia sus características o deja de existir.
- *gsi_send_message()*. Cuando G2 manda un mensaje a GSI, esta función debe encargarse de redirigir los mensajes hacia el sistema externo.

Todas esas funciones deben ser diseñadas para que devuelvan un valor GSI_SUCCESS si han podido realizar la tarea encomendada, o GSI_FAIL si han tenido cualquier problema que les ha impedido cumplir su cometido.

4.4.1.8 CONFIGURACIÓN DE LA BASE DE CONOCIMIENTO DE G2

Una vez desarrollado el enlace GSI-G2, es necesario configurar el programa de G2 que utilizará los datos. En él es necesario señalar los indicadores que utilizará para distinguir a las diferentes variables (los comentados en la función *gsi_def_obj()*). En nuestro caso se han implementado las medidas y actuaciones disponibles en la planta piloto.

Para cada objeto definido que dispone de datos GSI, es necesario indicar los valores de los atributos identificativos que determinan externamente a la variable. El SE utiliza estos valores cuando llama a la función *gsi_def_obj()* para definir externamente un índice correspondiente a ese objeto. El SE utiliza ese índice cada vez que requiere datos de esa variable al enlace GSI, por lo que los atributos identificativos sólo se utilizan inicialmente para la definición.

El SE puede configurarse para que se requiera a GSI un nuevo dato cada cierto intervalo de tiempo, o para que lo requiera cuando ocurre determinada condición. De este modo se obtiene una interfaz flexible y configurable sin necesidad de cambios en el código fuente del enlace GSI.

4.4.2 TRANSMISIÓN DE DATOS HTML

Con el servidor anterior, se dispone de un medio eficaz para el intercambio automático de información "on-line" entre los subsistemas de control y el SE. Para el envío de datos procedentes de análisis externos ("off-line") se ha desarrollado un segundo sistema de transmisión de datos, basado en los lenguajes HTML y PERL. El sistema desarrollado permite el envío de los datos analíticos desde cualquier ordenador con acceso a la red Internet.

Se han escrito dos páginas Web en lenguaje HTML, con la forma de dos formularios: Observaciones microbiológicas (figura 4.43) y Análisis "off-line" (figura 4.44). El operador debe rellenar los datos analizados y apretar el botón marcado como "SEND". Esta acción genera un mensaje codificado mediante la utilización de una rutina escrita en lenguaje PERL. Este mensaje es enviado automáticamente mediante correo electrónico a la estación de trabajo donde se ejecuta el SE. El SE comprueba periódicamente si se han recibido nuevos mensajes, y cuando lo detecta traduce ese mensaje a información numérica y simbólica que utiliza para actualizar los atributos de los objetos correspondientes.

El sistema comprueba la identidad del operador antes de actualizar los atributos de los objetos, con lo que la seguridad del sistema ante entradas no autorizadas está considerada.

En la página correspondiente a análisis "off-line" se incluyen siete puntos de muestreo (entrada, los 4 reactores, salida y recirculación) con 8 posibles parámetros a analizar (DQO, SSV, SST, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-NH₄⁺, N-NT y P-PO₄³⁻) y por último el DSVI.

En la página de observaciones microbiológicas se incluye la abundancia de filamentos (en escala de 0 a 6), su efecto en la estructura, la morfología del flóculo, el porcentaje de flóculos para diferentes rangos de tamaños, la posible observación con tinción de tinta china, la abundancia de diferentes microorganismos filamentosos (en escala de 0 a 6) y la abundancia de otros microorganismos como protozoos y otras especies (en número de individuos por litro). Estos datos son utilizados por el SE para el cálculo del índice biótico de fangos activos (SBI) y para la detección de otros problemas relacionados con los microorganismos.

Pilot Plant Microbiological Observations Data Entry

The data entry consists of 2 steps:

1. Fill in the Form below
2. Press the Send button at the bottom of the page. (Please note, that you cannot make any corrections once you have pressed the Send button.)

Your User ID (only authorized users): _____ Date (dd/mm/yyyy): _____

Select the source:

Characterization and identification of floc and Filamentous microorganisms

1. Filament abundance	<input type="text"/>
2. Filament effect on floc structure	<input type="text"/>
3. Morphology of Floc	<input type="text"/>
4. Floc size (µm) (% in the range)	<input type="text" value="<150"/> <input type="text" value="150-500"/> <input type="text" value=">500"/>
5. India Ink Reverse Stain	<input type="text"/>

6. Filamentous microorganisms

Filamentous	Abundance (0-6)	Filamentous	Abundance (0-6)
Sphaerotilus natans	<input type="text"/>	Nostocoida limicola	<input type="text"/>
Tipo 1701	<input type="text"/>	Tipo 1851	<input type="text"/>
Tipo 0041	<input type="text"/>	Tipo 0961	<input type="text"/>
Tipo 0675	<input type="text"/>	Tipo 0092	<input type="text"/>
Tipo 021N	<input type="text"/>	Haliscomenobacter hydrossis	<input type="text"/>
Thiothrix spp.	<input type="text"/>	Tipo 0914	<input type="text"/>
Beggiatoa spp.	<input type="text"/>	Microthrix parvicella	<input type="text"/>
Nocardia spp.	<input type="text"/>	Tipo 0581	<input type="text"/>
Tipo 1863	<input type="text"/>	Funghi	<input type="text"/>
Other	<input type="text"/>	Zoogloeae/cluster	<input type="text"/>

7. Protozoa, invertebrates and other species.

Swimming ciliates	Abundance (Ind/l)*1e-6	Crawling ciliates	Abundance (Ind/l)*1e-6
Cinetochilum margaritaceum	<input type="text"/>	Aspidisca cicade	<input type="text"/>
Colpidium	<input type="text"/>	Aspidisca lynceus	<input type="text"/>
Cyclidium	<input type="text"/>	Euplates affinis	<input type="text"/>
Glaucocoma	<input type="text"/>	Euplates patella	<input type="text"/>
Paramecium caudatum	<input type="text"/>	Stylonychia	<input type="text"/>
Tetrahymena	<input type="text"/>	Trochilla	<input type="text"/>
Uronema	<input type="text"/>	Chilodonella uncinata	<input type="text"/>
Sathrophilus	<input type="text"/>	Trithigmotome	<input type="text"/>
Other swim cil	<input type="text"/>	Oxytricha	<input type="text"/>
		Acinera uncinata	<input type="text"/>
		Other craw cil	<input type="text"/>
Attached ciliates	Abundance (Ind/l)*1e-6	Carnivorous and omnivorous ciliates	Abundance (Ind/l)*1e-6
Vorticella convallaria	<input type="text"/>	Coleps hirtus	<input type="text"/>
Vorticella aquadulcis	<input type="text"/>	Prorodon	<input type="text"/>
Vorticella microstoma	<input type="text"/>	Spathidium	<input type="text"/>
Carchesium	<input type="text"/>	Plaglocampa	<input type="text"/>
Zoothamnium	<input type="text"/>	Litonothus	<input type="text"/>
Opercularia	<input type="text"/>	Amphleptus	<input type="text"/>
Epistylis	<input type="text"/>	Acineta	<input type="text"/>
Vaginicola	<input type="text"/>	Podophrya	<input type="text"/>
Stentor	<input type="text"/>	Tokophrya	<input type="text"/>
Sprostomum	<input type="text"/>	Other cam omn	<input type="text"/>
Other atta cil	<input type="text"/>		
Metazoa	Abundance (Ind/l)*1e-6	Other	Abundance (Ind/l)*1e-6
Tardigradi	<input type="text"/>	Trechelophyllum	<input type="text"/>
Rotifers	<input type="text"/>	Drepanomonas	<input type="text"/>
Nematode	<input type="text"/>	Other Bacteria	<input type="text"/>
Gastrotrichi	<input type="text"/>	Other Others	<input type="text"/>
Oligocheta	<input type="text"/>		
Other metezoa	<input type="text"/>		

Add comments if necessary (1 line):

Fig. 4.43. Página Web de observaciones microbiológicas

Pilot Plant Offline Data Entry

The offline data registration consists of 2 steps:

1. Fill in the Form below
2. Press the *Send* button at the bottom of the page. (Please note, that you cannot make any corrections once you have pressed the *Send* button.)

Your User ID (only authorized users):

Unit	DATE dd/mm/yyyy	TIME hh:mm	COD mg/L	VSS mg/L	TSS mg/L	N-NO3 mg/L	N-NO2 mg/L	N-NH4 mg/L	TN mg/L	P-PO4 mg/L
Inlet	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactor 0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactor 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactor 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactor 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Settler	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Recycle	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

DATE dd/mm/yyyy	TIME hh:mm	Plant SVI mL/mg
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Add comments if necessary (1 line):

El sistema de transmisión de datos "off-line" implementado permite la construcción de una base de datos centralizada, a la que pueden contribuir diversos operadores, desde diferentes localizaciones.

La centralización de la base de datos permite una utilización más eficiente de la información generada por los diferentes operadores. La información centralizada permite poner a disposición de todo el personal todos los datos más actualizados del sistema.

Fig. 4.44 Página Web de análisis "off-line"

4.5 SISTEMA SUPERVISOR

El SE desarrollado en G2 (versión 4.0), ejecutándose en la estación de trabajo SUN, se encuentra en el extremo superior de la arquitectura del sistema. Actúa como el control principal en un esquema de control supervisor mediante cambios de consignas (Supervisory Setpoint Control, SSC), pero también es capaz de realizar otras acciones de control no incluidas en ese tipo de sistemas como, por ejemplo, desactivar lazos de control locales en algunas situaciones. Este tipo de implementación de SE es usualmente conocido como control experto supervisor [Konstantinov, 1993].

El conocimiento almacenado en la Base de Conocimiento (BC o KB, Knowledge Base) está basado en la experiencia científica previa [R-Roda, 1998; Serra, 1993; Baeza, 1996; Gabriel, 1997; Carrera, 1997; César, 1998], así como en la práctica adquirida en nuestro sistema en particular. Las principales fuentes utilizadas son 'Wastewater Engineering' [Metcalf & Eddy, 1991] y el 'Manual of Nitrogen Control' [EPA, 1993], aunque otros artículos relacionados con el tratamiento de aguas han sido también empleados. La experiencia práctica considerada proviene de entrevistas con los diseñadores y los operadores de la planta. La planta piloto ha estado trabajando continuamente durante

más de 4 años, por lo que se ha encontrado un importante conjunto de reglas heurísticas. Todo este conocimiento está estructurado a través de un conjunto de reglas y procedimientos para cada subsistema de la planta piloto, coordinados por un módulo supervisor.

4.5.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA SUPERVISOR

El sistema está basado en una arquitectura distribuida integrada mediante un supervisor, y es una aplicación particular de arquitecturas previamente definidas [Sánchez, 1994, 1996; Serra, 1994]. El conocimiento está organizado en varios módulos, representando el conocimiento disponible (el previo y el adquirido experimentalmente) para cada subproceso de la EDAR. Esta distribución del conocimiento tiene algunas ventajas, como por ejemplo la obtención de modularidad, y por lo tanto reusabilidad y extensibilidad del sistema, o la obtención de un sistema capaz de manejar la creciente complejidad de los sistemas de inteligencia artificial. Todos los módulos independientes comparten una base de datos común que puede ser usada para el intercambio de información entre ellos.

En la figura 4.45 se representa un esquema de la arquitectura del SE y del sistema de control distribuido. El sistema de control está dividido en

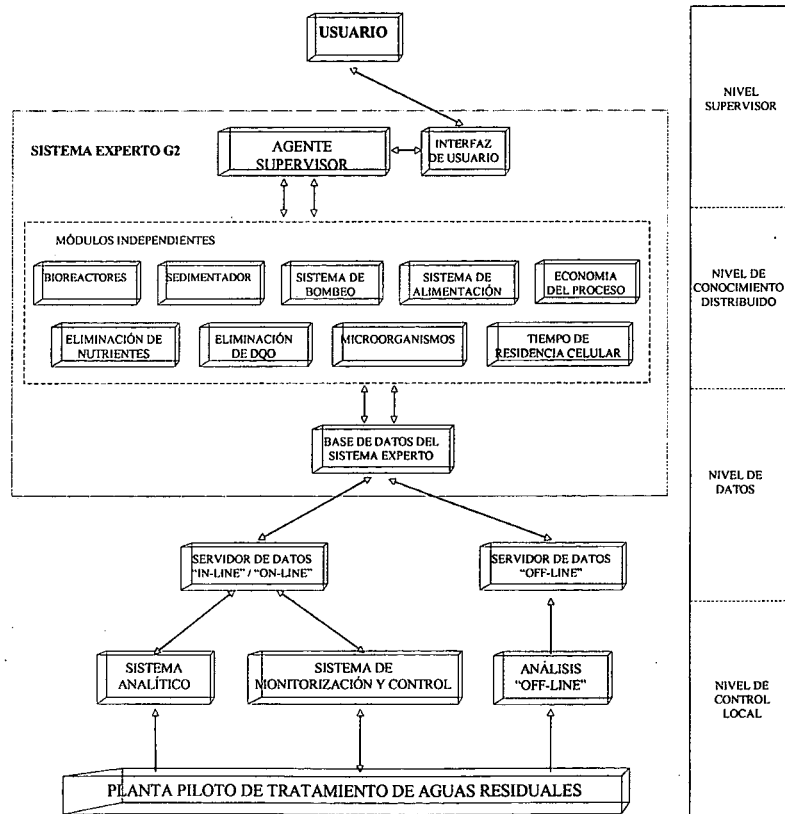


Fig. 4.45. Esquema de la arquitectura del Sistema Experto

cuatro niveles diferentes: nivel de control local, nivel de datos, nivel de conocimiento distribuido y nivel supervisor.

4.5.1.1 NIVEL DE CONTROL LOCAL

La planta piloto fue inicialmente construida y operada con este sistema de control local (apartado 4.3). Este nivel permite el control directo de la planta, con un conjunto de consignas prefijadas, y aplicando principalmente control numérico. La arquitectura física con este control local permite la independencia del sistema de monitorización y control y el SE. Este control puede trabajar sin la presencia del SE, aunque con un conjunto de consignas fijas.

Esta es una mejora importante para el control de una EDAR, aunque no ha sido todavía ampliamente aplicado en EDAR a escala real.

4.5.1.2 NIVEL DE DATOS

Este nivel incluye la transmisión de datos bidireccional entre el control local y el SE (apartado 4.4.1). También incluye la base de datos en tiempo real y los datos de análisis "off-line" obtenidos mediante el sistema de transmisión basado en HTML (apartado 4.4.2).

El nivel de datos utiliza los sistemas de transmisión de datos implementados para asegurar un entorno en tiempo real para el SE. Este nivel no sólo tiene el cometido de la transmisión de datos desde la planta piloto al SE, sino que también está encargado de la transmisión de consignas desde el SE al sistema de control local.

A continuación se muestran los diferentes datos transmitidos entre los subsistemas:

▪ Ordenador de monitorización y control a SE:

Reactores 1, 2 y 3:

pH
T
OD
redox
aireación
agitación
consigna de OD
consigna de agitación
OUR

Planta:

caudal de entrada de agua
caudal de recirculación interna
caudal de recirculación externa

estado entradas PLC (16)
estado salidas PLC (24)
estado de encendido / apagado planta
estado controladores PID OD

tiempo conexión PC-SE
duración purga
intervalo de purga
intervalo dosificación N
intervalo dosificación C
tiempo Flojet encendida
tiempo Flojet apagada

▪ Ordenador de control del sistema analítico a SE:

En los 4 reactores y la salida:

$N-NO_3^-$, $N-NO_2^-$, $N-NH_4^+$

▪ Servidor HTML a SE:

Variables off-line en la entrada, 4 reactores, salida y recirculación: DQO, SSV, SST, $N-NO_3^-$, $N-NO_2^-$, $N-NH_4^+$, $N-NT$ y $P-PO_4^{3-}$

Datos microbiológicos

▪ Consignas enviadas desde el SE:

Reactores 1, 2 y 3:

OD
agitación

Planta:

caudal de entrada de agua
caudal de recirculación interna
caudal de recirculación externa

encendido / apagado planta
encendido apagado controladores PID OD
valor salida PCL726

tiempo conexión PC-SE
duración purga
intervalo de purga
intervalo dosificación N
intervalo dosificación C
tiempo Flojet encendida

Se ha implementado la transmisión de datos de las variables indicadas, pero los sistemas de transmisión de datos desarrollados permiten una fácil ampliación con nuevas variables.

4.5.1.3 NIVEL DE CONOCIMIENTO DISTRIBUIDO

En este nivel, varios módulos independientes dentro del SE se encargan de una parte de la planta piloto. Actúan como módulos independientes, aplicando algoritmos numéricos y reglas cuando la situación es normal y se está controlando un parámetro del proceso sencillo. Estos parámetros son generalmente modificados mediante razonamiento dirigido por datos ('Forward Chaining') cuando llegan nuevos datos a la base de datos en tiempo real.

Cuando un módulo es incapaz de manejar una situación detectada, o cuando un parámetro complejo tiene que ser calculado, el módulo supervisor requiere información a los módulos necesarios y deduce la acción correcta de control que debe realizarse. Los módulos pueden ser desactivados total o parcialmente por el módulo supervisor. Esto garantiza que aunque los módulos sean independientes, la supervisión y el control sobre ellos pueda realizarse.

El número actual de módulos es diez, aunque pueden integrarse módulos adicionales. Los actuales son

Bioreactores, Sistema de Bombeo, Sistema de Alimentación, Economía del Proceso, Eliminación de DQO, Eliminación de Nutrientes, Microorganismos y Tiempo de Residencia Celular, Analizadores y Base de Datos.

4.5.1.4 NIVEL DE CONTROL SUPERVISOR

El módulo supervisor es el director y control principal del sistema distribuido. Recibe la información requerida de los módulos independientes y concluye si una acción de control supervisor es necesaria. Si no se requiere ninguna acción, el módulo mantiene activos los algoritmos y reglas. Este módulo también controla parámetros operacionales complejos que implican información generada por diferentes módulos.

El módulo supervisor permite el intercambio de datos entre el usuario y el SE, mediante la interfaz de usuario. Esta interfaz incluye la monitorización gráfica de los datos adquiridos o estimados y un submódulo explicativo que permite el seguimiento del camino utilizado para llegar a una determinada conclusión del SE. Este submódulo es muy útil para la validación del SE.

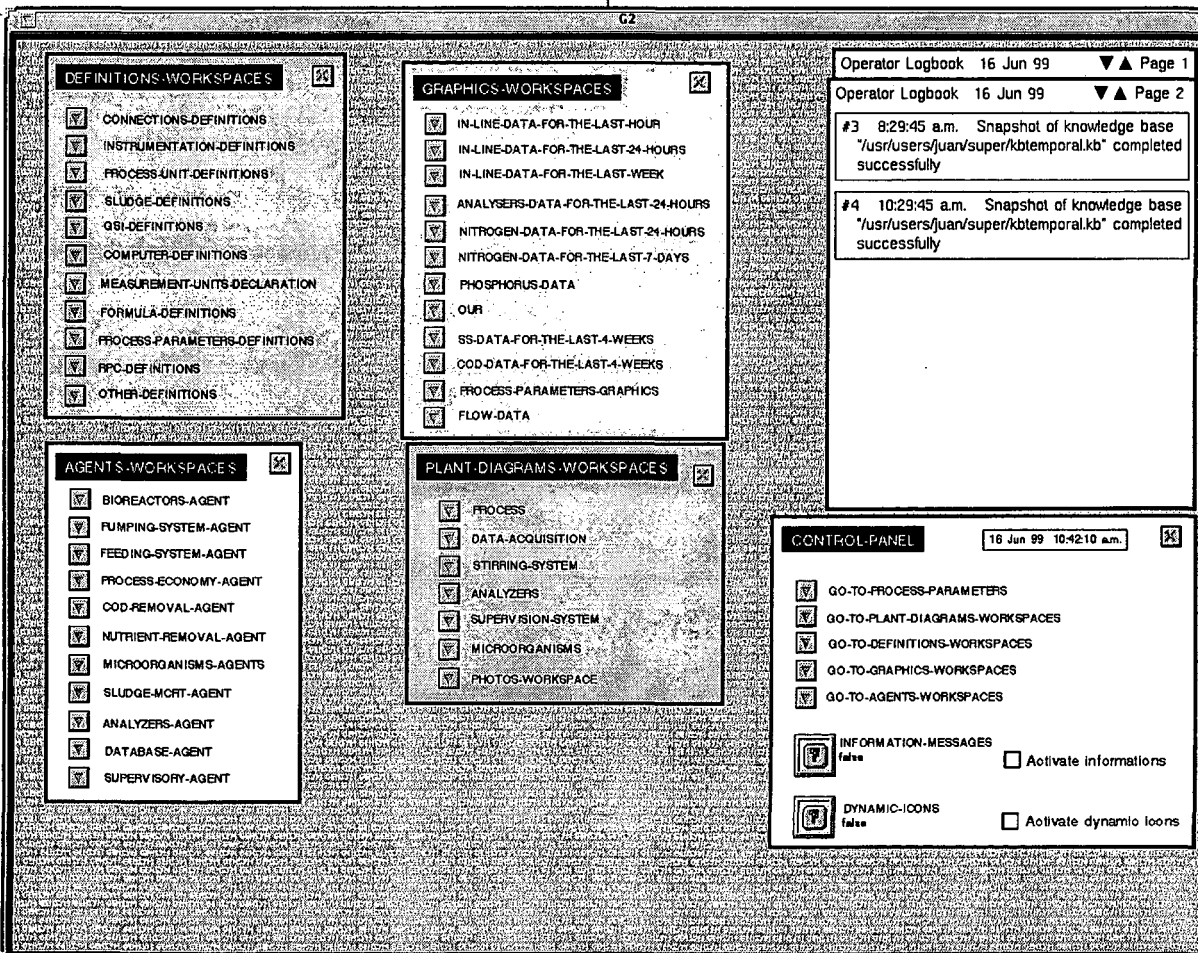


Fig. 4.46. Hojas de trabajo principales del sistema experto

4.5.2 SISTEMA EXPERTO

4.5.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

El SE desarrollado ha sido estructurado sobre hojas de trabajo (Workspaces) sobre las que se pueden crear y mantener los objetos. Los objetos sobre las hojas de trabajo son capaces de tener sus propias hojas de trabajo secundarias, por lo que se puede crear una jerarquía de objetos y hojas de trabajo para agrupar y organizar los datos. En nuestro prototipo las hojas de trabajo principales son Definición de Objetos, Diagramas de la Planta, Monitorización Gráfica y Módulos. Las hojas principales están subdivididas en diferentes hojas de trabajo, manteniendo una estructura organizada. En la figura 4.46 se pueden observar las hojas principales, además del Panel de Control, que permite el acceso directo a diferentes hojas de trabajo.

La representación del conocimiento en G2 se mantiene y extiende mediante clases, definidas en G2 mediante 'object definitions'. Las principales clases consideradas incluyen unidades de proceso, conexiones, instrumentación, microorganismos, ordenadores, GSI y parámetros de proceso. En la

figura 4.47 se pueden observar las hojas de trabajo donde se han definido las clases dentro de los grupos comentados.

Cada objeto es una instancia de una clase, que se define mediante una definición de objeto. La figura 4.48 presenta el diagrama del proceso de la planta piloto en el SE con algunos de los objetos definidos, sus iconos correspondientes y las conexiones entre objetos.

Las definiciones de objetos están estructuradas jerárquicamente, aprovechando las características de G2 como sistema de desarrollo orientado a objeto. Esta característica permite definir una clase basándose en clases anteriores. La nueva clase definida (clase hija) hereda los atributos de la clase original (clase padre), y se le pueden añadir nuevos atributos que sirven para especificar y diferenciar la nueva definición.

En las figuras 4.49 y 4.50 se detalla la estructura jerárquica de definiciones para las unidades de proceso (4.49) y para la instrumentación del sistema (4.50). En la figura 4.51 se ofrece una visión general de la estructura jerárquica de todas las clases utilizadas en el SE.

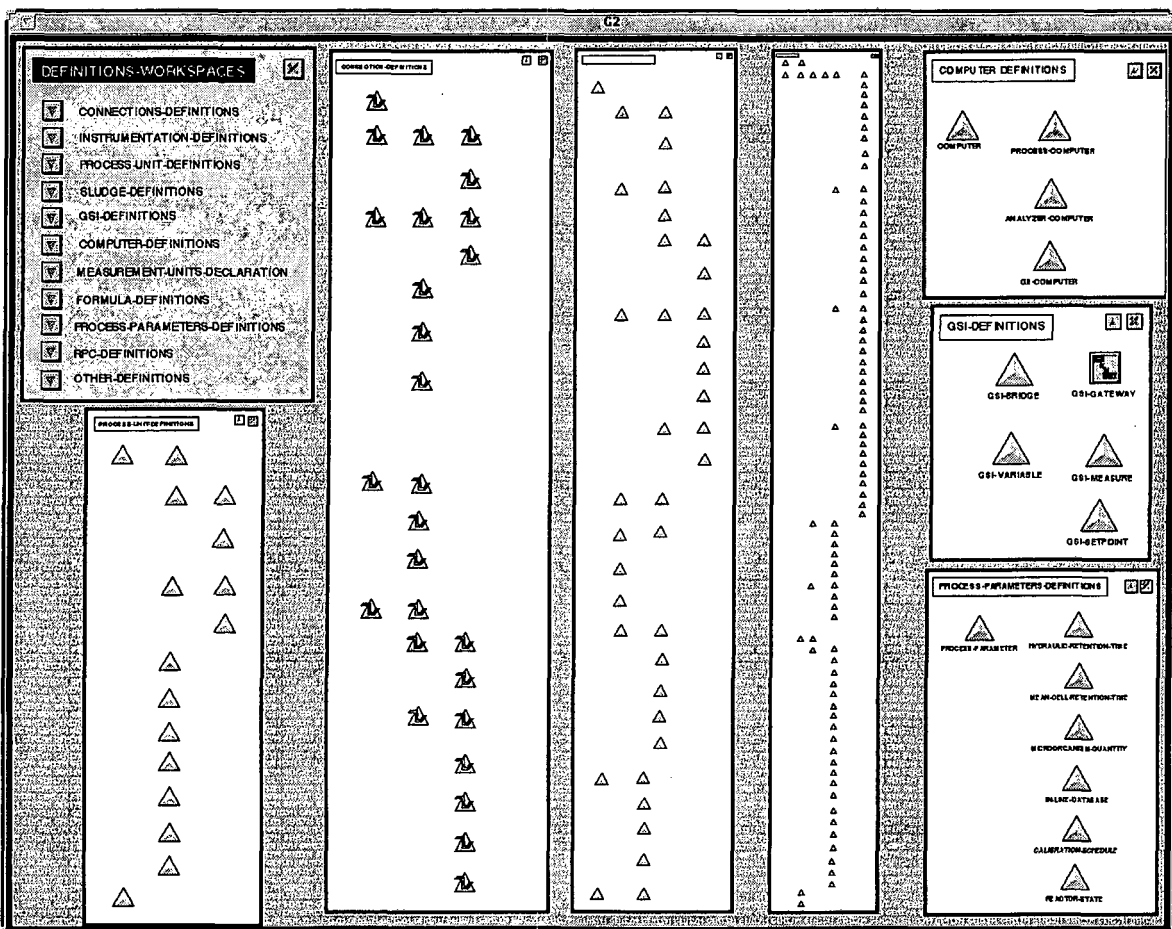


Fig. 4.47. Definiciones de los objetos del sistema experto

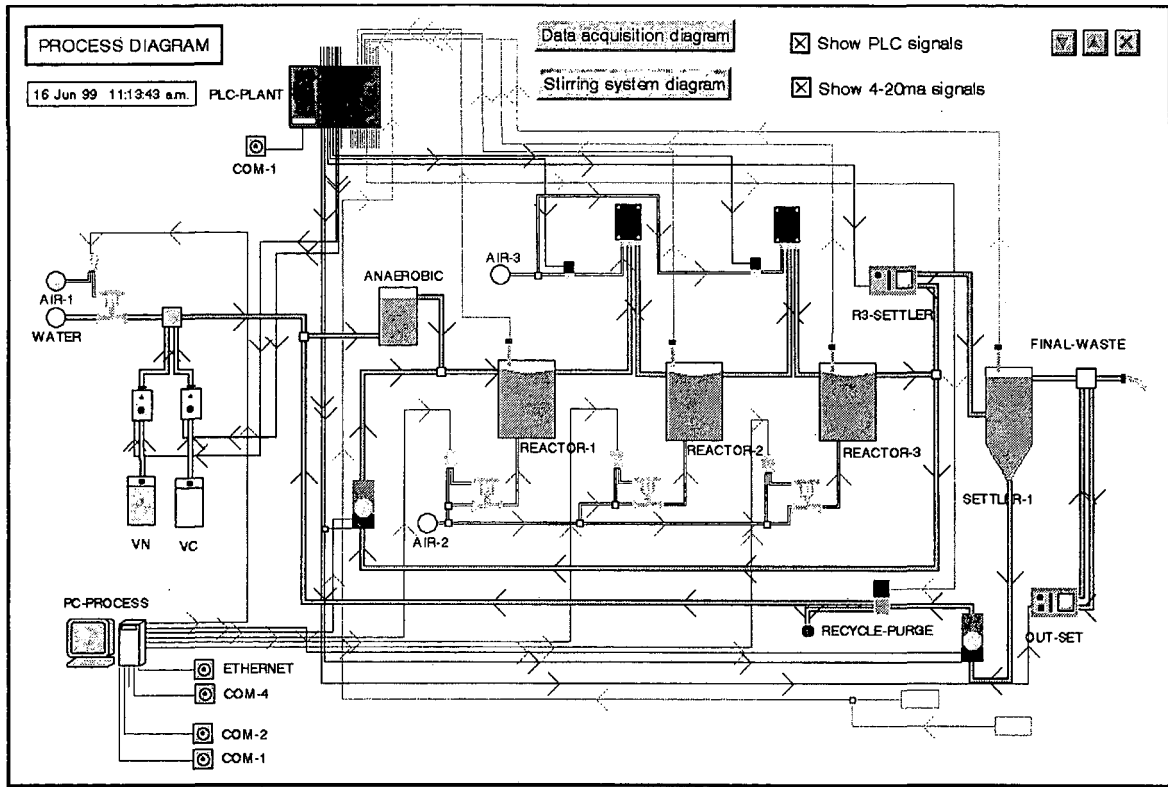


Fig. 4.48. Diagrama de proceso de la planta piloto en el sistema experto, con algunas de las definiciones

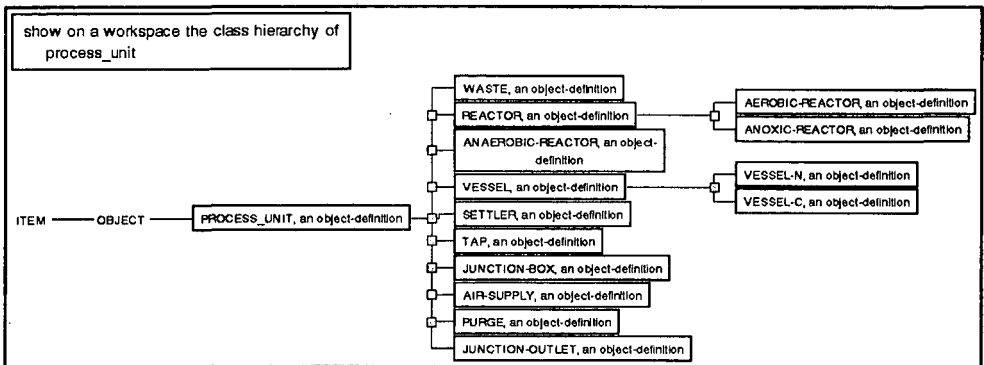


Fig. 4.49. Estructura jerárquica de definiciones para las unidades de proceso

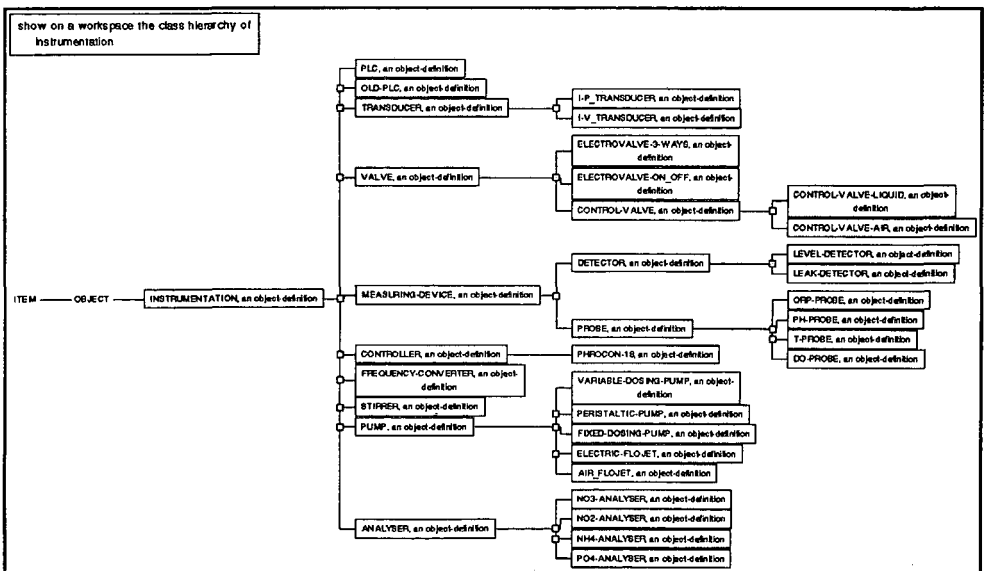


Fig. 4.50. Estructura jerárquica de definiciones para la instrumentación

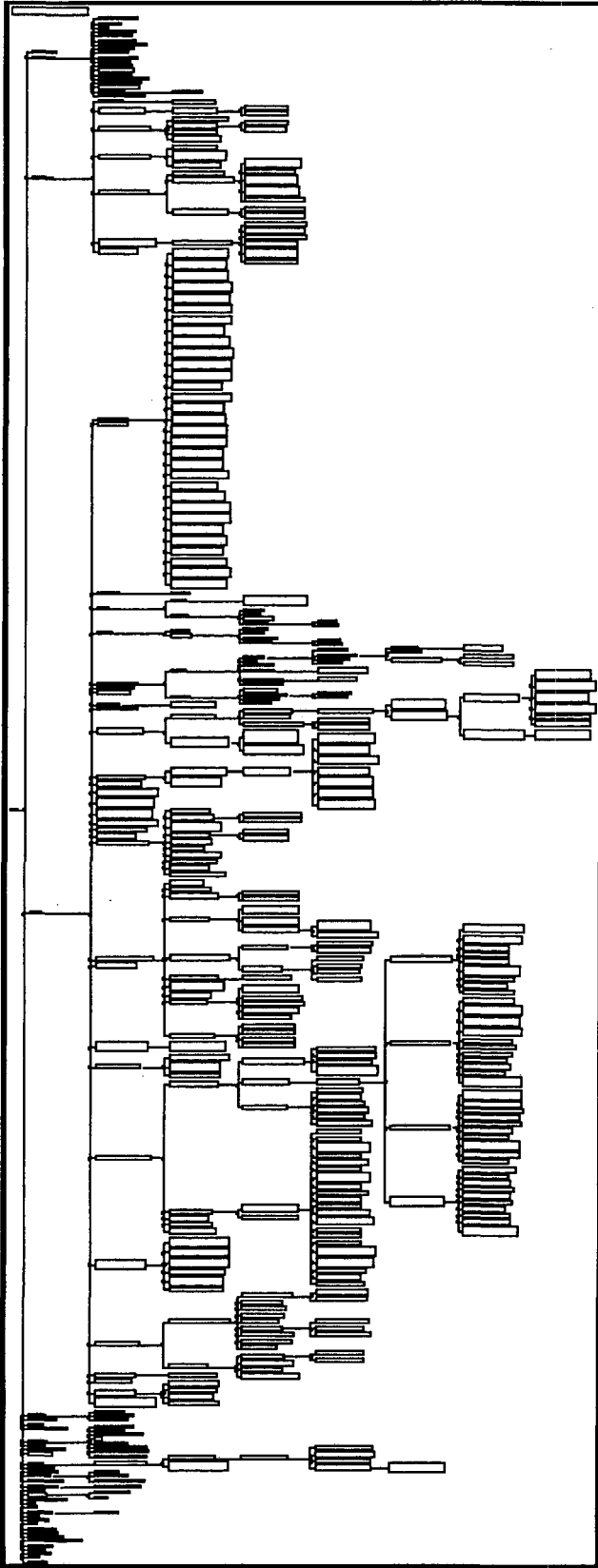


Fig. 4.51. Estructura jerárquica de todas las clases utilizadas en el sistema experto desarrollado

Los objetos definidos contienen atributos específicos para cada clase y una definición de icono que representa a las instancias de cada clase. En la figura 4.52 puede observarse la interfaz de diagramas de diferentes subsistemas del proceso: planta piloto, sistema de adquisición de datos de las sondas, sistema de agitación, sistema analítico y sistema supervisor. Los iconos que aparecen son los objetos creados a partir de las definiciones de clases. Dentro de cada objeto se incluyen los atributos definidos en la definición de clase, con los valores actuales proporcionados por el motor de inferencia del SE.

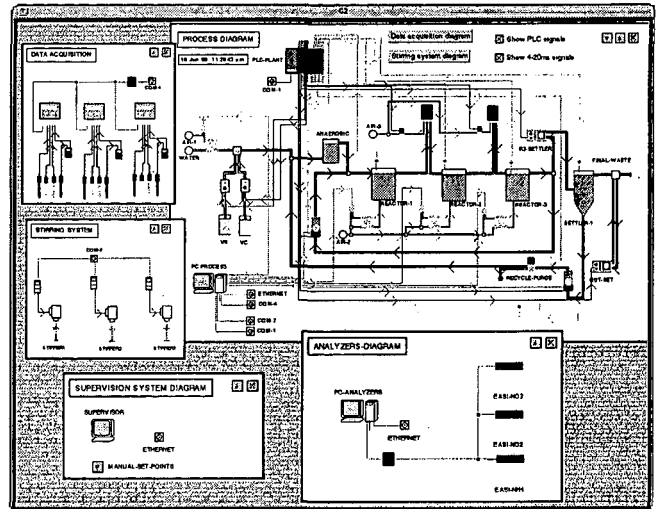


Fig. 4.52. Diagramas de los subsistemas del proceso

En la figura 4.53 se muestra una imagen del SE con las diferentes hojas principales de cada uno de los módulos en que se divide. Estos módulos serán comentados posteriormente en esta misma sección (apartados 4.5.2.3 a 4.5.2.14).

Por último, en la tabla 4.2 se muestran algunos datos referentes al número de elementos desarrollados que conforman el SE.

	Número de elementos en la aplicación
Objetos	1389
Clases	261 (92 predefinidas)
Procedimientos	45
Reglas	319
Variables o parámetros	686
Hojas de trabajo	242

Tabla 4.2. Elementos que conforman el SE

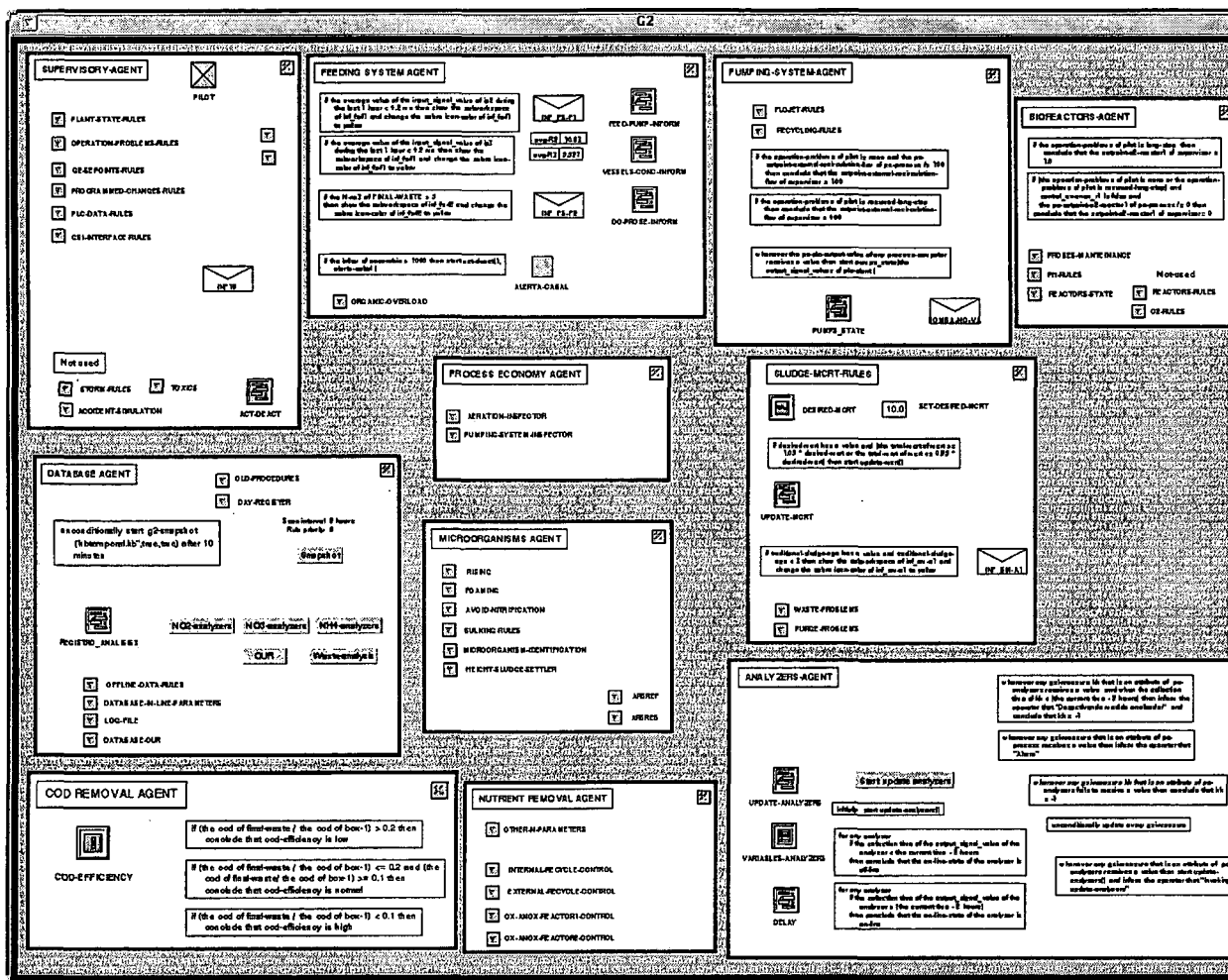


Fig. 4.53. Hojas de trabajo principales de cada módulo

4.5.2.2 MONITORIZACIÓN GRÁFICA

Dentro del diseño del SE, un apartado muy importante es la monitorización gráfica de todas las variables adquiridas y calculadas.

En la monitorización desarrollada, se incluyen diferentes pantallas, que son mostradas a continuación. En la figura 4.54 se pueden observar las variables “in-line” proporcionadas por el programa de monitorización y control de la planta (pH, temperatura, redox, oxígeno disuelto, agitación y aireación) en dos de las escalas disponibles, una hora y una semana.

En la figura 4.55 se muestran los datos de análisis “on-line” y “off-line” (nitrógeno, fósforo, DQO y sólidos en suspensión). También se muestran dos gráficas (parte inferior izquierda) donde aparecen los caudales “in-line” y algunos parámetros del proceso calculados.

Posteriormente, se puede observar la figura 4.56 una pantalla donde se muestran los valores de algunos de los parámetros de proceso calculados, indicando en cada caso el periodo de validez de la medida. Cada parámetro calculado tiene un intervalo de validez prefijado. Si se quiere construir un SE robusto, en todos los cálculos y reglas debe considerarse si la variable utilizada está o no dentro de su intervalo de validez.

Por último se presenta en la figura 4.57 la gráfica de la velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos. Se muestran dos gráficas diferentes, correspondientes a la medida sin filtrar y a la medida filtrada con una ventana móvil de 1 hora de duración.

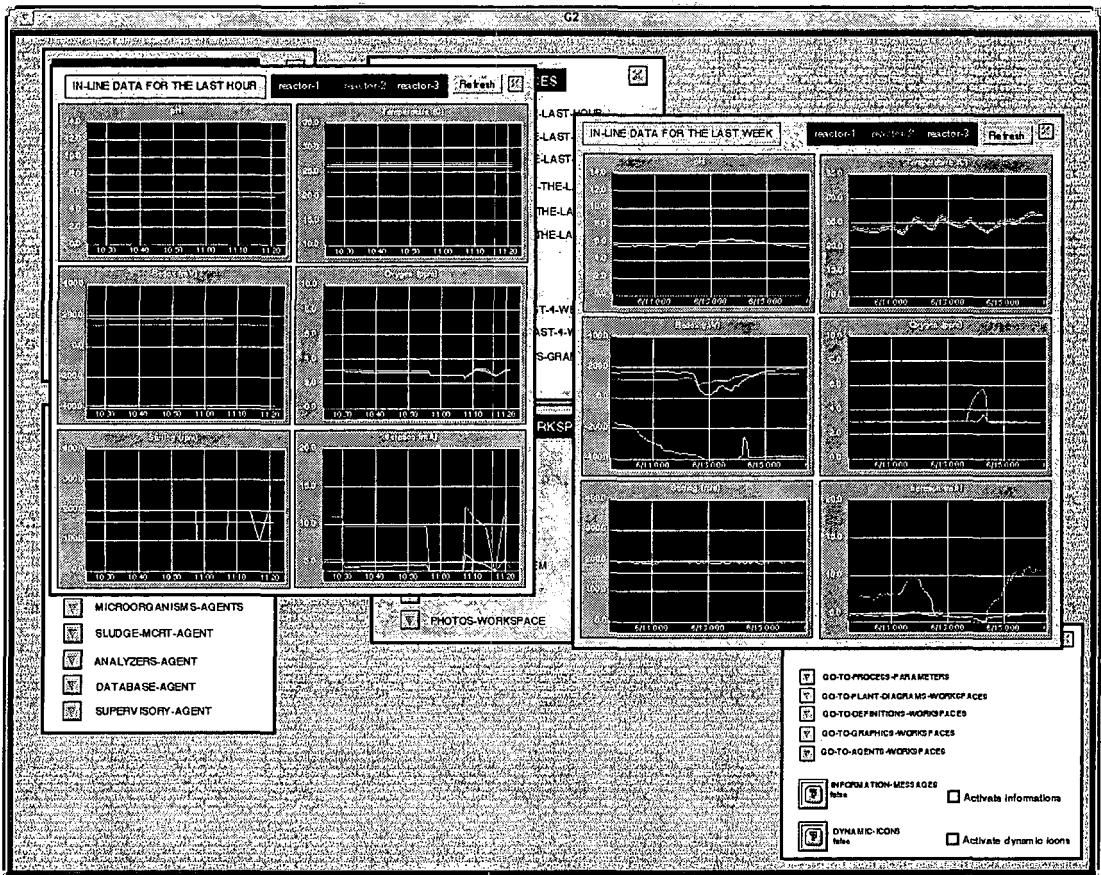


Fig. 4.54. Gráficas de variables “in-line” del proceso

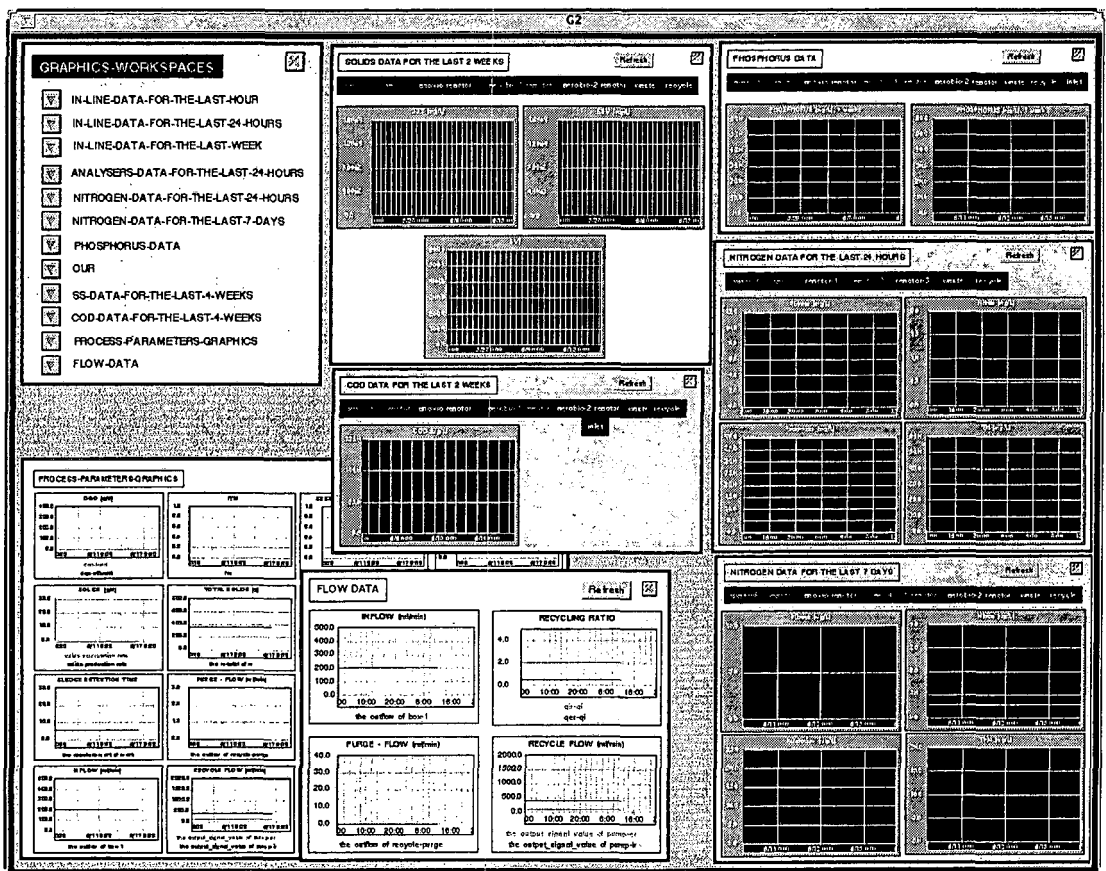


Fig. 4.55. Gráficas de las variables “on-line” y “off-line” y de parámetros del proceso

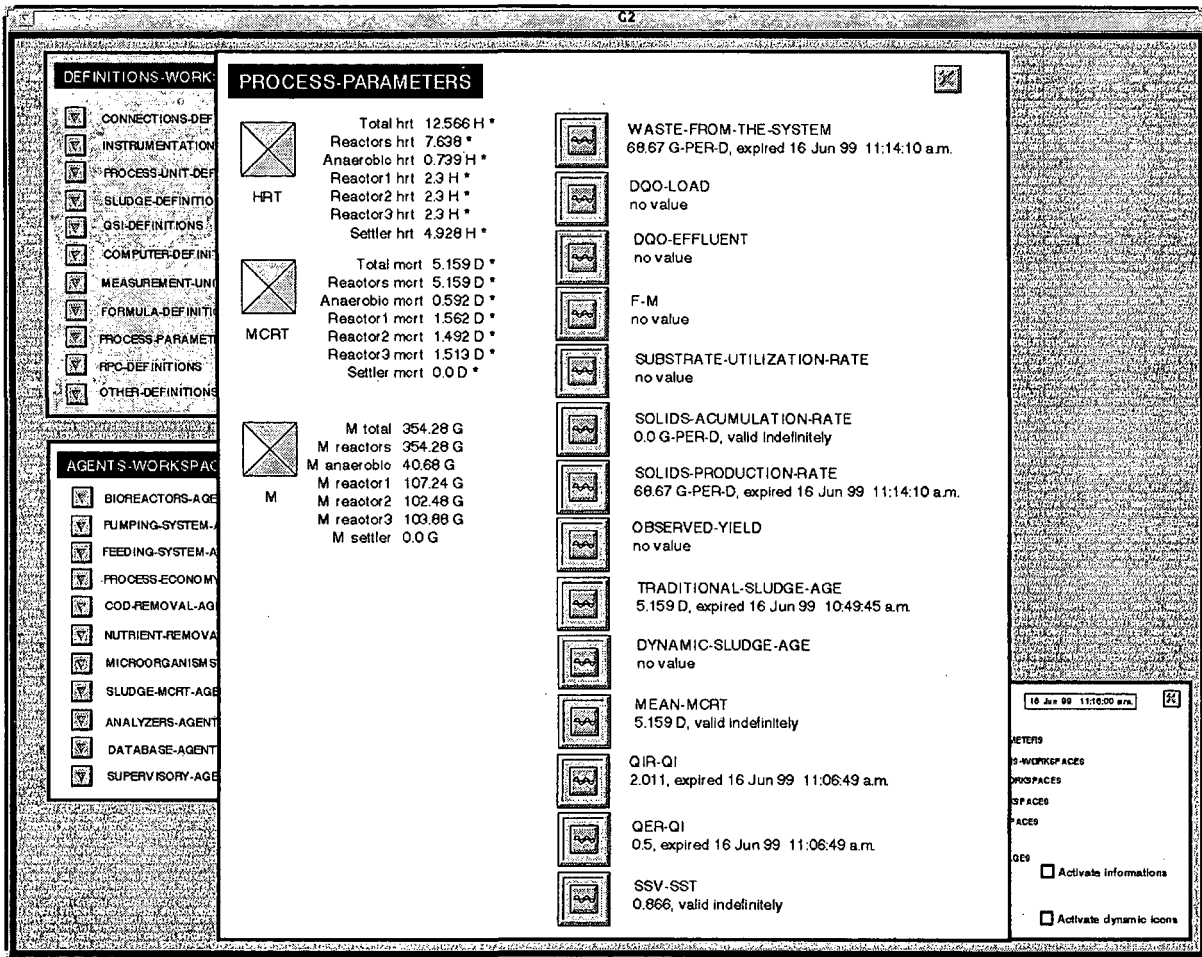


Fig. 4.56. Parámetros del proceso calculados

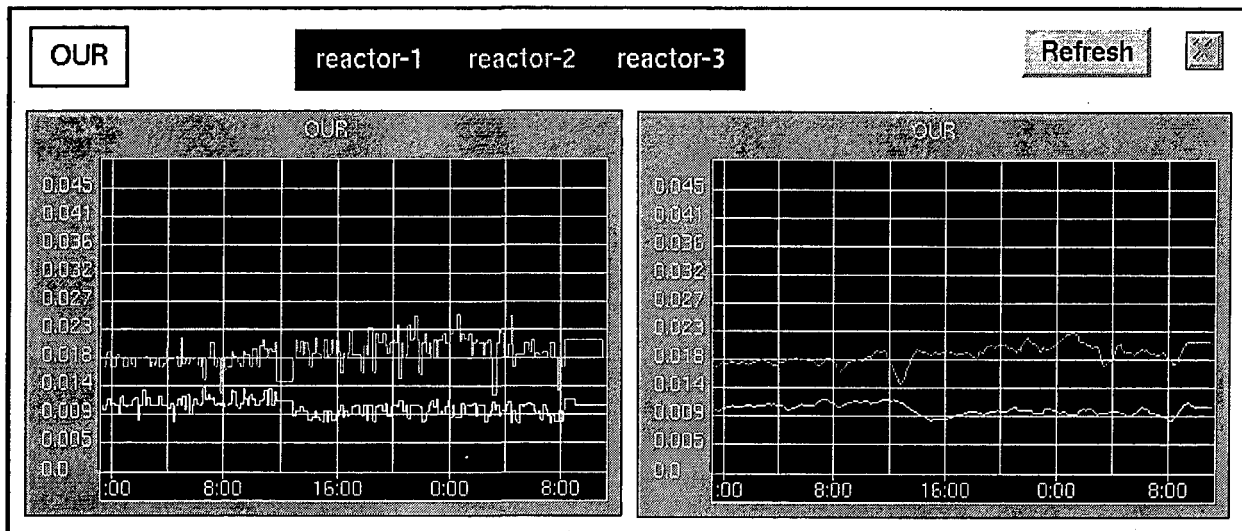


Fig. 4.57. Evolución de la OUR en los reactores aeróbicos (valor sin filtrar y filtrado)

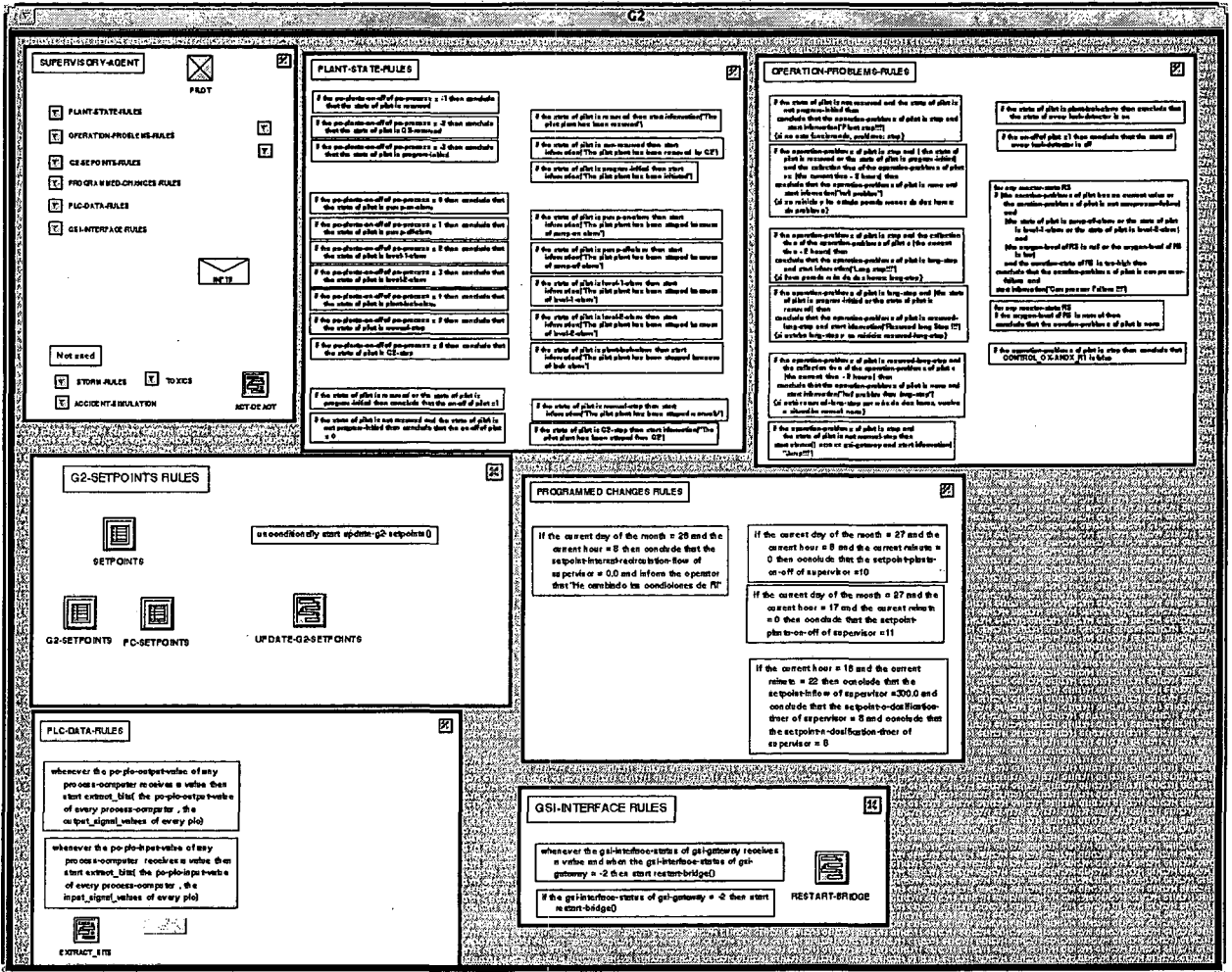


Fig. 4.58. Hojas de trabajo principales del módulo supervisor

4.5.2.3 MÓDULO SUPERVISOR

El módulo supervisor es el director y control principal del sistema distribuido. En la figura 4.58 se muestran las hojas de trabajo principales que conforman el módulo.

Este módulo determina el estado general de la planta piloto en función de la información de estado enviada por los diferentes módulos. Cuando aparece algún problema de operación, muestra un mensaje al usuario, indicando el problema aparecido en la planta y las posibles causas del problema. En algunos casos actúa automáticamente para evitar que un problema aparecido lleve al sistema a un estado inestable. Por ejemplo, cuando la planta tiene que parar por alguna alarma, y la parada supera las dos horas de duración, cambia el estado del reactor 1 de anóxico a aeróbico. Esto proporciona oxígeno a los microorganismos nitrificantes de ese reactor, evitando su inhibición por estar demasiado tiempo en condiciones anaeróbicas. También evita la aparición de condiciones anaeróbicas en el reactor, lo que puede hacer cambiar la relación de población de especies en la planta.

El sistema también es capaz de detectar problemas de operación como por ejemplo el fallo del compresor general. Si el nivel de aireación es alto, pero el oxígeno detectado es muy bajo no se está aportando el aire necesario. Esto sucede cuando el compresor general, que proporciona aire comprimido a todo el sistema, ha sufrido una parada. En este caso no se puede realizar ninguna acción correctora, por lo que únicamente se avisa al operador del incidente.

El módulo también se encarga de comprobar que las consignas enviadas por el SE al ordenador de control sean correctas. Si el SE ha fijado una consigna y el operador la cambia localmente, el SE vuelve a fijar la consigna establecida.

Otra tarea encargada al 'Supervisor' es la comprobación que el sistema de adquisición de datos GSI se encuentra operativo, y que no existen problemas de transmisión de datos, lo que aislaría al SE de su entorno en tiempo real.

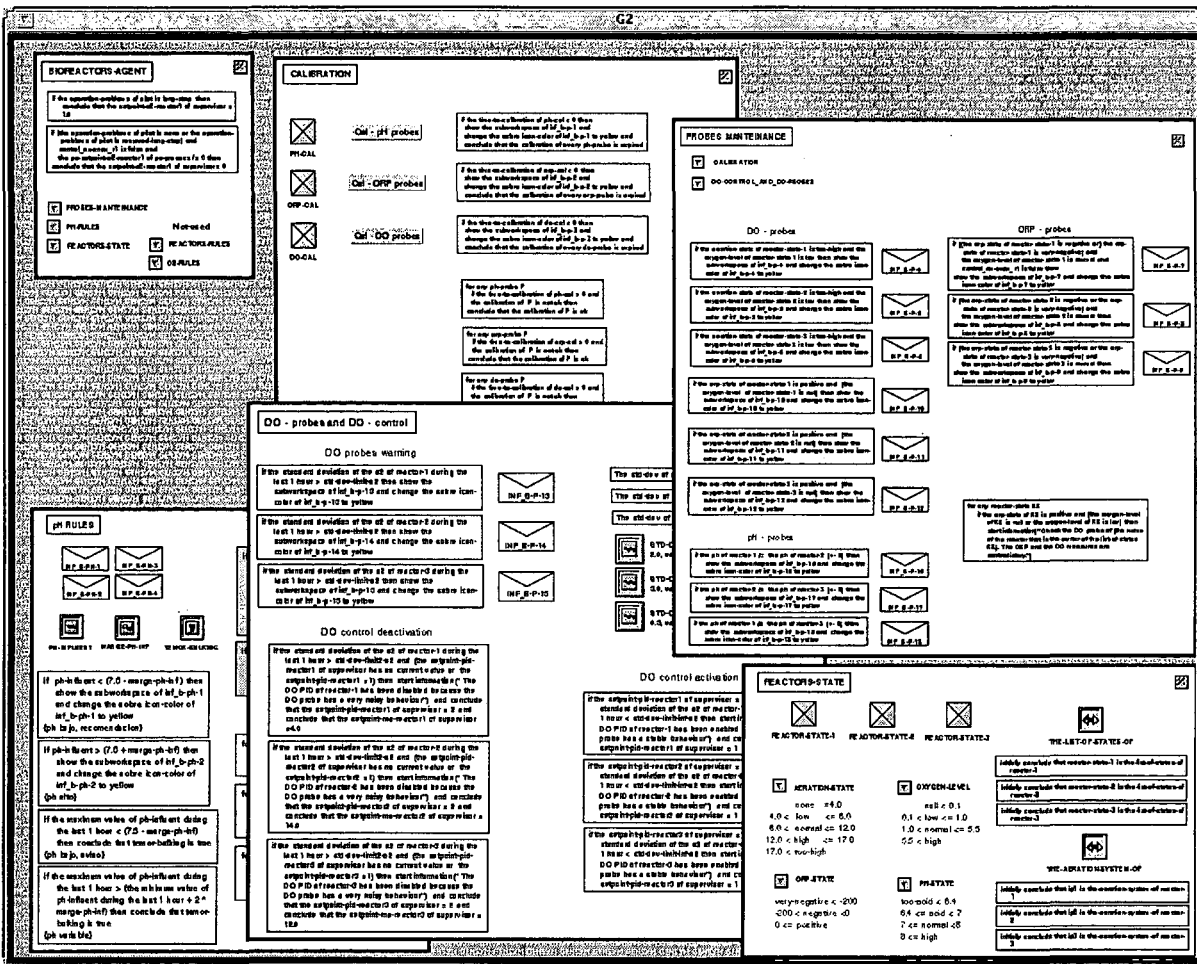


Fig. 4.59. Hojas de trabajo principales del módulo de los bioreactores

4.5.2.4 MÓDULO DE LOS BIOREACTORES

Este módulo supervisa la operación en los bioreactores, especialmente el comportamiento de los subsistemas de aireación, agitación y sondas. En la figura 4.59 se muestran las hojas de trabajo principales del módulo.

También se encarga de validar los datos proporcionados por el sistema de control de la planta piloto y por el sistema de análisis. La validación consiste en el chequeo de la medida con diferentes criterios: el valor debe estar en un intervalo predefinido, la velocidad de cambio no debe ser demasiado rápida o lenta y las medidas no deben estar en discrepancia con otros datos relacionados.

Todas las comparaciones entre los valores de las sondas se realizan mediante valores difusos determinados mediante ciertos rangos (ver figura 4.59, extremo inferior derecho), lo que permite hacer comparaciones no numéricas entre medidas. Por ejemplo se pueden construir reglas como la siguiente: si el redox del reactor X es positivo y el oxígeno del reactor X es nulo, entonces muestra el aviso N.

En este módulo se comprueba el estado de las sondas del sistema, siguiendo diferentes criterios para comprobar la validez de su medida. En primer lugar se comprueba la validez del calibrado de la sonda, es decir si ha transcurrido más de una semana desde el último calibrado. Se ha comprobado experimentalmente que, en general, las sondas mantienen una medida correcta durante una semana. Cuando se sobrepasa este periodo, el SE avisa que las medidas pueden no ser fiables, recomendando la calibración.

En el caso del pH, también se comprueba que la señal proporcionada por las tres sondas no sea muy diferente. En los procesos implementados no se producen grandes variaciones de pH en los reactores, por lo que eso indicaría problemas de funcionamiento en alguna de las sondas.

Para el potencial redox, se compara esta medida con la de oxígeno disuelto. En condiciones normales, un valor muy negativo de redox no es compatible con un valor diferente de cero de oxígeno disuelto. Esto indicaría que la sonda de redox no está midiendo el líquido mezcla, sino una medida producida por los lodos acumulados en la sonda.

Las medidas de las sondas de oxígeno también son comparadas con las de redox para detectar problemas. En las condiciones de la planta, un valor de redox bastante positivo no es compatible con un valor de oxígeno disuelto cercano a cero. Esto suele suceder cuando se acumulan lodos en la sonda de oxígeno, lo que produce medidas incorrectas, que conducen a un exceso de aireación sobre el sistema.

Las sondas de oxígeno se comprueban también de otro modo, para asegurar el funcionamiento correcto del control de oxígeno. Si las membranas de las sondas de oxígeno presentan algún daño, se produce un comportamiento bastante oscilante de la medida, debido a la entrada de aire dentro del sensor. Si el control de oxígeno está activo se produce un comportamiento muy oscilatorio de las válvulas de aireación. Para detectar estos casos se calcula la desviación estándar de la medida. Cuando ésta supera determinado valor, se avisa al operador del problema encontrado. Si la medida supera un segundo límite, el control PID que regula el oxígeno disuelto en el reactor es desactivado, y se opera de forma fija. Para ello se envía al sistema de control de la planta piloto la orden de parada del control PID del reactor correspondiente y una consigna de aireación fija, basada en un valor habitual de aireación en las condiciones del experimento. En ocasiones la sonda vuelve a funcionar normalmente sin realizar un nuevo calibrado. En estos casos la desviación estándar recupera valores normales. Si el valor es inferior a un límite determinado, el módulo reactiva el control de oxígeno del reactor, por lo que se vuelve al modo de operación normal.

4.5.2.5 MÓDULO DEL SISTEMA DE BOMBEO

Supervisa la operación y el programa de mantenimiento de las bombas utilizadas en la planta piloto. Un problema con alguna bomba produce una perturbación en todo el proceso porque la planta debe parar. En estas condiciones, un diagnóstico temprano es de gran ayuda para la estabilidad de todo el proceso. Este módulo también se encarga de mantener las condiciones adecuadas de relación de recirculación (figura 4.60). Puede trabajar con diferentes estrategias, como por ejemplo caudal constante o relación de recirculación constante. También puede recibir consignas del módulo 'Supervisor' si algún módulo concluye que se requiere.

Otra tarea es la optimización del funcionamiento de las bombas neumáticas Flojet. Estas bombas proporcionan un caudal muy elevado y son capaces de bombear aire, por lo que es necesario temporizarlas. Esto evita la entrada de aire excesiva producida por el bombeo excesivo, así como alarga su duración. El tiempo de funcionamiento se calcula en función de la capacidad de la bomba y del caudal

entre los reactores. Este es un valor variable, que depende de la entradas y de las recirculaciones, por lo que es un valor que se debe optimizar automáticamente.

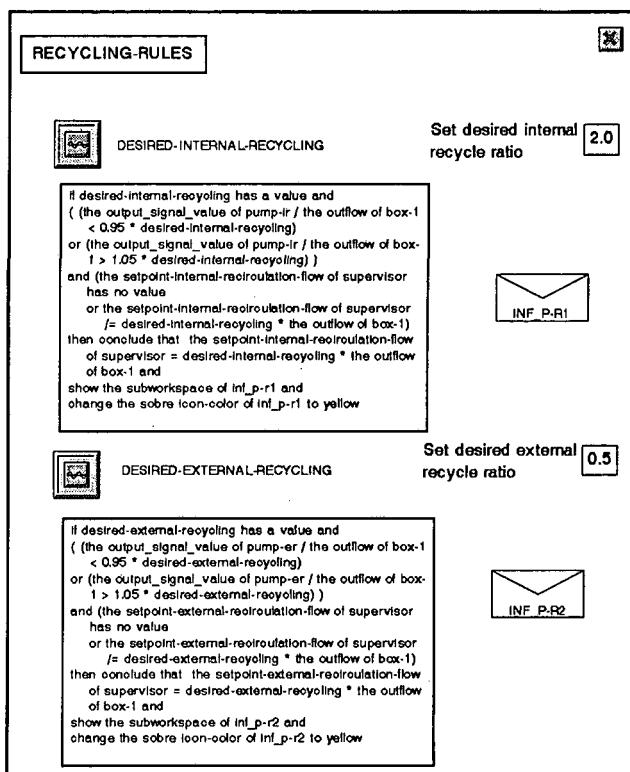


Fig. 4.60. Reglas para la regulación del caudal de las bombas dosificadoras en función de la relación de recirculación

4.5.2.6 MÓDULO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Este módulo supervisa el sistema automático de alimentación. También integra el volumen y concentración de los compuestos alimentados a la planta piloto. Este módulo estima el volumen de concentrado usado, avisando al operador cuando el depósito de concentrado debe rellenarse.

También ofrece avisos de funcionamiento en función de variables del proceso como la aireación. Por ejemplo (figura 4.61), cuando detecta una baja aireación en el sistema informa al operador de tres posibles causas: se ha terminado el concentrado de alimento de los depósitos, las bombas dosificadoras de alimento tienen algún problema de funcionamiento (por ejemplo si se han descebado) o la sonda de oxígeno proporciona una señal errónea. Los avisos permiten mostrar el problema en forma gráfica, indicando mediante fotografías el origen del problema.

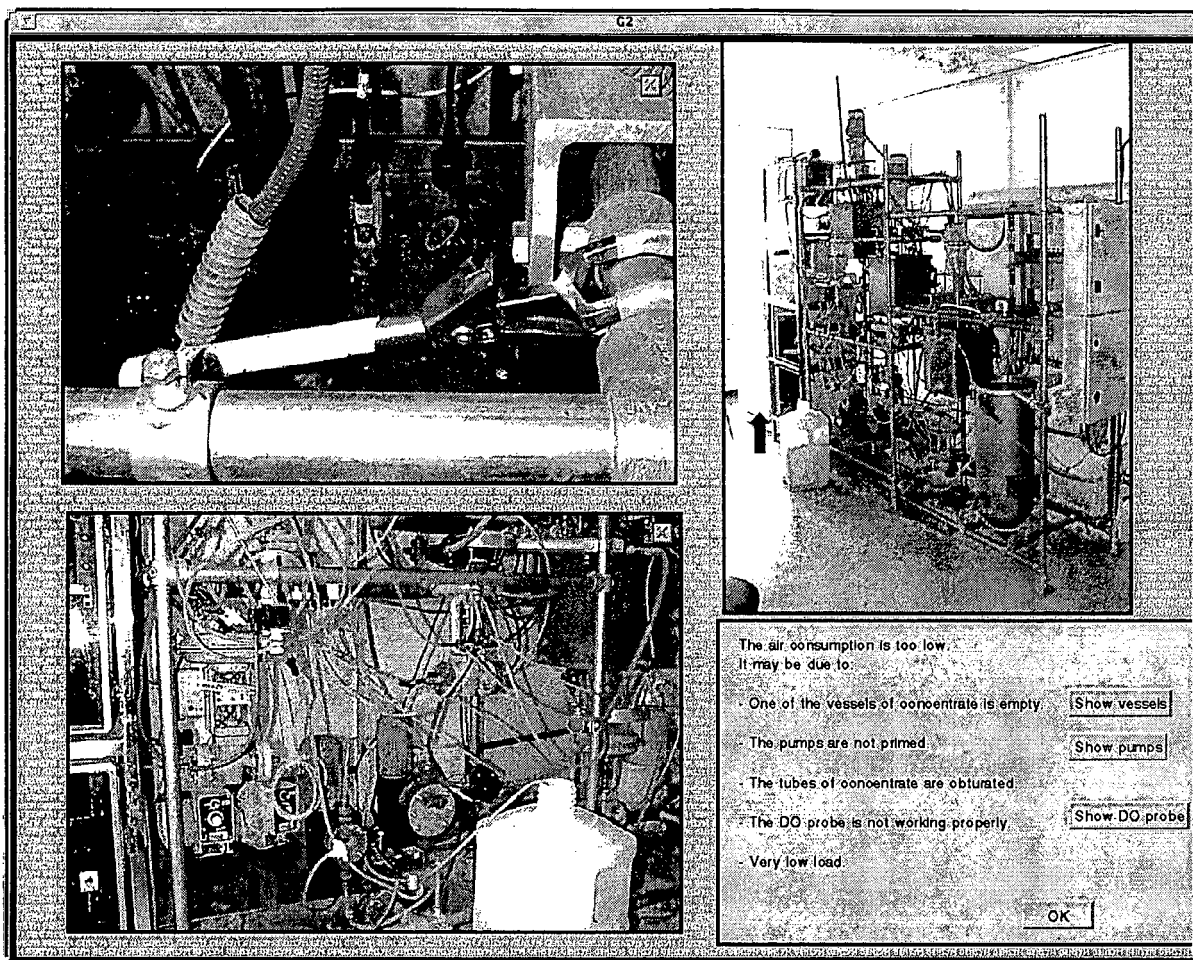


Fig. 4.61. Avisos de funcionamiento del sistema de alimentación automático

4.5.2.7 MÓDULO DE ECONOMÍA DEL PROCESO

En todas las EDAR la economía debe ser considerada. En algunas situaciones, las restricciones principales de operación en la planta provienen del punto de vista económico, por lo tanto, debe ser considerado cuando sea necesario. Este módulo es principalmente asesor, mostrando diferentes mensajes al operador con el propósito de mantener el rendimiento de operación de la planta disminuyendo el consumo total de energía. Este consumo viene determinado principalmente por la aireación, la agitación y las recirculaciones establecidas, aunque otros factores como la concentración de biomasa en el sistema también pueden afectar.

4.5.2.8 MÓDULO DE ELIMINACIÓN DE DQO

La eliminación de materia orgánica es la tarea más importante en las EDAR. Esta eliminación debe satisfacer requerimientos legales y debe ser supervisada para asegurar su cumplimiento. Algunas situaciones predefinidas, como sobrecarga o baja

carga, pueden ser detectadas y el módulo puede aplicar las acciones de control programadas para evitar futuros problemas. Utilizando la información proporcionada por el módulo de alimentación, puede estimar la relación F/M (Food / Microorganisms) y avisar cuando esta relación puede provocar problemas en la planta.

El valor de OUR medido también puede ser de ayuda para detectar situaciones de alta y baja carga, cuando no se dispone información del módulo de alimentación. Por ejemplo, cuando se detecta un alto consumo de oxígeno en los reactores aeróbicos, puede ser un aviso de alta carga a la entrada. La acción correctora implementada en nuestro caso es el incremento de la relación de recirculación externa para mantener una adecuada relación F/M. El módulo manda las órdenes necesarias al módulo del 'Sistema de Bombeo', quien modifica la consigna de caudal de recirculación externa en función de la relación de recirculación fijada. El control clásico basado en lazos de control locales no es capaz de tratar eficientemente con situaciones como esta que implican la relación entre diferentes informaciones generadas por la planta.

4.5.2.9 MÓDULO DE ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES

La eliminación de nitrógeno y fósforo es un nuevo requerimiento para las EDAR. Los procesos implicados son más complicadas que los necesarios para la eliminación de DQO. La combinación de la eliminación de DQO, fósforo y nitrógeno produce nuevos problemas en un marco más complejo.

En la figura 4.62 se muestran las hojas de trabajo principales de este módulo.

El módulo está dividido en varias secciones:

- Control anóxico / aeróbico del reactor 1
- Control anóxico / aeróbico del reactor 2
- Control de la relación de recirculación interna
- Control de la relación de recirculación externa

Estas estrategias de operación y control implementadas en el sistema experto vienen determinadas por las capacidades de la planta piloto. Se han programado de tal modo que cada sección es independiente, los parámetros modificados en una sección no son variados en las restantes. Esto

permite mantener un comportamiento estable de los subsistemas de control, y una activación y desactivación independientes.

Estos parámetros de operación nos permiten modificar el comportamiento de la planta piloto y mejorar su rendimiento de eliminación si son modificados en las circunstancias adecuadas.

- **Consigna de oxígeno disuelto en el reactor 1.** En una configuración estándar de la planta piloto este es un reactor que trabaja en condiciones anóxicas, es decir, con una consigna de oxígeno disuelto de 0 mg/l. En determinadas circunstancias, este reactor puede funcionar en condiciones aeróbicas y anóxicas cíclicamente. Para realizar estos ciclos, el sistema experto cambia la consigna de oxígeno disuelto en el reactor 1 de 0 mg/l a 3 mg/l cíclicamente. Para la utilización de este módulo se definen las siguientes variables: duración del ciclo aeróbico, duración del ciclo anóxico y valor límite de nitrógeno amoniacal en el efluente. Cuando el valor medido supera este límite la variable 'Sobrecarga_amonio' toma un valor verdadero. Este cambio provoca el inicio de los ciclos de

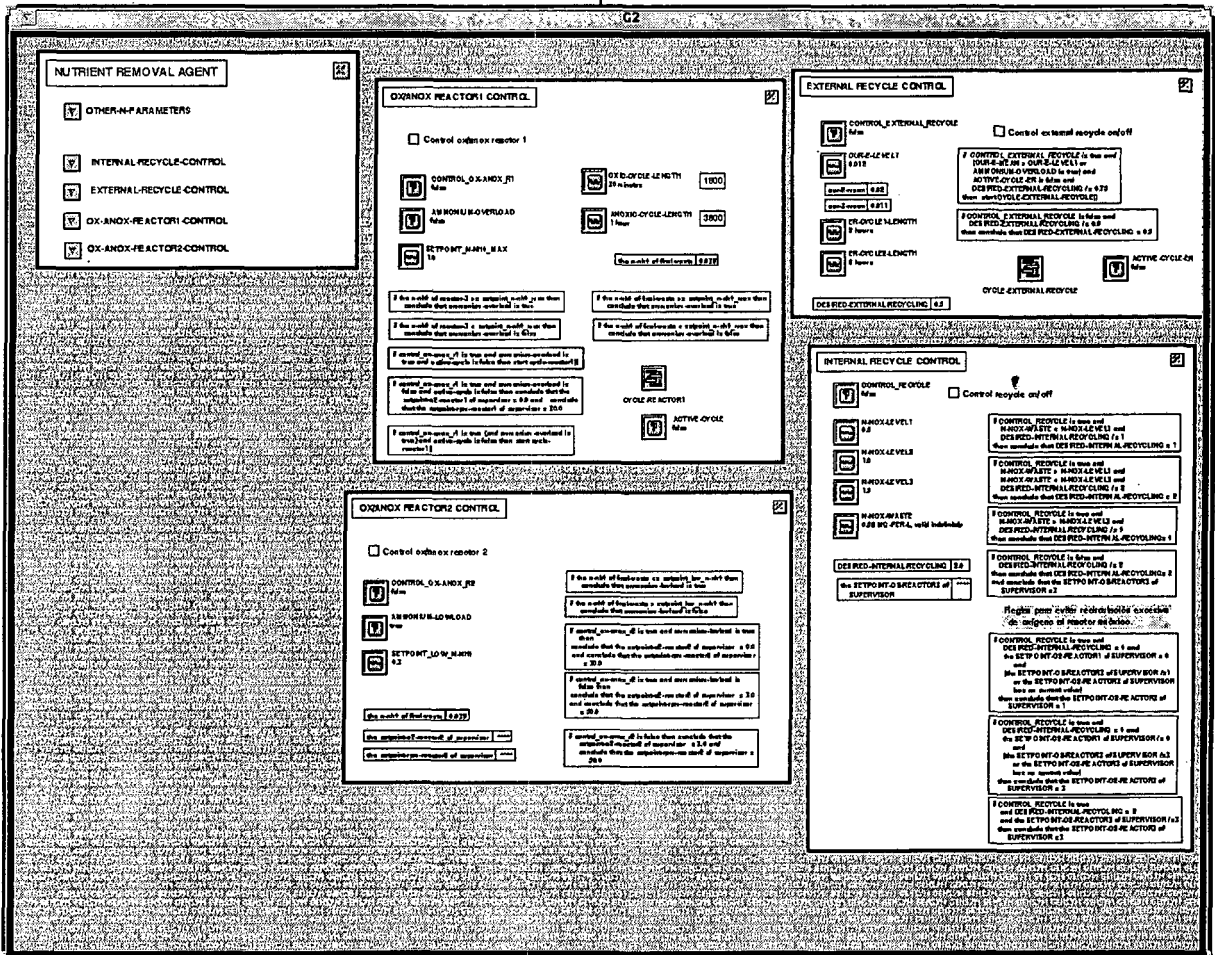


Fig. 4.62. Hojas de trabajo principales del módulo de eliminación de nutrientes

aireación en el reactor 1. Cuando se mide un valor inferior, la variable toma el valor falso, por lo que cuando finaliza el ciclo en curso se retorna a la operación anóxica.

Los cambios de consigna de oxígeno disuelto van unidos a cambios en la agitación. Cuando el SE cambia a una consigna 3 mg/l de oxígeno, también incrementa la agitación al 60 %, para favorecer la homogeneización del medio y el aumento de la velocidad de transferencia de oxígeno. El cambio de consigna a 0 mg/l va unido a un cambio a un 30 % de agitación, para disminuir el aporte de oxígeno provocado por la agitación, pero manteniendo una buena mezcla del reactor.

- **Consigna de oxígeno disuelto en el reactor 2** (figura 4.63). Este reactor tiene condiciones aeróbicas (consigna de 3 mg/l) cuando la planta piloto está funcionando normalmente. En circunstancias en que la carga de la planta es escasa (por ejemplo durante la noche) puede ser innecesario mantener las condiciones aeróbicas, ya que en condiciones anóxicas (consigna de 0 mg/l) la eliminación de DQO puede seguir realizándose, se favorece la desnitrificación y se obtiene un consumo menor de aire. Para la aplicación de este modo de operación se define un límite de concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente. Cuando el valor medido es inferior a este valor, la variable

'Baja_carga_amonio' toma el valor de verdadero, lo que cambia la operación del reactor 2 a anóxica. Esto hace cambiar la consigna de oxígeno a 0 mg/l y la agitación al 30 %. Cuando la medida supera el límite la variable toma el valor de falso, por lo que se retorna a la operación aeróbica, con consignas de 3 mg/l de oxígeno y 50 % de agitación.

- **Caudal de recirculación interna** (figura 4.64). Se puede trabajar con un caudal fijo, pero generalmente se establece un caudal en relación con el caudal de entrada a la planta para obtener mejores resultados de eliminación de nitrato. Esta relación de recirculación interna (Q_{RI}/Q_E) se modifica en función de la concentración de nitrógeno en forma oxidada en la salida de la planta. Se pueden establecer diferentes valores de relación en función del valor de $N-NO_x$. Se establecen dos límites de $N-NO_x$, uno inferior y otro superior. Cuando se sobrepasa el valor superior, la relación de recirculación cambia de consigna a 4. Para valores entre los dos límites tiene un valor de 2. Por último, para valores inferiores al límite, se define una consigna de 1.

La relación de recirculación máxima utilizada es 4 porque es la máxima que se puede obtener con la bomba de recirculación interna para los caudales de entrada máximos. La mínima establecida es 1 porque siempre existe una concentración de amonio en la entrada, que

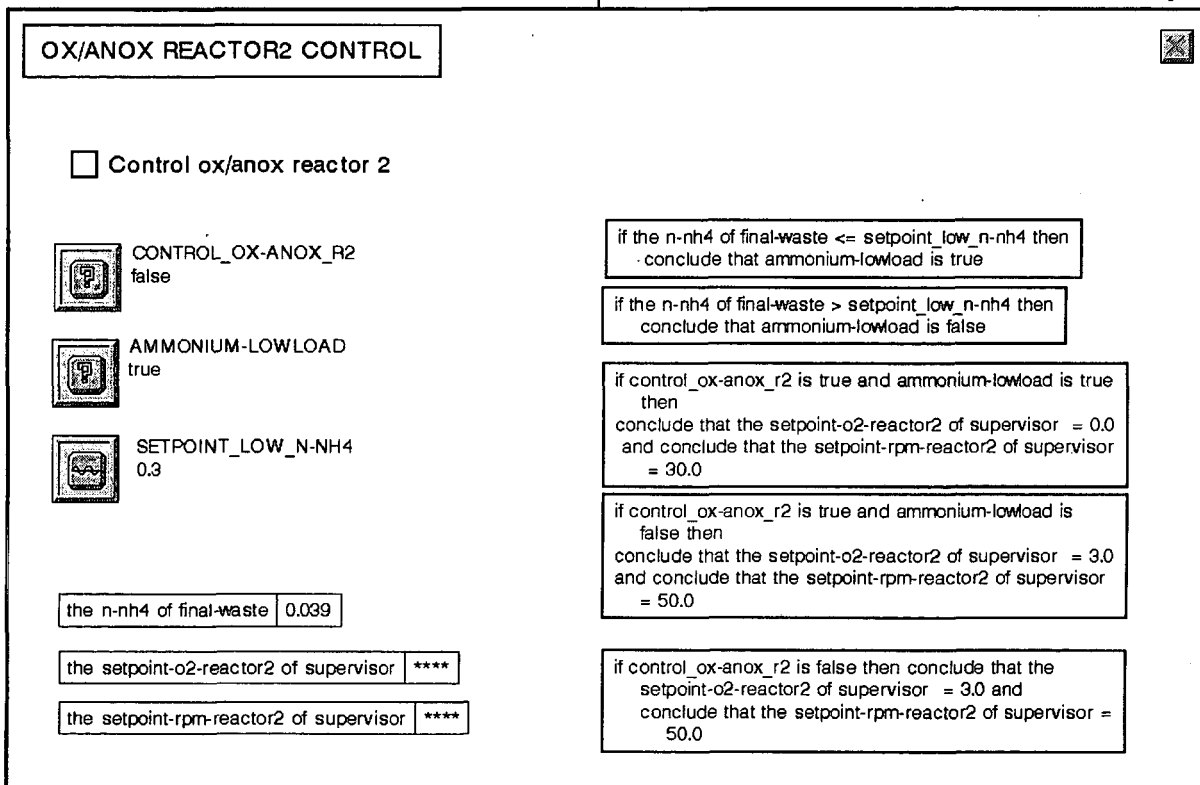


Fig. 4.63. Hoja de trabajo para el control del estado aeróbico del reactor 2

tendrá que ser nitrificada y posteriormente desnitrificada. Esta recirculación mínima también tiene un efecto positivo en la homogeneización de los reactores y en el consumo de DQO por las bacterias desnitrificantes.

Cuando la planta piloto está funcionando con una relación de recirculación interna de 4, el aporte

de oxígeno del reactor 3 al reactor 1 mediante la recirculación interna puede ser muy elevado lo que provoca la presencia de oxígeno en el reactor 1 y por lo tanto la inhibición de la desnitrificación. Para solventar este problema se establece una consigna de oxígeno disuelto de 1 mg/l cuando se utiliza esa relación de recirculación interna.






INTERNAL RECYCLE CONTROL	
 CONTROL_RECYCLE false	<input type="checkbox"/> Control recycle on/off
 N-NOX-LEVEL1 0.5	
 N-NOX-LEVEL2 1.0	
 N-NOX-LEVEL3 1.5	
 N-NOX-WASTE 0.56 MG-PER-L, valid indefinitely	
DESIRED-INTERNAL-RECYCLING	2.0
the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR	****
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and N-NOX-WASTE < N-NOX-LEVEL1 and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING != 1 then conclude that DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 1</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and N-NOX-WASTE > N-NOX-LEVEL1 and N-NOX-WASTE < N-NOX-LEVEL3 and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING != 2 then conclude that DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 2</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and N-NOX-WASTE > N-NOX-LEVEL3 and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING != 4 then conclude that DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 4</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is false and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING != 2 then conclude that DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 2 and conclude that the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR = 3</p>	
<p>Reglas para evitar recirculación excesiva de oxígeno al reactor anóxico.</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 4 and the SETPOINT-O2-REACTOR1 of SUPERVISOR = 0 and (the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR != 1 or the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR has no current value) then conclude that the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR = 1</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 4 and the SETPOINT-O2-REACTOR1 of SUPERVISOR != 0 and (the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR != 3 or the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR has no current value) then conclude that the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR = 3</p>	
<p>if CONTROL_RECYCLE is true and DESIRED-INTERNAL-RECYCLING = 2 and the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR != 3 then conclude that the SETPOINT-O2-REACTOR3 of SUPERVISOR = 3</p>	

Fig. 4.64. Hoja de trabajo para el control de la relación de recirculación interna

- **Caudal de recirculación externa** (figura 4.65). Generalmente se trabaja con una relación de recirculación externa fija, con un valor habitual de $Q_{RE}/Q_E = 0.5$. En determinadas ocasiones, este valor se puede incrementar a $Q_{RE}/Q_E = 1$ durante cierto periodo de tiempo prefijado para hacer frente a cargas de nitrógeno o DQO elevadas en el influente (apartado 4.5.2.8). Si se detecta una 'Sobrecarga amonio' o si la OUR en los reactores aeróbicos supera un valor de 0.012 mg

$O_2 / l s$, se incrementa a una relación $Q_{RE}/Q_E = 1$ durante unas horas, para que los sólidos acumulados en el sedimentador puedan introducirse de nuevo en los reactores, lo que aumenta transitoriamente su concentración.

La validación de este módulo de 'Eliminación de Nutrientes' se encuentra descrita en el apartado 5.2.

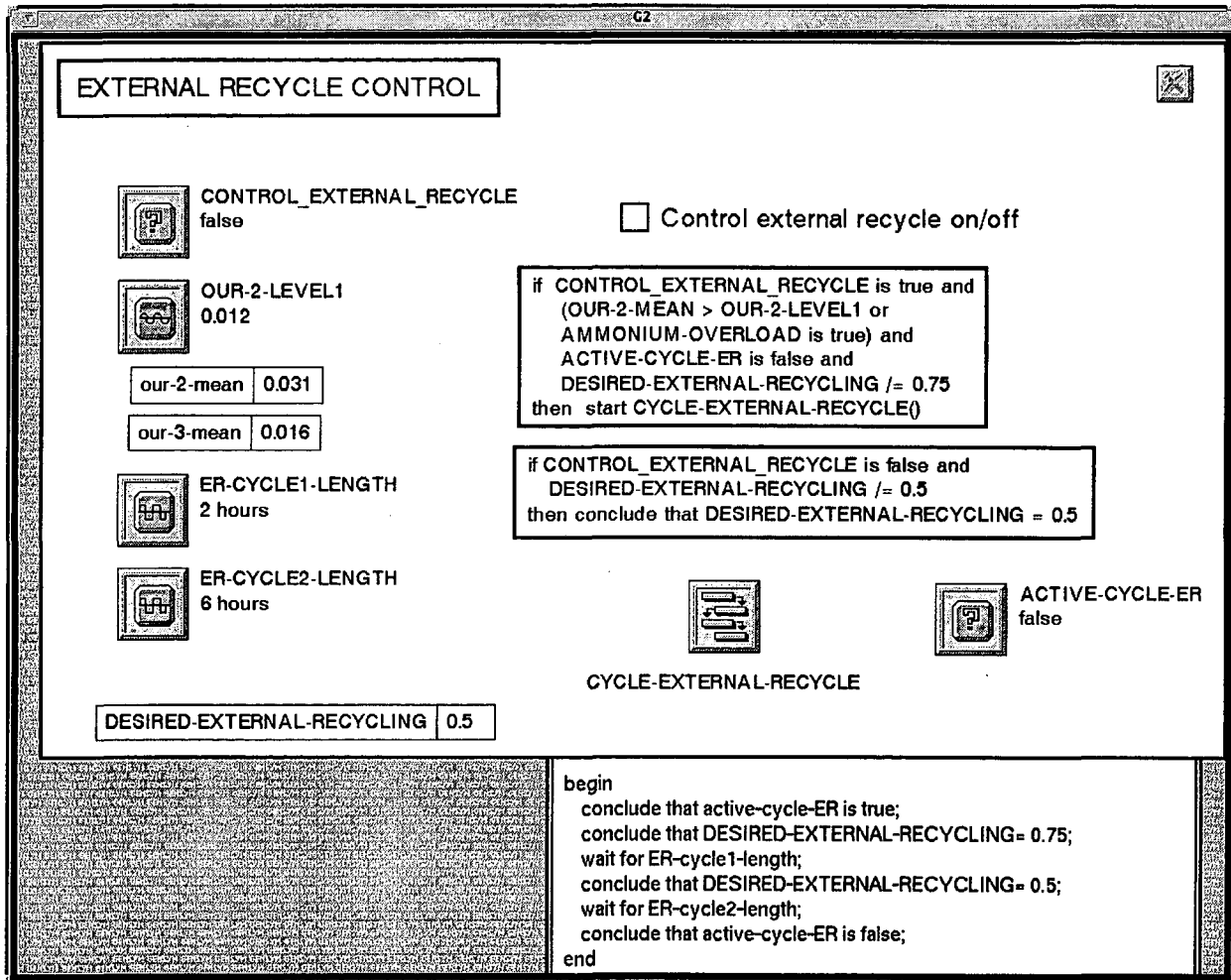


Fig. 4.65. Reglas y procedimiento para el control de la relación de recirculación externa

4.5.2.10 MÓDULO DE MICROORGANISMOS

Este módulo utiliza la información “off-line” de los microorganismos, obtenida mediante observación microscópica, para supervisar el estado de los microorganismos presentes en el lodo. Estas observaciones son muy útiles para inferir futuros problemas. Teniendo en cuenta estos posibles problemas, se pueden ejecutar acciones preventivas para evitarlos. Aquí hay incluida una gran cantidad de información simbólica, ya que la presencia o ausencia de algunos microorganismos puede ser un indicador de algún problema actual o futuro, como “bulking” o presencia de espumas.

En la figura 4.66 se muestran los microorganismos definidos en este módulo, agrupados en una jerarquía de microorganismos.

En la figura 4.67 se presenta las hojas de trabajo principales que definen las reglas y objetos del módulo de microorganismos.

En el módulo se incluyen reglas para prevenir la aparición o detectar la presencia de “bulking” en el sistema (por diferentes causas), prevenir la aparición

de “rising” en el sedimentador, confirmar la presencia de problemas de “foaming”, o incluso para prevenir la nitrificación si no se desea que esta tenga lugar.

También se ha añadido un procedimiento de ayuda para determinar el tipo de bacterias filamentosas presentes en el medio.

En este módulo también se incluye una sección que se encarga de la supervisión de la operación del sedimentador. Este es un elemento importante para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de lodos activos, debido a que la separación agua – microorganismos es una fuente general de problemas en las EDAR. Para averiguar la situación actual de esta unidad de proceso, este módulo utiliza información de caudales y concentración de microorganismos que son proporcionados por el módulo ‘Sistema de Bombeo’ y ‘Tiempo de Residencia Celular’ respectivamente. Por ejemplo, puede detectar problemas de pérdida de lodos excesiva, que puede provocar problemas como tiempos de residencia celular menores al esperado, o incumplimiento de los límites de sólidos en el efluente.

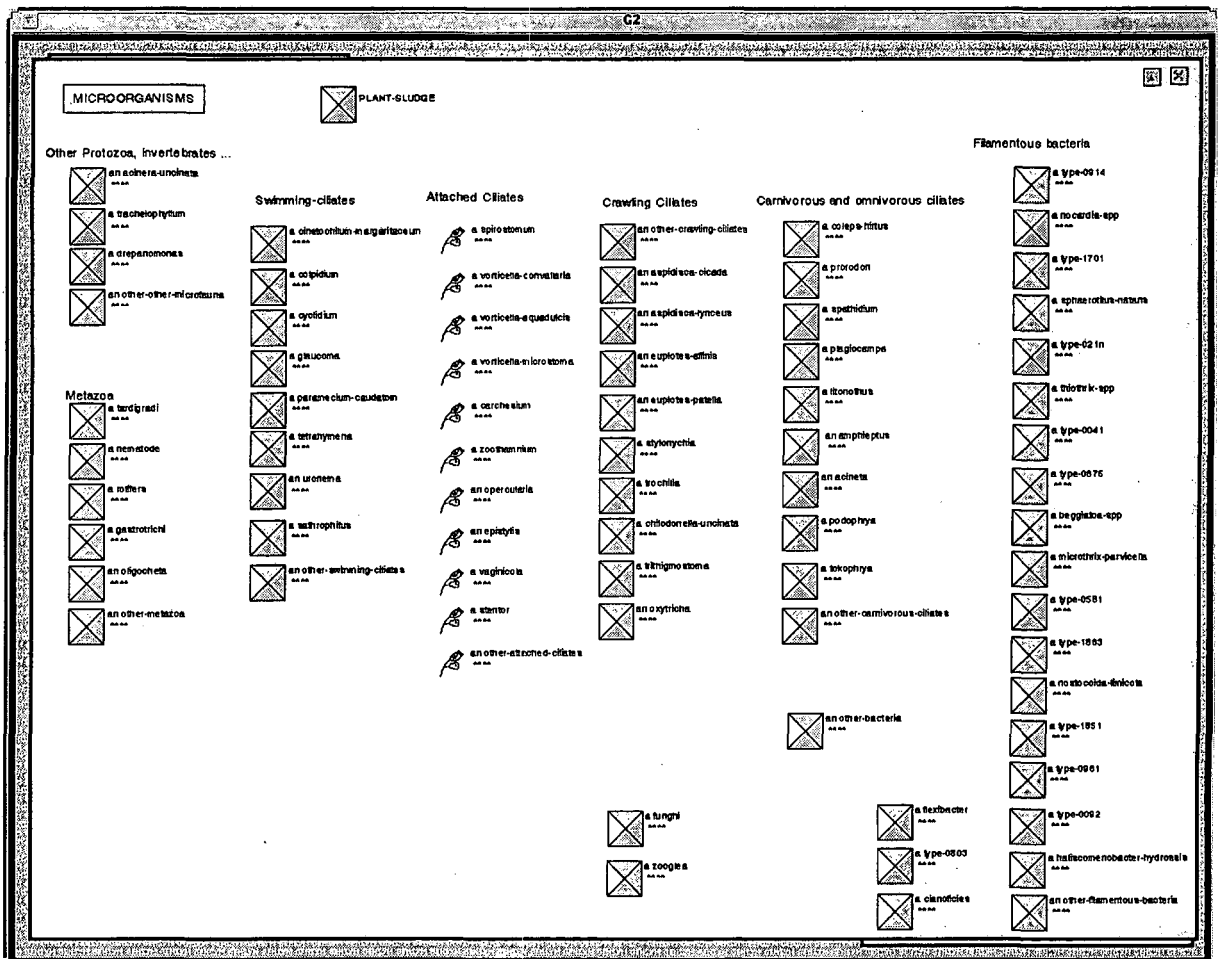


Fig.4.66. Microorganismos definidos en el módulo

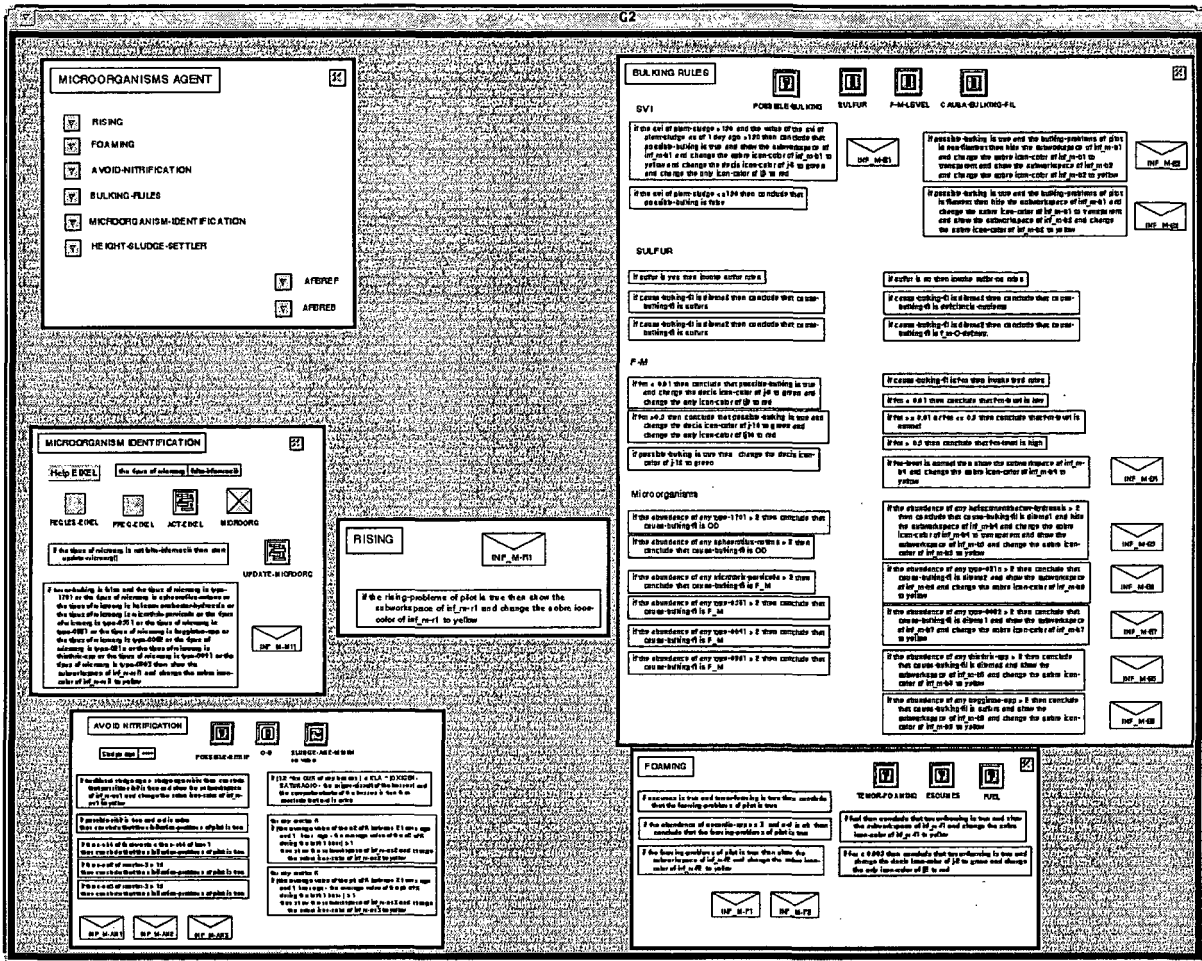


Fig.4.67. Hojas de trabajo principales del módulo de microorganismos

4.5.2.11 MÓDULO DE TIEMPO DE RESIDENCIA CELULAR

Este es un importante parámetro del proceso que determina las especies de microorganismo presentes en el sistema. Para su cálculo, se requieren datos "in-line" y "off-line", por lo que es un complejo parámetro clave. La consigna de θ_c es calculada por el módulo supervisor, teniendo en cuenta la información proporcionada por otros módulos, como 'Economía del proceso', 'Eliminación de nutrientes' o 'Microorganismos'.

A continuación se muestra, centrándose en este parámetro, un ejemplo práctico detallado de cómo funciona todo el Sistema Supervisor:

- El operador realiza un análisis rutinario e introduce los resultados analíticos en la página Web utilizando un navegador estándar. Esto produce un mensaje de correo electrónico, con los datos codificados que es enviado a la estación de trabajo.
- El SE comprueba periódicamente si un nuevo mensaje ha llegado. Cuando detecta el nuevo mensaje, los datos incluidos son leídos. Estos datos

son utilizados para actualizar los atributos correspondientes de los objetos definidos.

- El cambio en los valores del atributo 'sólidos volátiles en suspensión' en los reactores produce un nuevo valor de θ_c . Si el valor es diferente al anterior, el módulo 'Tiempo de Residencia Celular' es activado automáticamente.
- Este módulo comprueba si el nuevo valor se encuentra dentro de un rango determinado. Este rango lo determina el módulo 'Supervisor' teniendo en cuenta la información proporcionada por varios módulos, como los de 'Eliminación de Nutrientes', 'Microorganismos' y 'Economía del Proceso'.
- Si se detecta una diferencia entre el tiempo requerido y su valor actual, se activa un procedimiento que calcula los parámetros del sistema de purga automática para obtener el valor de θ_c requerido.
- Estos parámetros son enviados al servidor de datos, que se encarga de transmitirlos al ordenador de monitorización y control utilizando la conexión TCP/IP.

- El ordenador de control, con las nuevas consignas enviadas por el servidor de datos, manda al PLC las nuevas consignas correspondientes al tiempo de apertura de la electroválvula de purga.
- El PLC utiliza las nuevas consignas para abrir y cerrar la electroválvula de purga en los intervalos prefijados. La posición de la electroválvula determina si la recirculación de lodos se dirige al reactor anaeróbico o al depósito donde la purga es acumulada. El cambio en el caudal de recirculación derivado al depósito determina un nuevo valor de θ_C .
- Un cambio en las condiciones de la planta, por ejemplo si la recirculación externa es modificada por otra regla, puede producir nuevos valores para los parámetros del sistema implicados en el cálculo de θ_C . Estos nuevos valores serán detectados por el SE, que activará los módulos necesarios para obtener los nuevos parámetros de control, tal como ha sido mostrado anteriormente.

4.5.2.12 MÓDULO DE ANALIZADORES

Este módulo supervisa la operación del sistema analítico: analizadores y sistema de toma de muestras.

Puede monitorizar el punto de muestra, el tiempo desde el último análisis y comprobar que el valor de las medidas esté dentro de la tendencia normal del proceso antes de actualizar los atributos de los objetos correspondientes.

Cuando detecta algún problema, muestra un aviso al operador, indicando el problema detectado y las posibles causas.

4.5.2.13 MÓDULO DE BASE DE DATOS

Este módulo se encarga de almacenar los datos adquiridos por todos los subsistemas y los calculados por el SE. Las tareas específicas que realizan son comentadas a continuación:

- Guarda un archivo de seguridad con todos los datos del SE, con su configuración detallada en ese momento. Esto permite recuperar la situación anterior del sistema experto si existe algún fallo eléctrico que apague el sistema.
- Genera los archivos de históricos requeridos, mediante la llamada a diversas funciones. Estas funciones permiten, por ejemplo, la creación de ficheros de texto con las variables promediadas diariamente, que se utilizan para generar un registro de condiciones de operación en una hoja de cálculo.

- Adquiere los datos “off-line”, provenientes de los mensajes de correo electrónico enviados mediante el subsistema HTML. En este módulo se encuentran los procedimientos que leen estos mensajes y transforman los ficheros de texto en valores que se utilizan para actualizar los atributos correspondientes de los objetos.
- Mantiene una base de datos con valores promediados de diversas variables.
- Realiza un registro de todas las acciones de control enviadas desde el SE a los ordenadores de control de la planta piloto y de los analizadores, lo que permite realizar un seguimiento detallado de todas las acciones del SE.

4.5.2.14 SUPERVISIÓN Y CONTROL REMOTO

Tal como se ha comentado en el apartado 3.8.3, G2 está desarrollado para comunicarse con otros sistemas externos. Mediante la herramienta de desarrollo GSI pueden realizarse enlaces para el acceso a datos externos. También es posible la comunicación entre sistemas expertos desarrollados sobre G2 fácilmente.

Se ha podido comprobar experimentalmente la aplicación distribuida de estas herramientas, durante una estancia de investigación en el Departamento de Engenharia Biológica (DEB) de la Universidade do Minho, en Braga (Portugal).

Se han probado dos diferentes modos de operación. En el primero, el SE de la UAB estaba desconectado, y el SE del DEB se encargaba del control de todo el sistema de monitorización y control de la planta piloto. El funcionamiento era exactamente igual que trabajando con el SE de la UAB. El servidor de datos utilizado era el Servidor GSI realizado para el SE de la UAB, ejecutándose en la estación de trabajo de la UAB. No es necesario ningún cambio de configuración en este enlace, ya que está preparado para recibir peticiones de datos de cualquier sistema externo conectado mediante TCP/IP.

En el segundo modo de operación, funcionan los dos sistemas simultáneamente. El SE de la UAB trabaja normalmente, controlando los subsistemas del proceso. El SE del DEB intercambia información con el SE de la UAB, por lo que se puede trabajar de un modo paralelo, implementando el control de diferentes subsistemas en cada SE, o supervisando el funcionamiento de uno con el otro.

La única diferencia respecto a disponer del SE en la UAB es el tiempo de transmisión de datos entre los sistemas. El SE situado en el DEB se encuentra a

una distancia mayor de 1000 kilómetros respecto al sistema que está controlando. Para conocer el tiempo de respuesta de la comunicación, se ha trazado el tiempo de respuesta mediante un programa, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.3. Puede observarse como el tiempo de respuesta entre el sistema del DEB y la estación de trabajo de la UAB es de 0.64 segundos. Este corto tiempo de respuesta es suficiente para controlar muy adecuadamente el proceso de lodos activos de la planta piloto. En la figura también se observan los diferentes equipos informáticos, por los que se transmite la información desde Braga a Bellaterra.

El tiempo de respuesta no es un problema, pero sí lo es la posible pérdida de conexión entre los sistemas, que teniendo en cuenta el largo camino entre ordenadores, es posible que suceda. La desconexión entre los sistemas no es demasiado grave, ya que el sistema de control local está preparado para mantener el funcionamiento de la planta piloto siempre que físicamente sea posible. El único problema es que el sistema funcionará con un

conjunto de consignas fijas durante el tiempo de desconexión.

Para minimizar este problema, se han programado unas reglas que permiten la reconexión automática. Una vez perdida la conexión, el sistema comprueba periódicamente si es posible restablecerla. Cuando esto sucede, el sistema se conecta y actualiza los valores de las variables disponibles.

Por otro lado, el SE del DEB se ejecuta sobre otro sistema operativo, Windows NT. Tal como se ha comentado en el apartado 3.8.3, las aplicaciones desarrolladas en G2 son fácilmente portables, pueden ejecutarse en diferentes sistemas operativos: UNIX, VAX VMS, Windows NT. En el caso de estudio, el SE fue inicialmente desarrollado sobre un entorno UNIX, pero fue trasladable, sin ningún cambio, a un entorno Windows NT. La apariencia de la aplicación desarrollada y de G2 es exactamente igual, lo que puede ser una característica importante a considerar para la implementación de un sistema en una aplicación a escala real.

```
C:\>tracert eq3.uab.es

Tracing route to eq3.uab.es [158.109.13.2] over a maximum of 30 hops:

  1  *      *      *      Request timed out.
  2  4 ms   6 ms   4 ms   192.86.138.237
  3  5 ms   12 ms  7 ms   ROUTER6.ATM2-0.1.Braga.rccn.net [193.137.56.1]
  4  16 ms  13 ms  16 ms  ROUTER13.ATM2-0.7.Lisboa.rccn.net [193.137.0.1]
  5  12 ms  18 ms  21 ms  ROUTER16.ATM3-0.1.Lisboa.rccn.net [193.136.1.66]
  6  560 ms 572 ms 587 ms rccn.CH-1.ten-34.net [193.203.226.37]
  7  561 ms 568 ms 561 ms geneva6.att-unisource.net [195.206.64.65]
  8  577 ms 606 ms 566 ms geneva5.att-unisource.net [195.206.64.45]
  9  588 ms 601 ms 581 ms amsterdam5.att-unisource.net [195.206.64.25]
 10  604 ms 605 ms 615 ms madrid5.att-unisource.net [195.206.64.30]
 11  609 ms 611 ms 619 ms madrid7.att-unisource.net [195.206.66.58]
 12  619 ms 608 ms 614 ms madrid6.att-unisource.net [195.206.66.62]
 13  613 ms 608 ms 628 ms F5-0-0.EB-Madrid0.red.rediris.es [130.206.206.145]
 14  608 ms 608 ms 619 ms A1-0-23.EB-Madrid1.red.rediris.es [130.206.224.70]
 15  630 ms *      *      A1-0-1.EB-Barcelona1.red.rediris.es [130.206.224.2]
 16  *      620 ms 622 ms 193.145.223.202
 17  634 ms 652 ms 637 ms eq3.uab.es [158.109.13.2]

Trace complete.
```

Tabla 4.3. Traza de la respuesta de la comunicación entre el sistema del DEB y el de la UAB

4.5.3 CONCLUSIONES

La implementación del SE hace posible el control del rendimiento del proceso en conjunto, mediante la relación entre diferentes parámetros.

La implementación del SE en la planta piloto ha supuesto la transformación de un sistema de control clásico con un comportamiento fijo en un sistema adaptable a los diferentes problemas que pueden aparecer en una EDAR. La capacidad para tratar estos problemas es útil para controlar situaciones anormales y para mantener las restricciones legales en el efluente. Además, es capaz de evitar la aparición de algunas situaciones que pueden provocar problemas a largo plazo. Estas situaciones son, por ejemplo, el crecimiento descompensado de algunos microorganismos que pueden inducir problemas de "bulking" a corto o largo plazo y provocar dificultades para mantener las restricciones en el efluente para algunos parámetros. Las acciones correctivas del control experto no son implementables en un sistema de control clásico, por lo tanto hay una gran mejora respecto al control clásico. Además, es posible implementar todos los algoritmos de control numérico, por lo que hay un beneficio neto de posibilidades para resolver los diferentes problemas de una EDAR.

Con respecto a la arquitectura distribuida multimódulo, el sistema ha mostrado algunas características que mejoran previos desarrollos de sistemas con bases de conocimiento monolíticas. Esta arquitectura basada en módulos permite el desarrollo de módulos independientes y reutilizables, que pueden ser realizados por diferentes desarrolladores teniendo en cuenta algunos requerimientos establecidos para la comunicación con el módulo 'Supervisor'. Después de la construcción, el módulo puede ser integrado con el resto del sistema. Esta tarea ha sido realizada por ejemplo con el módulo de 'Microorganismos', donde diferentes expertos han cooperado en su construcción. Esto también significa que los módulos desarrollados pueden reutilizarse en otros sistemas expertos, adaptándose con mínimos cambios, como se puede comprobar en la aplicación en una EDAR real (capítulo 6). Otra importante característica es el menor esfuerzo de mantenimiento respecto a versiones previas. Las tareas realizadas por diferentes módulos son fácilmente validables porque son independientes, por lo que esta tarea se simplifica. Por el contrario, la integración con el módulo 'Supervisor' debe ser inspeccionada en detalle para evitar errores en la coordinación. La dificultad de su integración puede ser el hecho que haga decidir al desarrollador entre un sistema experto monolítico o multimódulo.

El principal éxito de este prototipo es un marco versátil capaz de tratar con diferentes configuraciones de la planta, basado en el paradigma de la programación orientada a objeto y en el razonamiento basado en reglas. La característica "on-line" es una importante innovación de este sistema, particularmente para la monitorización de datos y el control supervisor. Recientemente, han aparecido algunos artículos con buenos resultados que muestran el prometedor potencial de la implementación de la monitorización y el control "on-line" [Baslev, 1996; Nielsen, 1996], aunque la integración del conocimiento no es tan formal y versátil como un SEBC requiere. En el sistema desarrollado, se pueden implementar diferentes estrategias de control y configuraciones de planta para el sistema de lodos activos con eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Además, el SEBC desarrollado puede ser adaptado a una nueva planta en un corto tiempo debido al diseño orientado a objeto y a la arquitectura distribuida multimódulo.

Finalmente, este sistema ha estado funcionando más de dos años continuamente. En este periodo, los objetivos operacionales de la planta fueron cambiados periódicamente, para optimizar diferentes partes del proceso. El SE ha mostrado un excelente rendimiento en la operación de la planta piloto. El sistema desarrollado detecta y controla todos los problemas y operaciones especiales de la planta, como por ejemplo fallo de la bomba, problemas de alimentación, funcionamiento incorrecto de las sondas, mantenimiento del equipo y control de los analizadores. Esto ha permitido una disminución en la atención necesaria para el mantenimiento de la planta piloto en unas condiciones adecuadas de funcionamiento.

Una posible mejora, en desarrollo actualmente, es la utilización de una base de datos de casos, en la que se utilizaría la información sobre situaciones y actuaciones en el pasado para decidir la mejor actuación posible.

5 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN PLANTA PILOTO

5 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN PLANTA PILOTO

Una vez desarrollado el sistema de control supervisor, es necesaria la validación experimental de su funcionamiento en condiciones reales.

Por otro lado, es necesario estudiar tanto la dinámica específica de la planta, como su capacidad de eliminación en condiciones de operación preestablecidas. En el presente capítulo se realizan una serie de experimentos, utilizando el sistema de control supervisor, con el objetivo de estudiar la respuesta de la planta piloto. Primero en condiciones estacionarias, donde se obtienen las capacidades de nitrificación y desnitrificación de la planta (apartado 5.1). Posteriormente, se estudia el proceso en condiciones dinámicas y la respuesta de la planta ante diferentes estrategias de control (apartado 5.2).

Previamente al inicio de la validación experimental del sistema se procedió a la limpieza y al cambio de tubos de la planta piloto y a su posterior reinoculación. Los lodos utilizados provenían de la planta depuradora de Sallent, donde se utiliza un sistema tipo Orbal con el que se obtienen buenos rendimientos de eliminación de nitrógeno. El hecho de inocular con lodos de otra planta depuradora, que además tiene una configuración diferente, significa que los microorganismos se tienen que adaptar a las nuevas condiciones. Para obtener un estado estacionario respecto a la población microbiana, es necesario mantener la planta en condiciones estables durante 3 o 4 tiempos de residencia celular (en nuestro caso unos dos meses).

Además, debe considerarse que los lodos de la depuradora de Sallent no tenían suficiente capacidad nitrificante para las condiciones de nuestra planta. Por tanto, los lodos necesitaban un tiempo de residencia elevado para conseguir el crecimiento de bacterias nitrificantes. Durante este periodo se fue siguiendo la concentración de biomasa en los reactores y se ajustaba la purga para mantener el tiempo de residencia celular prefijado.

En la etapa de adaptación de los lodos activos se mantuvieron unas condiciones de operación fijas,

mostradas en la tabla 5.1, para favorecer la estabilización de la población de microorganismos.

Parámetro	Unidades	Valor medio
DQO_E	mg O_2 /l	400
$N-NH_4^+_E$	mg/l	20
$P-PO_4^{3-}_E$	mg/l	15
θ_c	días	20
Q_E	l/d	430
Q_{RE}	l/d	140
Q_{RI}	l/d	860

Tabla 5.1. Condiciones de operación y alimentación en la fase de aclimatación de los microorganismos

Donde:

θ_c	Tiempo de residencia celular
Q_E	Caudal de entrada a la planta
Q_{RE}	Caudal de recirculación externa
Q_{RI}	Caudal de recirculación interna
$[]_E$	Concentración en la entrada

5.1- ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL PROCESO

Antes de iniciar el estudio sobre el control del proceso se debe analizar la capacidad de eliminación de nitrógeno en la planta piloto. Se han realizado una serie de experimentos para obtener información sobre los rendimientos de eliminación en diferentes condiciones de operación, con un perfil de entrada constante para cada experimento.

Este apartado experimental se puede dividir en dos bloques. En primer lugar se han realizado una serie de experimentos para evaluar la capacidad de nitrificación y de eliminación de nitrógeno en diferentes condiciones de entrada a la planta. En segundo lugar, se ha diseñado y realizado un experimento para evaluar la máxima capacidad de desnitrificación.

5.1.1 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

5.1.1.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para evaluar la capacidad de nitrificación y eliminación de nitrógeno de la planta piloto se han procurado mantener constantes los parámetros de operación, a excepción de la entrada de amonio y la recirculación interna. Estas han sido las variables modificadas para obtener diferentes respuestas de eliminación de la planta piloto.

Se han establecido tres valores de recirculación interna, siendo seleccionados considerando las limitaciones físicas de la planta piloto. La bomba de recirculación interna ofrece un caudal máximo que permite una relación de recirculación de 5 a 1, por lo que ha sido este el valor máximo escogido. El valor mínimo se obtiene al eliminar totalmente la recirculación interna, son los experimentos señalados como relación de recirculación interna 0 a 1. Por último, se ha seleccionado un valor de 2 a 1 como relación intermedia. No se utiliza el valor intermedio exacto, ya que la respuesta esperada de eliminación no es lineal respecto al aumento de recirculación interna. La respuesta teórica es un aumento importante para incrementos de relación de recirculación a partir de 0, pero para relaciones elevadas el valor tiende a un valor máximo (Referencia EPA).

En cuanto a la entrada de amonio, se han realizado experimentos con tres diferentes concentraciones, una baja de 15 mg/l de $N-NH_4^+$, una normal de alrededor de 20 mg/l y una de concentración alta con 30 mg/l. Para obtener esos valores, se ha modificado la composición del alimento concentrado incrementando la fracción de NH_4Cl añadida, para obtener la concentración deseada de amonio. El resto de componentes (incluido el nitrógeno orgánico en forma de peptona), no ha sido modificado.

	$[N-NH_4^+]_E$ (mg/l)	Experimento	Q_{RI}/Q_E
Serie 1	15	1	5
		2	2
		3	0
Serie 2	20	4	5
		5	2
		6	0
Serie 3	30	7	5
		8	2
		9	0

Tabla 5.2. Series experimentales

Los 9 experimentos realizados, agrupados en tres series en función de la carga de entrada, se especifican en la tabla 5.2. En la figura 5.1 se ha representado su distribución en el plano $N-NH_4^+$ entrada vs. Q_{RI}/Q_E .

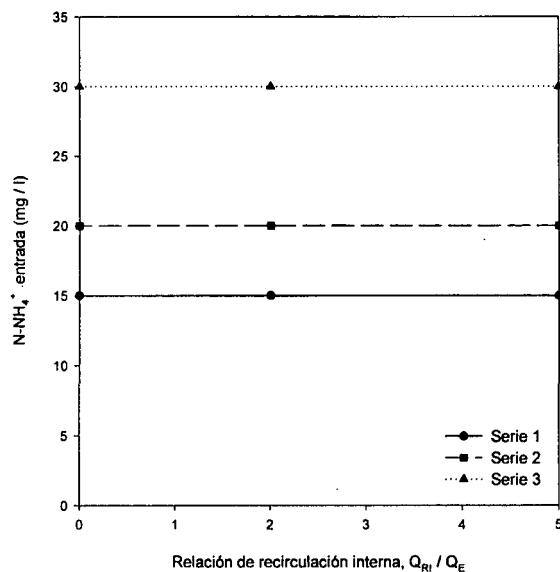


Fig. 5.1. Distribución de los experimentos diseñados

Para los nueve experimentos se han mantenido fijos los parámetros mostrados en la tabla 5.3.

Parámetro	Unidades	Valor medio
Q_E	l/d	430
Q_{RE}	l/d	140
θ_c	D	20
DQO_E	mgO ₂ /l	400
T	°C	19-21

Tabla 5.3. Parámetros experimentales establecidos

Para asegurar las condiciones de estado estacionario hidráulico, se ha establecido un periodo de 24 horas entre cada experimento (3 tiempos de residencia hidráulicos). En anteriores trabajos (Gabriel, 1996) se ha observado que este es el tiempo necesario para estabilizar el sistema ante un cambio en las condiciones de entrada.

Las condiciones experimentales propuestas se han llevado a la práctica, comprobándose posteriormente las condiciones experimentales reales. Las medidas obtenidas para los 9 experimentos son mostradas en la tabla 5.4. En ella se observa poca dispersión para el análisis de amonio y una mayor desviación en el análisis de DQO. La variabilidad en esta medida está provocada mayoritariamente por el error asociado a este análisis. La dosificación proporcionada por las bombas dosificadoras de alimento concentrado tiene un comportamiento bastante estable, tal como se explica en el apartado 5.2.3.

Exp	N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	Q _{RI} /Q _E	Q _E (l/d)	θ _c (d)	DQO (mg O ₂ /l)
1	15.5	4.9	430		509
2	15.7	1.9	424	17	545
3	15.2	0	420		427
4	21.0	5.0	423		457
5	22.4	2.0	420	25	466
6	21.4	0	417		387
7	31.7	4.6	423		530
8	31.7	1.9	420	20	450
9	29.2	0	427		450

Tabla 5.4. Condiciones experimentales reales

El tiempo de residencia celular se ha calculado utilizando la siguiente expresión:

$$\theta_c (\text{días}) = \frac{\sum_{i=0}^3 (SSV_{\text{reactor } i} \cdot V_{\text{reactor } i})}{(SSV_{\text{salida}} \cdot Q_{\text{salida}}) + (X_{\text{purga}} \cdot Q_{\text{purga}})}$$

Donde:

SSV _{reactor i}	Sólidos en suspensión volátiles en el reactor i (mg/l)
V _{reactor i}	Volumen del reactor i
SSV _{salida}	Sólidos en suspensión volátiles en el efluente (mg/l)
Q _{salida}	Caudal de salida de la planta (l/d)
X _{purga}	Concentración de sólidos en suspensión volátiles en la recirculación externa, donde se realiza la purga (mg/l)
Q _{purga}	Caudal de purga (l/d)

5.1.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para cada experimento se han analizado SST, SSV, DQO, N_{total}, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻ y P-PO₄³⁻ de cada punto de la planta (entrada, reactores 0, 1, 2 y 3, recirculación externa y salida), así como el DSVI y los caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa. Los datos obtenidos se han utilizado para realizar el seguimiento de la planta piloto y para calcular las velocidades de nitrificación y los rendimientos de eliminación de nitrógeno.

Evolución del nitrógeno en el reactor 3

Estudiando la concentración de amonio y nitrato en el reactor 3 puede observarse la importancia de la recirculación interna para la eliminación de nitrato. Este es el último reactor de la planta piloto, y sus niveles de nitrato y amonio, si el sedimentador se comportara como un separador ideal, serían iguales a los del efluente de la planta. En la práctica, en el sedimentador no se produce nitrificación por la falta de oxígeno, pero si que existe una pequeña desnitrificación si hay nitrato disponible. Algunos microorganismos, como los acumuladores de fósforo, pueden haber acumulado DQO en forma de

PHB durante los periodos anaeróbicos, o también se puede producir lisis celular, por lo que los microorganismos disponen de algo de DQO oxidable consumiendo el nitrato disponible. En la figura 5.2 se representa la concentración de nitrógeno en forma de nitrato en el reactor 3 en función de la relación de recirculación interna para cada una de las concentraciones de N-NH₄⁺ en la entrada de la planta.

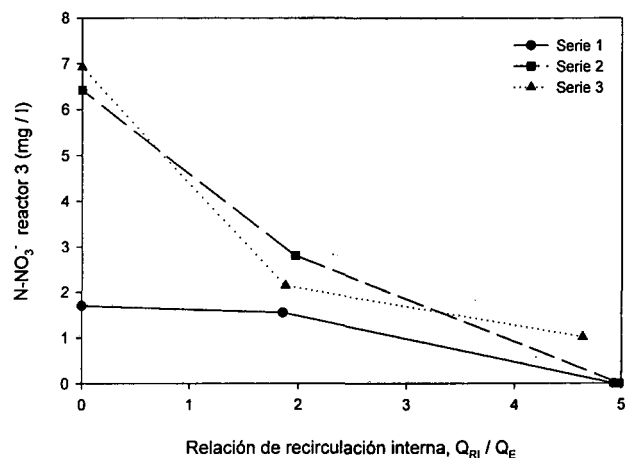


Fig. 5.2. N-NO₃⁻ en el reactor 3 en función de la relación de recirculación interna

En general se puede observar que cuanto mayor es la recirculación interna, menor es la concentración de nitrato en el reactor 3. También se observa que el aumento de relación de recirculación de 0 a 2 tiene un efecto mayor que el aumento posterior de 2 a 5 (excepto para la serie 1, con menor carga). Los resultados obtenidos indican que se puede obtener una buena desnitrificación con valores de relación de recirculación 2, pero que para obtener una concentración prácticamente 0 de nitratos a la salida de la planta, son necesarias relaciones elevadas, como la mayor utilizada. Las recirculaciones internas elevadas serán siempre beneficiosas para la eliminación de nitrato, pero pueden ser no rentables económicamente para bajas cargas de amonio de entrada.

Si se representa la concentración de amonio en el reactor 3, se obtienen los perfiles representados en la figura 5.3.

En la figura 5.3 puede observarse que, exceptuando el primer punto de la serie 3, la relación de recirculación interna no influye en la concentración de nitrógeno amoniacal en el reactor 3. El aumento de recirculación interna tiene el único efecto de dilución sobre el amonio de la planta piloto en los reactores 1 y 2, pero en el reactor 3 la concentración se mantiene prácticamente constante. Estos resultados muestran que en muchos experimentos se trabaja en condiciones en que la reacción se encuentra en condiciones de velocidad máxima, ya

que la velocidad de reacción no depende de la concentración. Este tipo de comportamiento aparece para valores de concentración de amonio bastante superiores a la constante de semisaturación en un modelo cinético de tipo Monod, que según valores bibliográficos es de $K_{NH_4} = 1 \text{ mg/l}$ [Gujer, 1995].

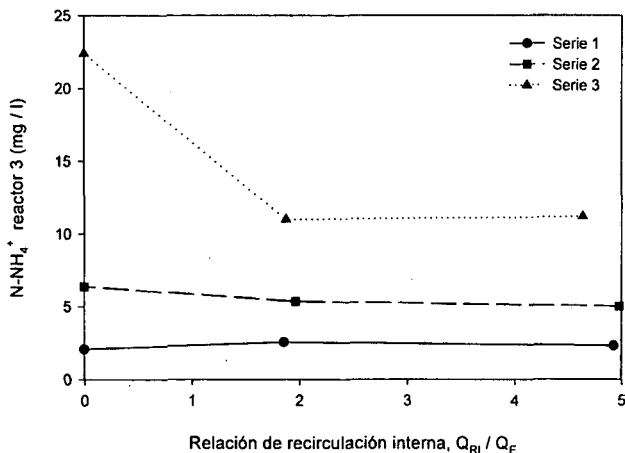


Fig. 5.3. $N-NH_4^+$ en el reactor 3 en función de la relación de recirculación interna

El único punto discordante es el primer punto de la serie 3. En este experimento, con recirculación interna 0 y entrada 30 mg/l de amonio, se analizaron concentraciones de biomasa inferiores al del resto de experimentos (309 gramos totales frente a 390 gramos de promedio en el resto de experimentos). Además de este factor, nos encontramos con un experimento con carga elevada de amonio y sin el efecto de dilución de la concentración interna. Estos dos factores pueden haber provocado un ligero efecto inhibitorio, por concentraciones no habituales

en nuestro sistema. Los valores observados en los reactores no son suficientes para que exista inhibición por amoníaco según las expresiones teóricas (ver apartado 1.2.2), pero pueden ser concentraciones a las que no están habituados nuestros microorganismos. Para comprobar esta hipótesis se ha representado (figura 5.4) la concentración de amonio en todos los puntos de la planta piloto para cada experimento.

En la figura 5.4 se puede observar que en los experimentos sin recirculación interna (3, 6 y 9) no existe el efecto de dilución presente en el resto de experimentos. La concentración de amonio en la entrada, reactor 0 (anaeróbico) y reactor 1 (anóxico) permanece prácticamente constante cuando no existe recirculación interna. En estos reactores no se produce nitrificación, pero existe consumo de amonio para el crecimiento y mantenimiento celular. Además de este consumo, también se produce la amonificación del nitrógeno orgánico alimentado, siendo el balance global de ligero aumento de la concentración de amonio en el reactor 1. En el resto de experimentos, con recirculación interna, no se aprecia esta tendencia porque la recirculación tiene un efecto homogeneizador de la concentración de amonio en los reactores y, por consiguiente, de dilución.

La no presencia del efecto de dilución en los experimentos 3 y 6 no provoca problemas, pero en el experimento 9 se producen valores alrededor de 30 mg/l de nitrógeno amoniacal en los reactores 1 (anóxico) y 2 (1^{er} aeróbico). La pequeña disminución de la concentración de amonio al pasar del reactor 1 al 2 demuestra que en este último reactor no se está produciendo una nitrificación

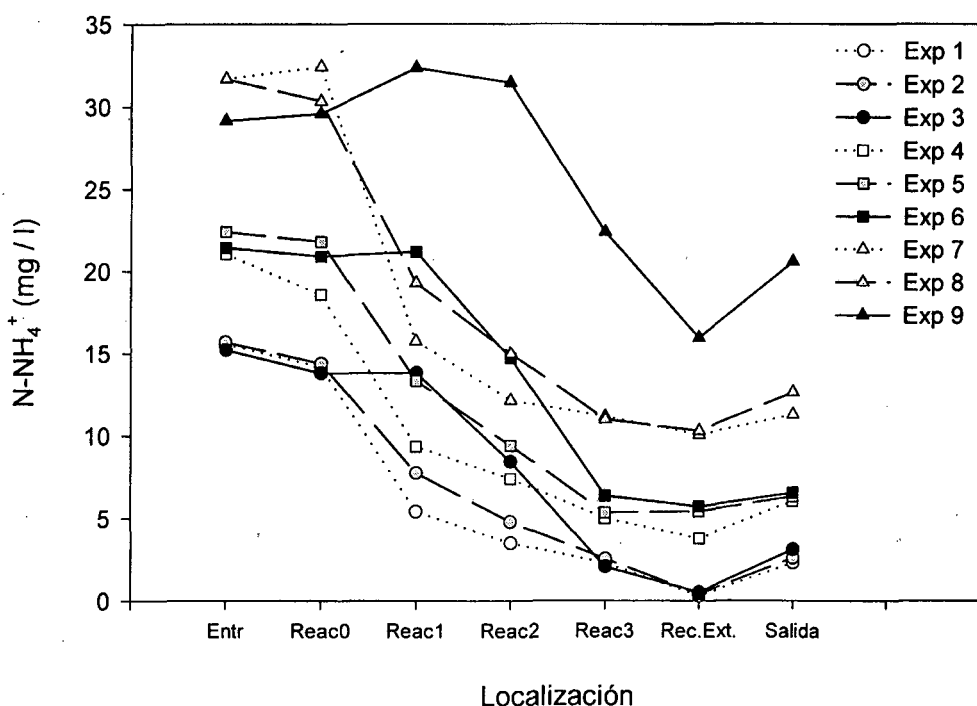


Fig. 5.4. Concentración de nitrógeno amoniacal en cada punto de la planta piloto para diferentes experimentos.

apreciable, por lo que las bacterias nitrificantes pueden estar ligeramente inhibidas para estas concentraciones poco habituales en la planta piloto. En la figura 5.4 también se pueden apreciar el funcionamiento del sedimentador. En todos los experimentos se produce una ligera disminución del nitrógeno amoniacal en la recirculación externa respecto la entrada al sedimentador (proveniente del reactor 3). También se aprecia un ligero aumento en la salida del sedimentador respecto a la entrada. Estas variaciones se producen porque el sedimentador no funciona realmente como un separador puro, sino que en él también se producen reacciones bioquímicas. Estos cambios pueden ser debidos a la mortandad y lisis celular (que provocaría un aumento de amonio en la salida de la planta) y al consumo de amonio para mantenimiento de los microorganismos recirculados (que explicaría la disminución en la recirculación).

Estudio de las velocidades de nitrificación

Con los resultados obtenidos se han calculado las velocidades de nitrificación globales en función del amonio consumido, considerando los reactores aeróbicos en conjunto. La expresión utilizada para el cálculo de la velocidad de nitrificación ha sido la siguiente:

$$R_N = \frac{([N - NH_4^+]_{\text{anóxico}} - [N - NH_4^+]_{\text{aeróbico2}}) \cdot Q_{\text{total}}}{\sum_{i=1}^2 (V_{\text{aeróbico-i}} \cdot SSV_{\text{aeróbico-i}})}$$

R_N es la velocidad de nitrificación expresada en mg de $N-NH_4^+$ consumido / mg SSV día.

En las figuras 5.5 y 5.6 se observan las velocidades de nitrificación obtenidas en los 9 experimentos. En la figura 5.5 se muestra la velocidad en función de la relación de recirculación interna utilizada, para cada una de las series experimentales.

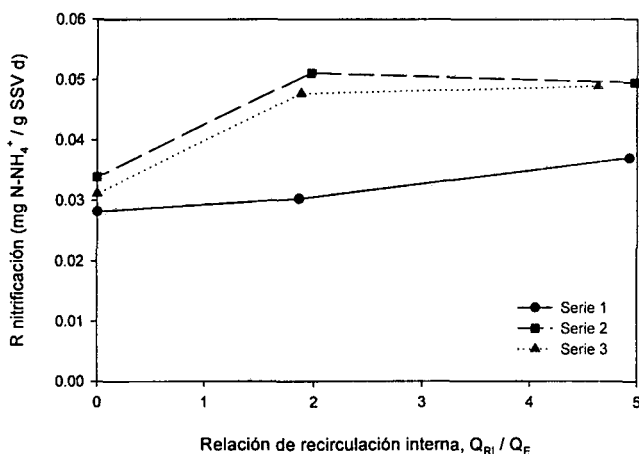


Fig. 5.5. Velocidad de nitrificación en los reactores aeróbicos en función de la recirculación interna

En la figura 5.5 se observa una máxima velocidad de nitrificación alrededor de $0.05 \text{ mg } N-NH_4^+ / \text{g SSV día}$ para relaciones de recirculación interna 2 o 5 y concentraciones de entrada de amonio de 20 o 30 mg $N-NH_4^+ / \text{l}$. Para estos cuatro experimentos, se trabaja a la velocidad máxima que se obtiene en la planta piloto. En el resto de experimentos se observan velocidades de nitrificación inferiores. En la serie 1, con una entrada de 15 mg/l, estamos trabajando posiblemente a concentraciones inferiores a la de saturación, por lo que la velocidad observada es inferior. En los experimentos de las series 2 y 3, sin recirculación interna también se observan velocidades de nitrificación inferiores, posiblemente provocadas por los altos niveles de amonio existentes por no disponer del efecto de dilución de la recirculación interna.

En la figura 5.6 se muestran los mismos resultados, pero expresados en función de la concentración de amonio en la entrada, para diferentes relaciones de recirculación.

Se puede observar que para una misma recirculación interna, la velocidad de nitrificación aumenta al pasar de 15 mg/l de nitrógeno amoniacal de entrada a 20 mg/l, para después disminuir ligeramente al aumentar a 30 mg/l. De este modo, se puede deducir que a partir de los 20 mg/l de entrada, se trabaja a la velocidad de nitrificación máxima para esa recirculación interna, y que con un aumento de la entrada de amonio no se obtendrán mayores velocidades de nitrificación, pudiéndose presentar problemas de inhibición o falta de adaptación de los microorganismos.

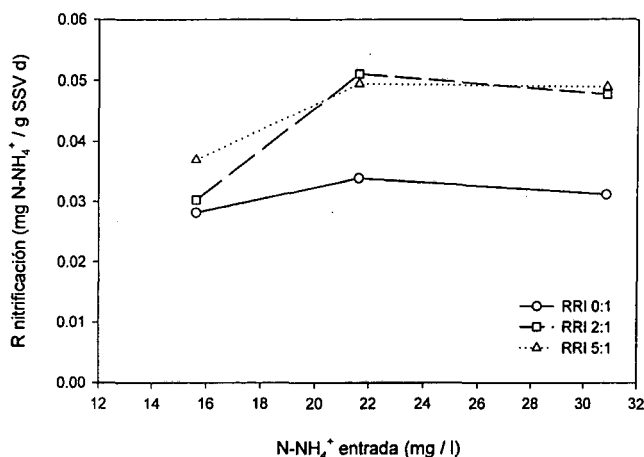


Fig. 5.6. Velocidad de nitrificación en los reactores aeróbicos en función de la entrada de amonio

Considerando que la máxima velocidad de nitrificación en los reactores aeróbicos es de $0.05 \text{ mg } N-NH_4^+ \text{ consumido} / \text{mg SSV día}$, se puede calcular una máxima capacidad de nitrificación para la planta piloto de $11 \text{ g de } N-NH_4^+ \text{ por día}$ en las condiciones experimentales utilizadas. Este cálculo se realiza

asumiendo que todo el amonio que desaparece se consume en la nitrificación. Los valores reales de nitrificación siempre serán inferiores a este valor, pues en el cálculo se cuantifica como nitrificación el nitrógeno amoniacal consumido para el mantenimiento celular de los microorganismos.

Eliminación de nitrógeno total

Uno de los objetivos de estos experimentos era observar como afectaba la recirculación interna en el porcentaje de nitrógeno eliminado. Este valor se ha calculado utilizando la siguiente expresión:

$$\%N \text{ eliminado} = \frac{N_{\text{entrada}} - N_{\text{salida}}}{N_{\text{entrada}}} * 100$$

N_{entrada} es la suma integrada de todas las formas de nitrógeno en la entrada (amonio, nitrógeno orgánico y nitrato) durante un día. N_{salida} es la suma integrada de todas las formas de nitrógeno en la salida (amonio, nitrato y nitrito). No se considera la contribución del nitrógeno orgánico a la salida, pues se trata de concentraciones despreciables frente a los otros componentes.

En la figura 5.7 se representa el porcentaje de nitrógeno total eliminado en función de la relación de recirculación interna para cada serie de experimentos.

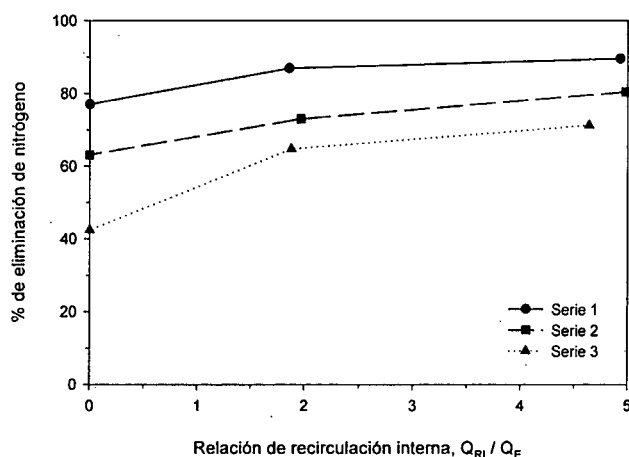


Fig. 5.7. Porcentaje de eliminación de nitrógeno en función de la relación de recirculación interna

En la figura 5.7 se puede observar que para cualquier entrada de amonio el porcentaje de nitrógeno total eliminado aumenta al incrementar la relación de recirculación interna. El aumento de la recirculación proporciona más nitratos al reactor desnitrificante, lo que se traduce en un aumento de la eliminación total de nitrógeno. También puede observarse que la mayor mejora se produce al incrementar la relación de recirculación de 0 a 2. El aumento de 2 a 5 significa una mejora en el proceso,

pero quizá no sea económicamente rentable.

Analizando cada serie, puede observarse que se obtienen unos resultados razonables. Los rendimientos de eliminación son mayores a medida que disminuye la carga de entrada a la planta.

Los porcentajes de eliminación representados no tienen en cuenta la concentración de sólidos en los reactores, únicamente consideran porcentaje de eliminación con los datos de entrada y salida de nitrógeno. Para considerar la influencia de la concentración de microorganismos, se ha representado en la figura 5.8 la carga de nitrógeno eliminada.

En la figura 5.8 puede observarse que hay una eliminación de nitrógeno reducida al trabajar sin recirculación interna, ya que no se elimina el nitrato generado en la nitrificación. También se aprecia que el aumento de eliminación al incrementar la relación de recirculación a 5 sólo se obtiene una mejora apreciable para la mayor carga de entrada.

Por otro lado, se aprecia una eliminación por unidad de biomasa muy similar independientemente de la carga de entrada a la planta piloto, lo que demuestra que se está trabajando prácticamente a la capacidad máxima de eliminación del sistema en las condiciones experimentales.

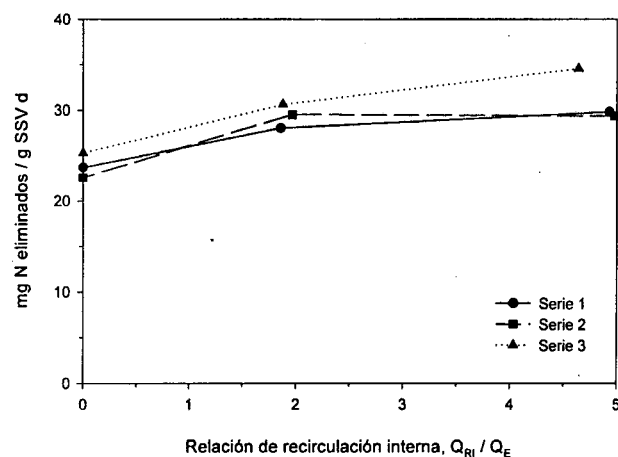


Fig. 5.8. mg N eliminados / g SSV d en función de la relación de recirculación interna

En la figura 5.9 se ha realizado la representación gráfica del nitrógeno eliminado en función de las dos variables estudiadas, la concentración de nitrógeno amoniacal en la entrada y la relación de recirculación interna. En ella se puede observar la poca influencia de la concentración de entrada a la planta en la eliminación de nitrógeno por unidad de biomasa, así como la importante mejora de introducir una recirculación interna en el proceso.

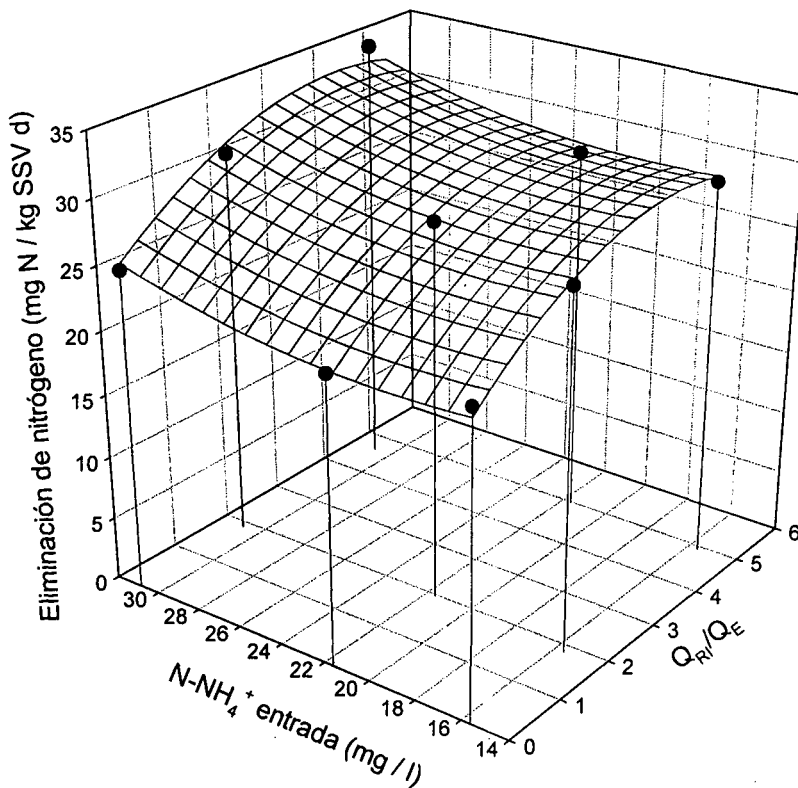


Fig. 5.9. mg de nitrógeno eliminados en función de la concentración de nitrógeno amoniacal en la entrada y de la relación de recirculación interna.

En cuanto al nitrógeno de salida, en la figura 5.10 se representa la integral de los mg de nitrógeno en forma de amonio, nitrato o nitrito que aparecen en el efluente por gramo de SSV y día. Con estos parámetros se obtiene un valor comparativo, entre experimentos con diferente concentración de microorganismos, de la fracción de cada especie del nitrógeno que no se elimina. Puede observarse como para cada serie, la eliminación de nitrógeno se ve empeorada cuando disminuye la recirculación interna. También se observa como la cantidad de nitrato y nitrito son las variables que diferencian en mayor medida los resultados de eliminación de los experimentos. En las series 1 y 2 puede observarse como la fracción de amonio de la salida permanece prácticamente constante, lo que indica que en estas condiciones de entrada, la influencia de la recirculación interna es únicamente sobre la desnitrificación. En la tercera serie se observa el problema de inhibición de la nitrificación o falta de aclimatación de los microorganismos a las concentraciones de amonio tratadas en el experimento sin recirculación interna.

Como resumen, se puede concluir que siempre se obtiene un rendimiento global de eliminación superior trabajando con una relación de recirculación 5 a 1. Con una relación de recirculación inferior la relación coste / beneficio es más favorable, porque se elimina un poco menos pero el consumo energético es bastante inferior.

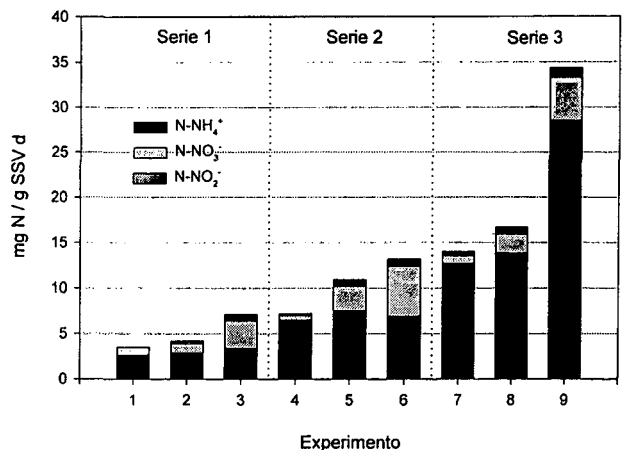


Fig. 5.10. mg N en el efluente / g SSV d

5.1.2. DESNITRIFICACIÓN

El objetivo principal de este experimento es la evaluación de la capacidad de desnitrificación máxima de la planta en condiciones de entrada de materia orgánica, amonio y nitrógeno orgánico constantes. También tiene como objetivo el estudio de la relación entre la concentración de nitrato en el reactor anóxico y el potencial de óxido-reducción.

5.1.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización del experimento, se elimina la recirculación interna, para que la única entrada de nitrato al reactor anóxico sea la proporcionada por una bomba externa de una manera controlada. Al trabajar de este modo, el sistema tiene un único aporte de nitrato, por lo que se simplifican los cálculos y se introduce una fuente de error menos en el sistema.

La estrategia utilizada consiste en adicionar directamente al reactor anóxico diferentes concentraciones crecientes de N-NO_3^- . En el momento en que aparece nitrato en la salida del reactor anóxico, es cuando se ha sobrepasado la máxima capacidad de desnitrificación. A partir de ese momento se continúa adicionando nitrato, para comprobar la evolución del potencial redox en el reactor anóxico.

En experimentos anteriores, se había comprobado que el nitrato que entraba a la planta, proveniente del agua de red, era eliminado totalmente en el reactor anaeróbico. Por tanto, la única entrada de nitrato al reactor era la regulada externamente.

Los parámetros de operación de la planta piloto se muestran en la tabla 5.5.

Parámetro	Unidades	Valor
N-NH_4^+	mg/l	19
SSV anóxico	mg/l	4160
T_{media}	°C	21
pH_{medio}		6.7
$V_{\text{anóxico}}$	l	28
θ_c	d	20
Q_E	l/d	436
Q_{RE}	l/d	147
Q_{RI}	l/d	0
$Q_{\text{bomba nitrato}}$	l/d	3.456
DQO_E	mgO_2/l	425

Tabla 5.5. Condiciones experimentales

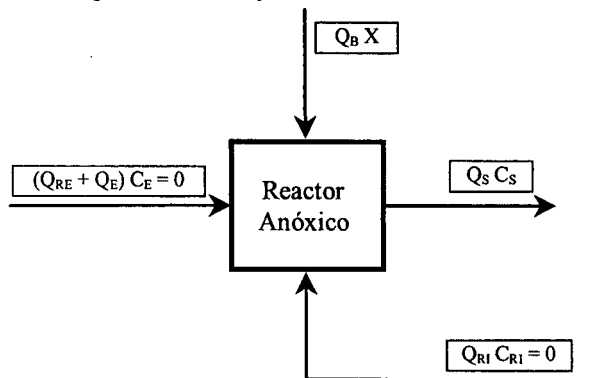
Donde:

$Q_{\text{bomba nitrato}}$ Caudal de N-NO_3^- adicionado
 $\text{SSV}_{\text{anóxico}}$ Sólidos en suspensión volátiles en el reactor anóxico (mg/l)

La disolución de nitrato se preparó a partir de NaNO_3 (Merck 99.5 % de pureza), dosificándose mediante una bomba peristáltica Masterflex ajustada para dar un caudal de 2.4 ml/min.

Para conocer aproximadamente la concentración de N-NO_3^- a adicionar se ha aplicado un balance de materia alrededor del reactor anóxico (figura 5.11).

Fig. 5.11. Entradas y salidas del reactor anóxico



Suponiendo condiciones de estado estacionario en el reactor se obtiene la ecuación siguiente:

$$R_d = \frac{(Q_S \cdot C_S) - ((Q_{RI} \cdot C_{RI}) + (Q_B \cdot X) + (Q_{RE} + Q_E) \cdot C_E)}{V_{\text{anóxico}} \cdot \text{SSV}_{\text{anóxico}}}$$

Donde:

- R_d Velocidad de desnitrificación ($\text{mg N-NO}_3^- / \text{mg SSV d}$)
- Q_S Caudal de salida del reactor anóxico: $Q_S = Q_E + Q_{RE} + Q_{RI} + Q_B$ (l/d)
- C_S Concentración de N-NO_3^- a la salida del reactor anóxico (mg/l)
- Q_{RI} Caudal de recirculación interna (mg/l)
- C_{RI} Concentración de N-NO_3^- en la recirculación interna (mg/l)
- Q_B Caudal de N-NO_3^- adicionado (l/d)
- X Concentración de N-NO_3^- a adicionar
- Q_{RE} Caudal de recirculación externa (l/d)
- Q_E Caudal de entrada (l/d)
- C_E Concentración de N-NO_3^- en la entrada del anóxico (mg/l)

Considerando que la recirculación interna está cerrada ($Q_{RI}=0$) y que en el reactor anaeróbico se elimina todo el nitrato del alimento, sólo queda un término de entrada.

De experimentos anteriores se ha calculado una velocidad de desnitrificación $R_d = 0.045 \text{ mg N-NO}_3^- / \text{mg SSV d}$. Si C_S es muy pequeña o 0, se puede calcular X (concentración de nitrato a adicionar). Con estas consideraciones, se obtiene una concentración de 1500 mg/l de N-NO_3^- , valor inicial utilizado.

Durante las 28 horas de duración del experimento, se adicionaron diferentes concentraciones de nitrato, tal como se muestra en la tabla 5.6 y en la figura 5.12.

Tiempo experimento (h)	Duración adición (h)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	Carga (kg N-NO ₃ ⁻ /m ³ .d)
0-1	1	0	0
1-6	5	1500	0.185
6-10	4	1750	0.216
10-13	3	2400	0.296
13-17	4	3400	0.419
17-22	5	5000	0.617
22-25	3	4000	0.493
25-28	3	0	0

Tabla 5.6. Concentraciones y cargas adicionadas

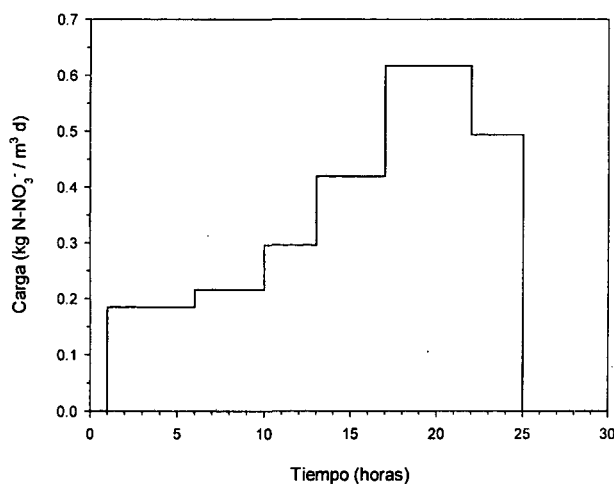


Fig. 5.12. Perfil de la carga de entrada de nitrato

5.1.2.2 RESULTADOS DE ELIMINACIÓN

Mediante el sistema de muestreo automático y el sistema de filtración tangencial, obtenemos muestras libres de biomasa de los reactores 1, 2 y 3, que son posteriormente analizadas por los equipos FIA y CFA.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se puede observar la evolución de cada parámetro (N-NH₄⁺, N-NO₂⁻ y N-NO₃⁻) en los reactores 1, 2 y 3.

En la figura 5.13 se observa como la concentración de amonio en el reactor 1 es prácticamente constante, lo que muestra que la carga de nitrógeno amoniacal y orgánico en la planta no varían a lo largo del experimento. En los reactores 2 y 3 se puede observar como después de unas cinco horas, disminuye la concentración de amonio, mientras que la de nitrato y nitrito aumentan (figuras 5.14 y 5.15). Esta disminución, de unos 3 mg/l en el reactor 3, puede ser debida al consumo de DQO por la desnitrificación. La DQO de entrada a la planta,

puede ser acumulada por determinados microorganismos en el reactor anaeróbico. Estos microorganismos, unidos a otros microorganismos heterótrofos, son capaces de consumir esta DQO utilizando el nitrato como aceptor final de los electrones provenientes de la oxidación de la materia orgánica. Durante las primeras horas de monitorización es posible que el consumo de la DQO disponible esté limitado porque el nitrato adicionado no sea suficiente para consumir la concentración inicial de DQO. Si no se consume toda la DQO en los reactores anaeróbico y anóxico, es posible que persista cierta concentración en los reactores aeróbicos, lo que influiría en los microorganismos nitrificantes. La influencia no es directa, sino que aparece por la competencia de los microorganismos heterótrofos respecto al amonio disponible en el medio. Los heterótrofos utilizan este amonio para mantenimiento y crecimiento celular, lo que limita su disponibilidad para los autótrofos nitrificantes y provoca la disminución en su crecimiento.

A partir de las cinco horas del experimento el nitrógeno amoniacal se mantiene estable en cada reactor, observándose una mayor nitrificación en el reactor 3 (segundo aeróbico). Únicamente al final del experimento se observa una ligera disminución del amonio en los reactores 2 y 3, provocada por una pequeña parada de 15 minutos debida a una alarma de la planta piloto sobre las 26 horas de experimento. No se observa acumulación de nitrógeno amoniacal ni inhibición de la nitrificación (por presencia de HNO₂) cuando aparecen las mayores concentraciones de nitrato y nitrito en los reactores 2 y 3 (ver figura 5.14 y 5.15).

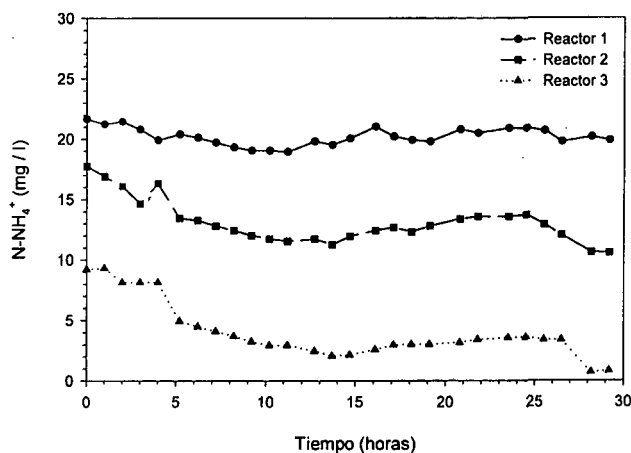


Fig. 5.13. Evolución del N-NH₄⁺

En referencia al nitrito (figura 5.14) y nitrato (figura 5.15), se observa que durante las primeras 15 horas no hay acumulación en el reactor anóxico, lo que indica que se estaba desnitrificando todo el nitrato añadido. El nitrato y nitrito detectado en los

reactores aeróbicos proviene únicamente de la nitrificación del amonio de entrada.

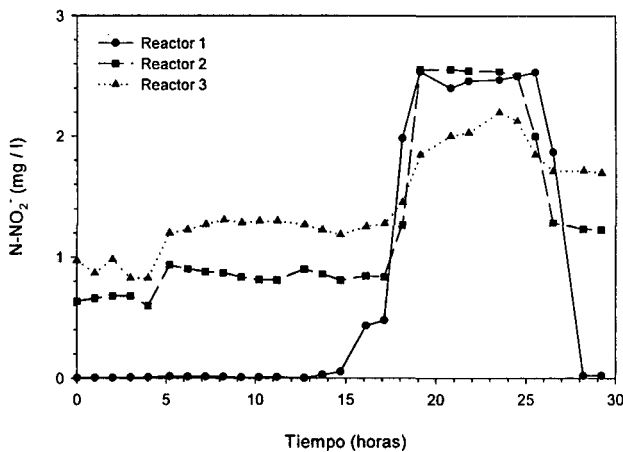


Fig. 5.14. Evolución del N-NO_2^-

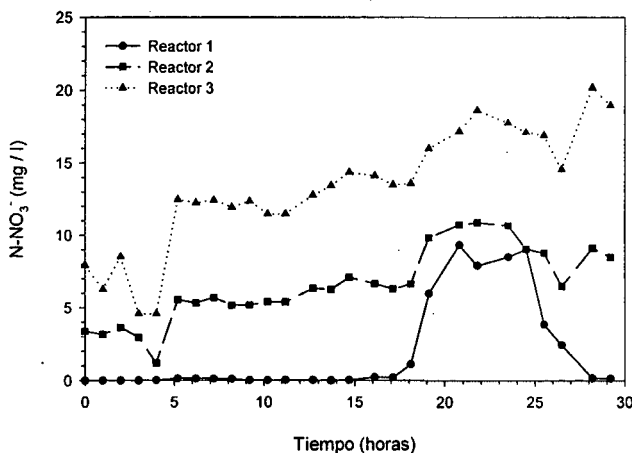


Fig. 5.15. Evolución del N-NO_3^-

Entre las 15 y 16 horas el reactor anóxico no puede consumir toda la carga de nitrato añadida, por lo que se empieza a detectar la presencia de nitrito. Entre las 17 y 18 horas empieza a aparecer nitrato, ya que sólo se puede desnitrificar una parte del que entra. Esta limitación en la desnitrificación puede estar producida por la falta de disponibilidad de materia orgánica fácilmente biodegradable o porque la velocidad de desnitrificación no es suficientemente elevada para tratar la carga de nitrato introducida. En los dos reactores aeróbicos también se nota un incremento de los dos parámetros, porque además del nitrato y nitrito generado por la nitrificación, se está introduciendo el no desnitrificado en el reactor anóxico. También se puede observar la rápida recuperación de la planta después de parar la adición de nitrato. Durante las últimas horas, en las que no se efectúa adición, desaparece rápidamente la acumulación de nitrato en el reactor anóxico.

En la figura 5.16 se representa la eficacia de eliminación de N-NO_3^- en función del tiempo. Se puede observar como disminuye a partir de las 17 horas del experimento. También se observa que ésta se recupera al cabo de unas pocas horas, cuando la carga vuelve a disminuir. La disminución de la eficacia de eliminación únicamente es apreciable a partir de la carga de entrada máxima, $0.617 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{m}^3\cdot\text{d}$, donde se aprecia la limitación de la capacidad de desnitrificación por la presencia de nitrato y nitrito en el reactor.

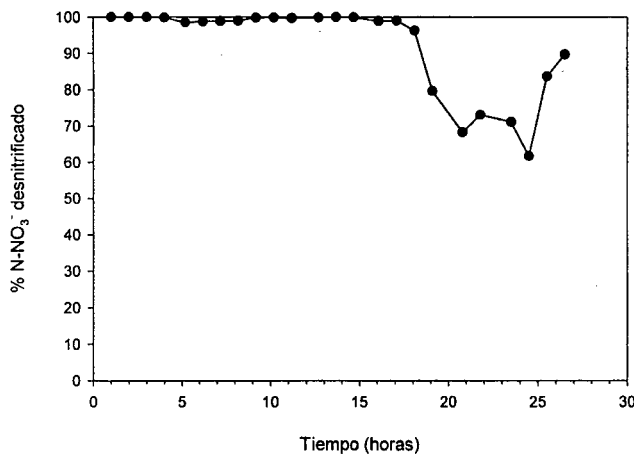


Fig. 5.16. Eficacia de eliminación

Considerando que hasta las 17 horas no aparece una limitación en la desnitrificación, y que durante este periodo se adicionan $0.42 \text{ kg/m}^3 \text{ d}$, se obtiene una capacidad máxima de desnitrificación en la planta piloto de $12 \text{ g de N-NO}_3^-/\text{d}$.

Comparando este dato con la capacidad de nitrificación encontrada anteriormente ($11 \text{ g de N-NH}_4^+/\text{d}$), observamos que la eliminación de amonio y la desnitrificación están bastante equilibradas. Si en lugar de eliminación de amonio consideramos únicamente nitrificación, la formación de nitrato será inferior a la desaparición de amonio, por lo que estaremos en unas condiciones en que no se generará tanto nitrato para ser desnitrificado. Por tanto, el reactor anóxico puede estar sobredimensionado y parte de su volumen puede estar siendo desaprovechado. Para comprobar esta hipótesis se realizan varios experimentos que son comentados en la sección 5.2.

5.1.2.3 POTENCIAL REDOX

Uno de los objetivos de este experimento era la observación del potencial de óxido-reducción (redox) en el tanque anóxico, para poder establecer alguna relación con la concentración de especies de nitrógeno oxidadas (nitrito y nitrato). El redox, o ORP, es una medida de la actividad de los electrones que participan en las reacciones de óxido-reducción en medios acuosos. Su valor es función de la

concentración de todas las especies químicas capaces de ceder o ganar electrones, es decir, que participan en reacciones de transferencia de electrones. Cuanto más alta es la concentración de especies oxidadas, mayor es el redox. En el reactor anóxico el redox es negativo, porque no hay especies oxidantes o su concentración es pequeña.

Las especies oxidantes más habituales en los sistemas de lodos activos son, en orden de capacidad oxidante, sulfato, nitrito, nitrato y oxígeno. La presencia de una especie más oxidante enmascara las actividades oxidantes de las especies menos oxidantes. Por ejemplo, si en un sistema se dispone de oxígeno disuelto, el potencial redox observado dependerá directamente de su concentración, independientemente de la presencia de nitrato. El cambio en la concentración de nitrato modificará muy poco el potencial redox.

Otro de los factores que influye en el potencial redox es la variación de la concentración de las especies reducidas. En el caso estudiado, estas especies se suelen asimilar a la DQO, que es la materia reducida que será oxidada por los microorganismos utilizando el nitrato. La disminución de la DQO incrementa el potencial redox del sistema si el resto de factores permanece constante.

En la figura 5.17 se puede observar la evolución del potencial redox y de las concentraciones de nitrato y nitrito durante el experimento.

Durante las primeras 17 horas del experimento, a pesar de que no se acumula N-NO_3^- en el reactor

anóxico, se observa un aumento del potencial redox. El analizador no es suficientemente preciso para detectar las pequeñas concentraciones de nitrato en el reactor anóxico, pero siempre existen ciertas cantidades. En el experimento se adiciona una corriente de nitrato significativa, pero la velocidad de consumo posible es superior, por lo que no existe acumulación. La adición de un caudal concentrado de nitrato requiere cierto tiempo para su homogeneización con el líquido del reactor. También existe una limitación en la velocidad de transferencia de nitrato desde el seno del líquido al interior del flóculo de microorganismos, por lo que la concentración de nitrato en el líquido difícilmente es cero en las condiciones de trabajo.

Si se observa la figura 5.17, para cada aumento de adición de nitrato existe una respuesta del redox del sistema. Al introducir la primera concentración de nitrato el redox pasa de -300 a -240 mV, sin cambios apreciables en la concentración de nitrato. Esta variación puede estar provocada por la disminución de la DQO del sistema, que es utilizada por los microorganismos desnitrificantes, y la presencia de concentraciones muy reducidas de nitrato.

En el siguiente periodo de adición no se detecta un cambio apreciable, pero a partir del tercero se produce un aumento constante que alcanza un valor de -160 mV para el periodo de adición máxima (de 17 a 22 horas). El inicio del aumento de potencial coincide con la aparición de las primeras concentraciones detectables de nitrito en el sistema sobre las 13 horas. Los valores máximos son

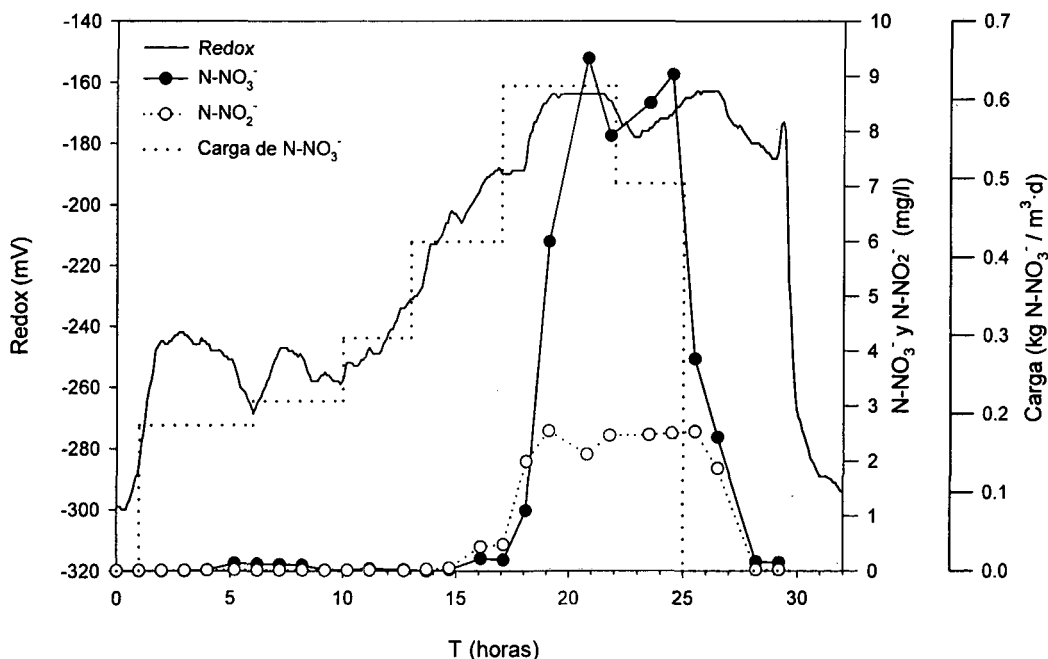


Fig. 5.17. Evolución de la concentración de nitrato y nitrito, del potencial redox y de la carga de nitrato adicionada durante el experimento

coincidentes con las mayores concentraciones de nitrato y nitrito que aparecen durante el experimento, pero también pueden ser interpretados como la desaparición de la materia orgánica fácilmente biodegradable.

Durante el último periodo, en el que se disminuye un poco la adición, puede observarse que no hay cambios significativos en el redox ni en la concentración de nitrato y nitrito, ya que todavía se trabaja a una carga superior a la desnitrificable en el sistema.

Por último, cuando se detiene la adición, el nitrato y el nitrito disminuyen rápidamente, pero el potencial redox no tiene una respuesta tan rápida. Puede observarse que para tiempo entre 28 y 29 horas el redox prácticamente no varía, pero la concentración de nitrato y nitrito desaparecen casi totalmente. A partir de las 29.5 horas el redox baja muy

rápidamente desde -180 a -290 mV en prácticamente media hora. Esta bajada se puede asociar a la desaparición total de nitrato unida a la presencia de DQO que no se puede desnitrificar por falta de un aceptor de electrones.

Como conclusión al experimento, se puede decir que la medida del potencial redox nos da una idea del estado óxico del sistema, pero que este valor no se puede relacionar directamente con la concentración de nitrato en condiciones de no presencia de oxígeno. Por ejemplo, en nuestro sistema se obtienen potenciales redox entre -200 y -300 mV para la misma concentración de nitrato de aproximadamente 0 mg/l. La concentración de las otras especies que también influyen en el potencial redox, como DQO, hace más difícil la obtención de información cuantitativa del sistema, aunque ofrece una información cualitativa que puede ser de interés.

5.2 ANÁLISIS DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL

Para el estudio de la utilidad de algunas estrategias de control en plantas depuradoras se ha realizado una serie de experimentos en la planta piloto. En ellos se estudia la respuesta del sistema a diferentes estrategias de operación y control, que tienen como objetivos la eliminación máxima de DQO y nitrógeno, unido al menor consumo energético posible.

Durante los experimentos, no sólo se estudia la respuesta de la planta piloto a las diferentes estrategias de control, sino que también se valida el sistema experto en la gestión y control del proceso. Es una comprobación de la operación de todo el sistema de control distribuido, desde la transmisión de datos en tiempo real entre los diferentes elementos del sistema a la ejecución de los programas desarrollados en unas condiciones de operación reales durante un periodo de más de 6 meses.

5.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la comprobación del funcionamiento del sistema experto se han planificado diferentes experimentos con condiciones de alimentación idénticas. De este modo se estudian los resultados de eliminación de la planta piloto cuando se aplican diferentes estrategias de operación y control. Los cambios de alimentación son realizados automáticamente por el ordenador de monitorización y control de la planta piloto, y el sistema experto no utiliza estos valores para decidir la actuación a realizar. La situación que se intenta emular es la de una planta real que no dispone de analizadores que proporcionen información sobre el influente. El módulo de eliminación de nitrógeno del sistema experto actúa únicamente en función de la concentración de amonio, nitrato y nitrito en el efluente de la planta piloto. Realmente sólo se dispone de esa información, ya que el sistema automático de toma de muestras está programado para que únicamente se tome muestra del efluente de la planta. De este modo se obtiene una mayor frecuencia de análisis en el punto de interés (un valor de amonio, nitrato y nitrito cada diez minutos).

En todos los experimentos se utiliza un control de pH sobre el reactor 3 con una consigna de 7.5 y utilizando bicarbonato, lo que favorece las condiciones para los microorganismos nitrificantes. También se mantienen unas condiciones fijas de

tiempo de residencia celular ($\theta_C = 10$ días). Este valor es controlado mediante el sistema experto.

5.2.2 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Las estrategias de operación y control implementadas en el sistema experto vienen determinadas por las capacidades de la planta piloto. En el sistema experimental se pueden modificar los siguientes parámetros de operación:

- Caudal de recirculación interna
- Caudal de recirculación externa
- Consignas de oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3.

Estos parámetros de operación nos permiten modificar el comportamiento de la planta piloto y mejorar su rendimiento de eliminación si son modificados en las circunstancias convenientes.

Cada una de las variables manipulables es modificada en función de los parámetros especificados a continuación:

- **Caudal de recirculación interna.** Se podría trabajar con un caudal fijo, pero generalmente se establece un caudal en relación con el caudal de entrada a la planta para obtener mejores resultados de eliminación de nitrato. Esta relación de recirculación interna se modifica en función de la concentración de nitrógeno en forma oxidada en la salida de la planta. Se establecen diferentes valores de relación en función del valor de $N-NO_x$:

$$\begin{aligned} N-NO_x < 0.5 \text{ g/l} &\Rightarrow Q_{RI}/Q_E = 1 \\ 0.5 \text{ g/l} < N-NO_x < 1.5 \text{ g/l} &\Rightarrow Q_{RI}/Q_E = 2 \\ N-NO_x > 1.5 \text{ g/l} &\Rightarrow Q_{RI}/Q_E = 4 \end{aligned}$$

La relación de recirculación máxima utilizada es 4, ya que es la máxima que se puede obtener con la bomba de recirculación interna para los caudales de entrada máximos. La mínima establecida es 1, porque siempre existe una concentración de amonio en la entrada, que tendrá que ser nitrificada y posteriormente desnitrificada. Esta recirculación también tiene un efecto positivo en la homogeneización de los reactores y en el consumo de DQO por las bacterias desnitrificantes.

Si se trabaja con una relación de recirculación constante se utiliza una relación de $Q_{RI}/Q_E = 2$, valor con el que se obtienen generalmente resultados adecuados de eliminación frente a coste.

- **Caudal de recirculación externa.** También se puede trabajar con un caudal fijo de recirculación externa (tal como se hace en el primer experimento), pero generalmente se trabaja con una relación de recirculación externa fija. El valor utilizado en los experimentos es $Q_{RE}/Q_E = 0.5$, pero en determinadas ocasiones, este valor se puede incrementar a $Q_{RE}/Q_E = 1$ durante cierto periodo de tiempo para hacer frente a determinadas cargas de nitrógeno o DQO en la entrada. Si se detecta una concentración de nitrógeno amoniacal a la salida mayor de 1.0 mg/l, o si la OUR en los reactores aeróbicos supera un valor de 0.012 mg O₂ / l s, se incrementa a una relación $Q_{RE}/Q_E = 1$ durante unas horas, para que los sólidos acumulados en el sedimentador puedan introducirse de nuevo en los reactores, lo que aumenta transitoriamente su concentración.
- **Consigna de oxígeno disuelto en el reactor 1.** En una configuración estándar de la planta piloto, este reactor trabaja en condiciones anóxicas (consigna de oxígeno 0 mg/l). En experimentos anteriores se ha podido comprobar que el reactor dispone de una capacidad desnitrificante mayor de la necesaria, por lo que es posible aprovechar el reactor para favorecer la nitrificación. Para ello se han probado diferentes ciclos aeróbicos/anóxicos para comprobar si se mejora la eliminación global de nitrógeno. Para realizar estos ciclos, el sistema experto cambia la consigna de oxígeno disuelto en el reactor 1 de 0 mg/l a 3 mg/l cíclicamente. En los experimentos se ha probado con diferente duración de los ciclos para comprobar la validez de esta estrategia. Para la aplicación automática de este modo de operación se utiliza un valor límite de 1.0 mg/l de N-NH₄⁺ a la salida. Cuando el valor medido supera este límite se inician los ciclos de aireación, y cuando se mide un valor inferior, se retorna a operación anóxica.
- **Consigna de oxígeno disuelto en el reactor 2.** Este reactor tiene condiciones aeróbicas (consigna de 3 mg/l) cuando la planta piloto está funcionando normalmente. En circunstancias en que la carga de la planta es escasa (por ejemplo durante la noche) puede no ser necesario mantener las condiciones aeróbicas, ya que en condiciones anóxicas (consigna de 0 mg/l) la eliminación de DQO puede seguir realizándose, se favorece la desnitrificación

y se obtiene un consumo menor de aire. Para la aplicación de este modo de operación se utiliza un valor límite de 0.3 mg/l de N-NH₄⁺ a la salida. Cuando el valor medido es inferior a este valor, la operación se hace anóxica. Cuando se supera el límite se retorna a operación aeróbica.

- **Consigna de oxígeno disuelto en el reactor 3.** En condiciones de operación habituales, este es un reactor aeróbico con una consigna de oxígeno disuelto de 3 mg/l. Cuando la planta piloto está funcionando con una relación de recirculación interna $Q_{RI}/Q_E = 4$, el aporte de oxígeno del reactor 3 al reactor 1 mediante la recirculación interna puede ser muy elevado, tal como se puede observar en algún experimento. Esto puede provocar la presencia de oxígeno en el reactor 1 y por lo tanto la inhibición de la desnitrificación. Para solventar este problema se establece una consigna de oxígeno disuelto de 1 mg/l para esa relación de recirculación interna.

5.2.3 PERFIL DE ALIMENTACIÓN

Para que las condiciones de operación de la planta depuradora sean comparables a las de una planta real se ha diseñado una alimentación variable en caudal y composición, que intenta emular su composición.

El perfil de alimentación resultante se aplica en casi todos los experimentos realizados. Únicamente en el n° 23 y el n° 24 se utiliza una entrada diferente, para hacer un estudio de la respuesta del sistema a diferentes cargas constantes de nitrógeno y DQO.

La variación de la carga de entrada a la planta piloto se ha realizado modificando el caudal de entrada de agua de red y los caudales de concentrados de alimento. El modo en que se pueden variar estos parámetros de operación se detallan en el apartado 4.2.8.

En la tabla 5.7 se muestran los valores de los parámetros que caracterizan la entrada.

En la tabla se puede observar el intervalo de dosificación utilizado para cada concentrado de alimento durante cada periodo de una hora especificado. Este intervalo indica la frecuencia que establece el PLC para efectuar cada dosificación. A esta dosis variable deben sumarse cinco dosificaciones extra que se realizan cada cinco minutos, para evitar el descebado de la bomba dosificadora. El cálculo del número de

tiempo (h)	Intervalo de dosificación (s)		Caudal de agua de entrada (ml / min)		Caudal de concentrado (ml / min)		N-NH ₄ ⁺ teórico (mg / l)	DQO teórica (mg O ₂ / l)	N-NH ₄ ⁺ experimental medio (mg / l)	DQO experimental media (mg O ₂ / l)
	nitrógeno	carbono	ml / min	nitrógeno	carbono					
0	28	30	215	0.85	0.81	14.1	334	14.4	328	
1	35	37	200	0.73	0.71	13.1	312	13.2	303	
2	65	67	190	0.52	0.51	9.8	237	9.4	230	
3	100	102	180	0.43	0.43	8.6	209	7.8	202	
4	200	202	180	0.35	0.35	7.0	171	6.1	166	
5	200	202	185	0.35	0.35	6.8	166	5.8	169	
6	160	162	200	0.37	0.37	6.7	162	5.4	166	
7	100	102	225	0.43	0.43	6.9	167	5.8	183	
8	45	47	255	0.63	0.61	8.9	213	7.6	229	
9	25	27	285	0.92	0.87	11.5	271	10.7	279	
10	18	20	330	1.17	1.08	12.7	293	12.6	306	
11	13	15	365	1.52	1.35	14.8	335	15.4	348	
12	10	11	405	1.89	1.74	16.7	385	17.2	402	
13	8	10	420	2.30	1.89	19.5	417	19.9	422	
14	7	9	430	2.58	2.07	21.4	450	21.5	461	
15	6	7	440	2.97	2.58	24.0	533	24.1	562	
16	6	7	440	2.97	2.58	24.0	533	24.0	553	
17	7	8	415	2.58	2.30	22.2	499	22.0	512	
18	7	8	390	2.58	2.30	23.6	530	23.2	534	
19	8	9	360	2.30	2.07	22.7	516	22.6	524	
20	10	11	330	1.89	1.74	20.4	471	20.7	483	
21	12	14	290	1.62	1.43	19.9	446	19.9	446	
22	15	16	250	1.35	1.28	19.2	454	19.3	458	
23	23	24	220	0.97	0.95	15.8	378	16.6	381	

Tabla 5.7. Parámetros que definen el perfil de entrada de la planta piloto

dosificaciones total por minuto se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$\text{N}^\circ \text{ dosificaciones} = \frac{\left(\frac{300 \text{ segundos}}{\text{Intervalo dosificación}} + 5 \right)}{5 \text{ minutos}}$$

El caudal de concentrado utilizado se obtiene multiplicando el número de dosificaciones por el volumen de cada dosificación, 0.27 ml.

La concentración de nitrógeno amoniacal teórica se calcula utilizando la concentración analizada del concentrado de sustancias nitrogenadas (ver apartado 3.6), 3600 mg de N-NH₄⁺ por litro. La expresión utilizada es la siguiente:

$$[N - NH_4^+]_{\text{teórico}} = \frac{Q_{\text{Conc.N}} \cdot [N - NH_4^+]_{\text{Conc.N}}}{Q_{\text{agua}} + Q_{\text{Conc.N}} + Q_{\text{Conc.C}}}$$

La DQO teórica se calcula utilizando las DQO analizadas de los dos concentrados nitrogenadas (ver apartado 3.6). La solución concentrada de fuentes de carbono tiene una DQO de 62000 mg O₂ / l, mientras que la solución de fuentes de nitrógeno es de 26000 mg O₂ / l. Utilizando la siguiente ecuación se obtienen los valores teóricos:

$$DQO_{\text{teórica}} = \frac{Q_{\text{Conc.N}} \cdot DQO_{\text{Conc.N}} + Q_{\text{Conc.C}} \cdot DQO_{\text{Conc.C}}}{Q_{\text{agua}} + Q_{\text{Conc.N}} + Q_{\text{Conc.C}}}$$

Las dos últimas columnas de la tabla indican las concentraciones medias medidas durante los experimentos realizados. Como puede observarse existe una gran correlación entre los valores teóricos y los experimentales. Este dato es de gran importancia, ya que la reproducibilidad de la composición de alimento es una característica de gran importancia si se quiere obtener resultados fiables de funcionamiento de la planta piloto.

A continuación se presentan diferentes figuras que representan los datos relacionados en la tabla 5.7. En la figura 5.18 se muestra el perfil de entrada de agua de red durante las 24 horas de experimento. En ella se observa como el caudal permanece constante durante una hora, hasta el siguiente cambio de consigna.

En la figura 5.19 se representa la variación de la DQO de entrada calculada teóricamente y la DQO media analizada durante los experimentos. Los análisis de cada uno de los experimentos presentan una mayor dispersión, pero el promedio de todos los experimentos se acerca mucho al teórico, lo que indica que el análisis de DQO mediante el

micrométodo ofrece bastante dispersión en sus resultados.

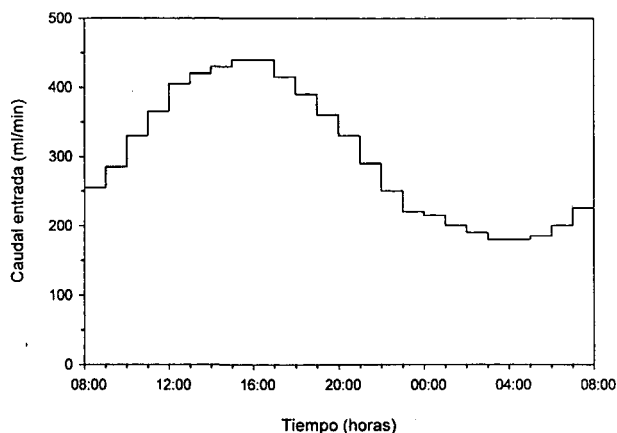


Fig. 5.18. Evolución del caudal de entrada de agua de red

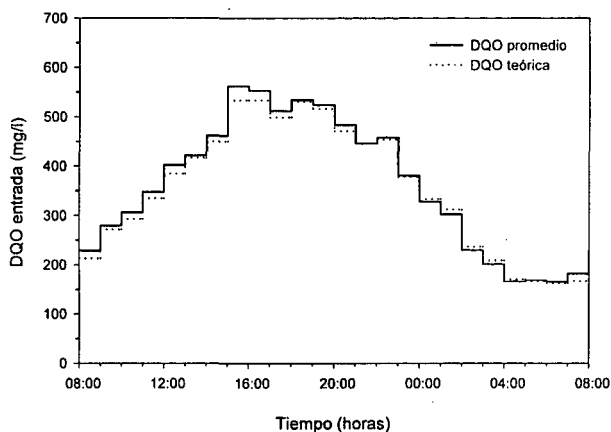


Fig. 5.19. Evolución de la DQO de entrada

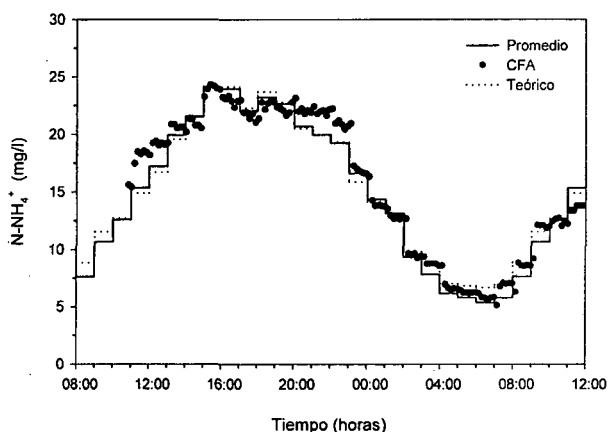


Fig. 5.20. Evolución del $N-NH_4^+$ de entrada

En la figura 5.20 se pueden observar tres perfiles diferentes de nitrógeno amoniacal. La línea continua representa el $N-NH_4^+$ teórico y la discontinua es un promedio de las medidas de nitrógeno amoniacal de los experimentos. Los puntos son el resultado de una monitorización en continuo con el analizador de

amonio CFA. Puede observarse que los resultados del analizador concuerdan en gran medida con los teóricos y con los valores promedio.

Para comprobar en los experimentos que la dosificación de los dos concentrados era la consignada, se ha controlado el peso de los dos depósitos de concentrado y se ha comparado con el valor teórico esperado. Un experimento de 24 horas con el perfil de alimentación comentado supone un consumo de 2.12 kg de concentrado de fuentes de nitrógeno y 1.90 kg de concentrado de fuentes de carbono (considerando una densidad de 1.03 kg / l, ver apartado 3.6). Para cada experimento se ha medido el peso inicial y final de los depósitos, obteniéndose resultados muy parecidos al teórico, lo que demuestra la reproducibilidad del perfil de entrada.

Teniendo en cuenta esta reproducibilidad, se ha considerado para los cálculos de cada experimento la misma entrada promedio. Los datos de entrada analizados para cada uno de los experimentos se han representado gráficamente para comprobar su ajuste al valor promedio esperado. No se han utilizado los valores analizados en cada experimento porque la medida del analizador ofrece una mayor dispersión que los caudales de dosificación de las bombas de concentrado, tal como se demuestra al comprobar el peso de concentrado utilizado en cada experimento.

5.2.4 MONITORIZACIÓN

En cada experimento se ha realizado el seguimiento de variables "in-line", "on-line" y "off-line" del proceso.

Las variables "in-line" monitorizadas son los caudales consignados (entrada, recirculación interna y recirculación externa) y los valores para los reactores 1, 2 y 3 de pH, potencial redox, temperatura, oxígeno disuelto y apertura de la válvula de aireación.

Dentro de las variables "on-line" se incluyen los análisis de $N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$ y $N-NO_3^-$ realizados mediante el sistema automático de toma de muestras y los analizadores CFA y FIA. También se incluye la estimación del consumo de oxígeno, OUR, realizada mediante el procedimiento anteriormente comentado.

Por último, las medidas "off-line" realizadas son la concentración de sólidos en los reactores, el índice volumétrico de fangos diluidos, el análisis de $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$ y $P-PO_4^{3-}$ en la entrada y la salida mediante el equipo CIA, el $N-NH_4^+$ de la entrada mediante CFA y la DQO de entrada y salida. La medida de nitrógeno orgánico en la entrada ha sido

estimada, considerando su relación con el nitrógeno amoniacal. La única contribución de nitrógeno orgánico en la entrada de la planta al igual que la concentración de amonio proviene del concentrado de fuentes de nitrógeno (de composición constante). Por otro lado, el análisis de nitrógeno orgánico utilizado se ve interferido por la presencia de DQO, por lo que se ha considerado que el error cometido con la estimación era inferior al del análisis con la interferencia de DQO en la entrada. De este modo, se han realizado diferentes diluciones del alimento concentrado de nitrógeno (de 1:100 a 1:1000), comprobándose que el nitrógeno amoniacal era de concentración 3600 mg/l y el nitrógeno total 6100 mg/l. Estos resultados muestran que el nitrógeno orgánico es un 41 % del nitrógeno total, y que puede ser calculado como 0.695 por el nitrógeno amoniacal medido a la entrada de la planta.

Las medidas "off-line" de nitrito y nitrato, realizadas mediante el analizador CIA, se han efectuado para asegurar el correcto funcionamiento y la bondad de las medidas proporcionadas por el analizador FIA durante cada experimento.

5.2.5 INFORME DE RESULTADOS

Para cada uno de los experimentos se ha realizado un pequeño informe de cuatro páginas donde se especifica las condiciones del experimento y se muestra gráficamente los resultados de la monitorización.

En la primera página de cada informe se comentan los objetivos del experimento, las condiciones experimentales (estado aeróbico de los reactores, recirculaciones utilizadas, entrada de nitrógeno, sólidos en suspensión de cada reactor y DSVI), y las incidencias de operación en la planta piloto y en los analizadores durante el periodo experimental. La entrada total de nitrógeno se calcula como suma de las contribuciones de nitrógeno amoniacal, nitrato, nitrito y nitrógeno orgánico. Los sólidos en suspensión volátiles totales del sistema se calculan como sumatorio de la contribución de los reactores 0, 1, 2 y 3:

$$SSV_T = \sum_{i=0}^4 (SSV_i \cdot V_i)$$

En la segunda página se muestran seis gráficas que muestran la evolución de las variables "in-line" durante el periodo experimental. En cada una de ellas se representa las siguientes variables:

- (a) Consignas de caudal de entrada, recirculación interna y recirculación externa.
- (b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3.

- (c) pH en los reactores 1, 2 y 3.
- (d) Potencial redox en los reactores 1, 2 y 3.
- (e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3.
- (f) Oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3.

En la tercera página del informe se muestran seis gráficas con la información proporcionada por los analizadores "on-line" y por los análisis "off-line". En cada gráfica se muestran las variables especificadas a continuación:

- (g) Nitrógeno en forma de amonio ($N-NH_4^+$) en la salida de la planta, analizado con el equipo CFA, que toma muestra de la salida en continuo mediante el sistema de toma de muestras automático.
- (h) Nitrógeno en forma de nitrato ($N-NO_3^-$) en la salida de la planta. Se analiza en continuo mediante el equipo FIA y en discontinuo mediante el analizador CIA, lo que nos permite validar el funcionamiento del analizador automático FIA.
- (i) Nitrógeno en forma de nitrito ($N-NO_2^-$) en la salida de la planta. También se analiza en continuo mediante el equipo FIA y en discontinuo mediante el analizador CIA, lo que nos permite validar el funcionamiento del analizador automático FIA para este análisis.
- (j) Velocidad de consumo de oxígeno en los reactores cuando permanecen en condiciones aeróbicas. El sistema de estimación realiza un análisis cada 10 minutos si el reactor tiene una consigna de oxígeno disuelto diferente de cero.
- (k) En esta gráfica se muestran las diferentes formas de nitrógeno en la entrada de la planta piloto. Se representa el nitrógeno en forma de amonio en la entrada, comparado con el valor medio de todos los experimentos. También se muestra el nitrógeno en forma de nitrato analizado "off-line" por el equipo FIA. Por último se representa la concentración de nitrógeno orgánico estimada.
- (l) Se representa los análisis de DQO realizados, en comparación con los valores promedio de todos los experimentos. También aparecen los análisis de DQO de salida realizados.

En la cuarta y última página de cada informe se representa una última gráfica:

- (m) Concentración de fósforo ($P-PO_4^{3-}$) en la salida y la entrada de la planta analizados "off-line" mediante el equipo CIA.

Para todas las representaciones gráficas se ha seguido un criterio de representación común. Las variables "in-line" están representadas como líneas sin símbolos, las medidas de análisis "off-line" se presentan como símbolos de color negro y las medidas "on-line" de los analizadores y las variables estimadas aparecen como símbolos de color blanco.

En la última página también se muestra un breve resumen de los resultados experimentales globales del experimento. En primer lugar, el nitrógeno integrado en sus diferentes formas a la salida de la planta (nitrógeno en forma de amonio, nitrato, nitrito y nitrógeno total).

Para realizar la suma integrada se utilizan todos los puntos mostrados en cada figura y se realiza una integral numérica por trapecios. La expresión utilizada para el cálculo a partir de $n+1$ puntos monitorizados (numerados de 0 a n) se muestra a continuación:

$$Suma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \cdot \frac{C_i + C_{i-1}}{2} (t_i - t_{i-1}) \right)$$

Donde:

- t_i Tiempo de análisis del parámetro
- Q_i Caudal de salida para el tiempo t_i
- C_i Concentración de salida del parámetro para el tiempo t_i

De este modo, para cada intervalo de tiempo entre t_i y t_{i-1} se calcula un promedio de carga ($Q \cdot C$) que se multiplica por la duración del intervalo. La suma de las contribuciones de todos los intervalos es una buena aproximación al nitrógeno en esa forma que ha salido por la planta.

El nitrógeno en forma de amonio, de nitrato y de nitrito se calcula del modo anterior, pero el nitrógeno total se calcula como suma de las contribuciones de esas tres formas de nitrógeno. No se tiene en cuenta el nitrógeno orgánico que pueda salir, ya que su concentración fue medida en algunos experimentos iniciales y era despreciable.

También se calcula para cada experimento la eliminación de nitrógeno obtenida, expresada en diferentes unidades:

- **Eliminación de nitrógeno.** Valor absoluto de nitrógeno eliminado, en g/d. El nitrógeno de entrada que se utiliza para el cálculo es el nitrógeno de entrada promedio de todos los experimentos.

$$ElimN = NT_E - NT_S$$

- NT_E Nitrógeno total de entrada
- NT_S Nitrógeno total de salida

- **% Eliminación de nitrógeno.** Valor de eliminación de nitrógeno, pero expresado en %.

$$\%ElimN = \frac{NT_E - NT_S}{NT_E} \cdot 100$$

- **%N en forma de amonio, nitrato o nitrito del NT_S .** Este valor muestra la diferente fracción de cada una de las formas en el nitrógeno que no se puede eliminar en la planta piloto.

$$\%N - NX_S = \frac{N - NX_S}{NT_S} \cdot 100$$

$N - NX_S$ Nitrógeno en forma de NX en la salida del sistema

- **mg N eliminado /g SSV d.** Eliminación de nitrógeno en el experimento, pero considerando la concentración de microorganismos. Los parámetros anteriores no tienen en cuenta si existe una población más o menos concentrada.

$$\frac{mgN}{gSSV d} = \frac{ElimN}{SSV_{TS}}$$

SSV_{TS} Sólidos en suspensión volátiles totales del sistema

- **mg N en forma de amonio, nitrato o nitrito que aparece en la salida por g de SSV y día.** Con estos parámetros se tiene un valor comparativo, entre experimentos con diferente concentración de microorganismos, de la fracción de cada especie del nitrógeno que no se elimina. Proporciona la información obtenida con el % de $N - NX_S$, pero normalizada en función de la biomasa.

$$\frac{mgN - NX_S}{kgSSV d} = \frac{N - NX_S}{SSV_{TS}}$$

Después de los resultados se comenta la evolución de las variables "in-line" y de las variables analíticas y por último se realiza una valoración global del experimento.

5.2.6 EXPERIMENTOS

Se han realizado diferentes experimentos para el estudio de la efectividad del modo de operación de la planta piloto. Para probar cada modo de operación se ha trabajado en un esquema de control en lazo abierto para probar su efecto y posteriormente se ha realizado otro experimento para implementar esa estrategia de control en lazo cerrado.

Una vez comprobado el funcionamiento correcto del modo de operación propuesto, y si los resultados de

Experimento	Estado óxico (consigna mg O ₂ / l)			Relación de recirculación	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Externa	Interna
1	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	Q=150 (ml/min)	2
2	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
3	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
4	20'aer-40'anox	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
5	30'aer-30'anox	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
6	30'aer-60'anox	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
7	10'aer-20'anox	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
8	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
9	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
10	Anóxico	Aeróbico 5	Aeróbico 5	0.5	2
11	Anóxico	Aeróbico 1	Aeróbico 1	0.5	2
12	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3	0.5	2
13	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5	1 ó 2 ó 4
14	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5	1 ó 2 ó 4
15	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5	1 ó 2 ó 4
16	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
17	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
18	Anóxico	Aeróbico 3	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
19	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
20	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
21	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
22	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
23	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
24	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4
25	Anox ó 30'aer-60'anox	Aer 3 ó Anox 0	Aeróbico 3 ó 1	0.5 ó 1	1 ó 2 ó 4

Tabla 5.8. Características de operación en cada experimento, separados por series

eliminación han sido favorables, se ha mantenido esa estrategia de control en el resto de experimentos. En general, la aplicación de uno de los modos de operación descritos no tiene influencia negativa en el resto de estrategias de operación.

En la tabla 5.8 se presentan de forma resumida los parámetros de operación utilizados para cada uno de los 25 experimentos. Existen algunos experimentos en los que se han repetido las condiciones de operación. Esta repetición se realiza para comprobar la variabilidad de la respuesta de la planta piloto a una misma entrada, así como para disponer de una referencia actualizada con la que comparar los resultados de experimentos posteriores. La planta piloto no es un sistema con comportamiento fijo, es un sistema biológico que no se encuentra en el mismo estado (concentración de lodos en los reactores, acumulación de lodos en el sedimentador, paradas de diferente duración por problemas de operación...). Todas estas variables afectan a la población de la planta y al estado de esa población, por lo que la realización de experimentos de referencia actualizados es una obligación si se quieren obtener resultados coherentes. Este hecho también obliga a mantener una cierta cautela en la

comparación de experimentos separados en el tiempo.

A continuación se comentan los experimentos realizados, agrupándolos en función de la estrategia de operación utilizada.

Experimentos 1 y 2. En estos experimentos se estudia la respuesta de la planta piloto a la entrada variable en composición y caudal, comparando la eliminación obtenida utilizando una recirculación externa de caudal constante (experimento 1) con una de relación de recirculación constante (experimento 2). El mantenimiento de la relación de recirculación constante permite la recirculación de lodos adecuada para tratar el caudal de entrada de la planta. Este control permite mantener una relación alimento/microorganismos favorable.

Experimentos 3, 4, 5, 6 y 7. En el número 3 se repiten las condiciones del nº 2. En todos ellos se mantiene una consigna de oxígeno en los reactores 2 y 3 de 3 mg/l, una relación de recirculación interna de 2 y una relación de recirculación externa de 0.5. La variable estudiada es la respuesta del sistema a un cambio cíclico de condiciones aeróbicas y anóxicas

en el reactor 1, para comprobar si se puede aprovechar su exceso de capacidad desnitrificadora para nitrificar. En los experimentos se utiliza diferente relación de tiempo anóxico/aeróbico y diferente duración del ciclo total

Experimento 8. Se repiten las condiciones de los experimentos 2 y 3 para comprobar la reproducibilidad de la respuesta de la planta ante una misma perturbación en la entrada.

Experimentos 9, 10 y 11. Se estudia la influencia de la consigna de oxígeno disuelto en los reactores aeróbicos en la nitrificación y, en consecuencia, en la eliminación de nitrógeno. En el experimento 9 se utilizan 3 mg/l, en el n° 10, 5 mg/l y en el n° 11, 1 mg/l. El resto de condiciones experimentales son: 0 mg/l de oxígeno en el reactor 1, relación de recirculación interna de 2 y relación de recirculación externa de 0.5.

Experimentos 12, 13 y 14. En estos experimentos se estudia el efecto de la recirculación interna en la desnitrificación y, por tanto, en la eliminación global de nitrógeno. El experimento 12 es de referencia y en los experimentos 13 y 14 se introduce la estrategia de control que varía la relación de recirculación interna en función de la concentración de nitrato más nitrito a la salida.

Experimentos 15, 16 y 17. De ellos se estudia el efecto de la relación de recirculación externa variable en la eliminación de nitrógeno en la planta piloto. En los experimentos 16 y 17 se incluye un aumento de la recirculación externa en determinados periodos para hacer frente al aumento de carga en la planta. Este incremento se determina en función de los valores de OUR en el reactor 2 o de la salida de nitrógeno amoniacal. En el n° 17 también se modifica la consigna de oxígeno disuelto en el reactor 3 cuando la relación de recirculación interna es 4. De este modo se evita el aporte excesivo de oxígeno al reactor anóxico, ya que este es un factor inhibitorio de la desnitrificación.

Experimentos 18, 19 y 20. Se analiza el efecto de la introducción de todas las estrategias implementadas. En el experimento 18 se utilizan las siguientes condiciones: reactor 1 anóxico, reactor 2 aeróbico con 3 mg/l de consigna, reactor 3 con consigna 3 mg/l y 1 mg/l cuando la relación de recirculación interna es 4, relación de recirculación interna variable y relación de recirculación externa constante. En los experimentos 19 y 20 se incluyen tres nuevas estrategias. En primer lugar, la ya utilizada de aumento de recirculación externa en función de la carga. En segundo lugar, se cambia el estado del segundo reactor de aeróbico a anóxico cuando se detecta baja concentración de amonio en la salida. Esto disminuye el consumo de aire en el

sistema y favorece la desnitrificación. Por último, se establece una secuencia aeróbica / anóxica en condiciones de alta carga de amonio. Se utilizan ciclos de 30' aeróbicos y 60' anóxicos en el reactor 1, la duración que favorece más la nitrificación sin influir demasiado en la desnitrificación.

Experimentos 21, 22 y 23. En estos experimentos se utilizan todas las estrategias de control implementadas. En el n° 21 la entrada es la misma, pero en el n° 22 y el n° 23 se utiliza otro tipo de entrada, constante. En el n° 22 se introducen dos caudales diferentes durante dos periodos, pero la cantidad de nitrógeno adicionado mediante las bombas dosificadoras se mantiene constante. De este modo se producen dos periodos de diferente caudal pero con igual carga. Los caudales y la dosificación se han calculado de tal modo que el caudal total y el nitrógeno total introducido durante el experimento es igual al de los experimentos anteriores. En el n° 23 se simula una condición de baja carga de nitrógeno y de DQO. Se introducen dos caudales diferentes durante dos periodos, pero la cantidad de nitrógeno adicionado mediante las bombas dosificadoras se mantiene constante. De este modo se producen dos periodos de diferente caudal pero con igual carga.

Experimentos 24 y 25. En estos experimentos se repiten las condiciones de máximo control, pero el sistema experimental ha cambiado, ya que se prueba la respuesta del sistema con un nuevo sedimentador de volumen 25 litros, en contraste con los 60 litros del anterior. La respuesta se modifica notablemente, como consecuencia del diferente comportamiento de sedimentador.

EXPERIMENTO 1

Objetivos

En este primer experimento se estudia la respuesta de la planta piloto a una entrada variable en composición y caudal. Este es el experimento con menor grado de control, por lo cual será útil como referencia para evaluar la mejora en la depuración en experimentos posteriores.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.9 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación, entrada total de nitrógeno y sólidos en suspensión volátiles en la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE constante = 150 ml/min

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4170
1	4740
2	4890
3	4930
Total sistema	445.2 gramos
DSVI	180 ml

Tabla 5.9. Condiciones experimento 1

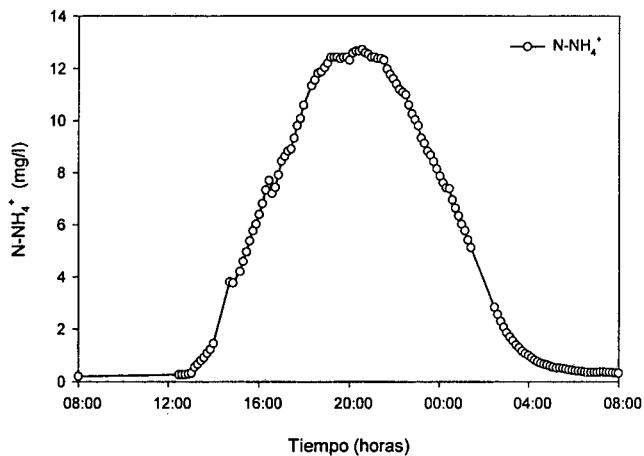
Incidencias de operación

Planta piloto

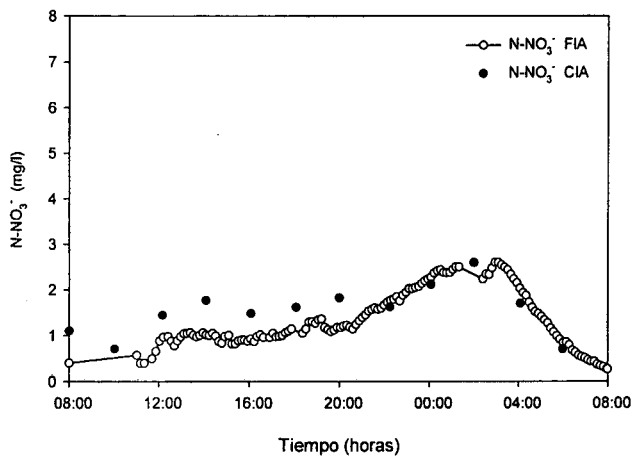
- Parada por alarma bomba de 11:07 a 11:10.
- Parada por escape de agua de 11:22 a 11:25.
- El bajo consumo de oxígeno en el reactor 3 (principalmente de 08:00 a 12:00 horas) afecta a su sistema de control, que es incapaz de mantener el punto de consigna a 3 mg/l. La válvula del sistema de aireación se ve obligada a trabajar prácticamente cerrada, en una zona no lineal. Esto implica que el control de oxígeno se asemeja más a un tipo encendido/apagado que a uno de tipo PID. La secuencia de hechos producida comienza cuando la medida supera la consigna y la válvula se cierra totalmente. Si el oxígeno baja del punto de consigna la válvula se abre ligeramente, pero tiene un gran efecto sobre el sistema y aumenta el oxígeno por encima del punto de consigna. De este modo se repite la situación anterior de exceso de oxígeno que provoca un nuevo ciclo de apertura/cierre de la válvula. Este tipo de control no es óptimo, pero es una limitación física del sistema, provocado por la falta de precisión del sistema de aireación para bajo consumo de oxígeno.
- Otro efecto del bajo consumo de oxígeno (de 08:00 a 12:00 y de 04:00 a 08:00 horas) es el error que ocasiona en la estimación de la OUR. El bajo consumo provoca que el tiempo establecido para realizar la estimación no sea suficiente para detectar un cambio representativo en la concentración de oxígeno. Esto origina estimaciones erróneas de su velocidad de consumo durante los periodos comentados.

Analizadores

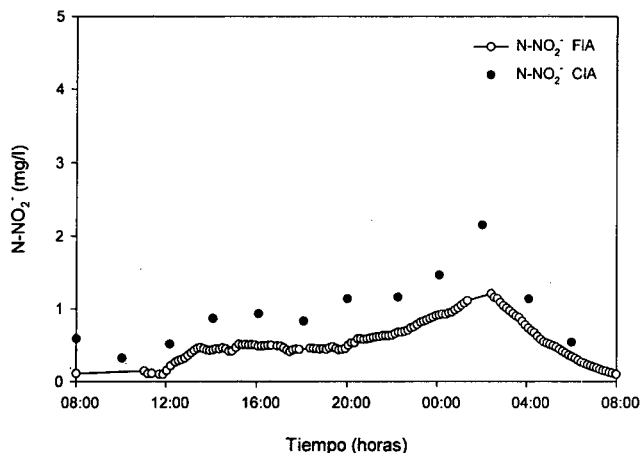
- Inicio de la monitorización "on-line" de los analizadores a las 11:00 horas por problemas con la calibración del equipo CFA. Se toma muestra de la salida a las 8 horas y se analiza posteriormente con los analizadores CFA y FIA.
- Sin datos de nitrato ni nitrito de 01:25 a 02:25 horas por recalibración del analizador FIA.
- Sin datos de amonio de 14:00 a 14:40 y de 01:25 a 02:25 horas por recalibración del analizador CFA.



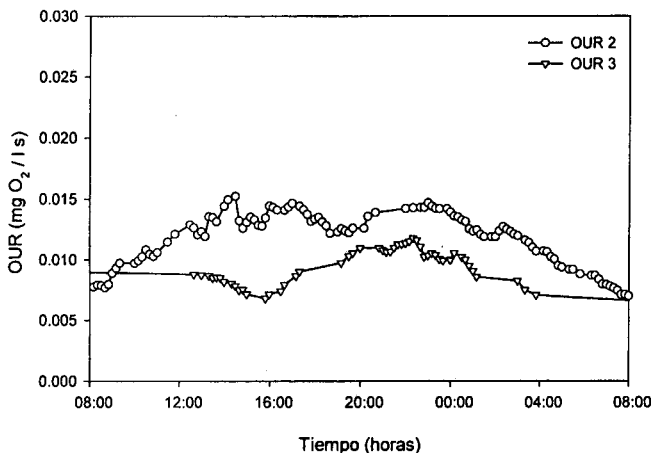
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



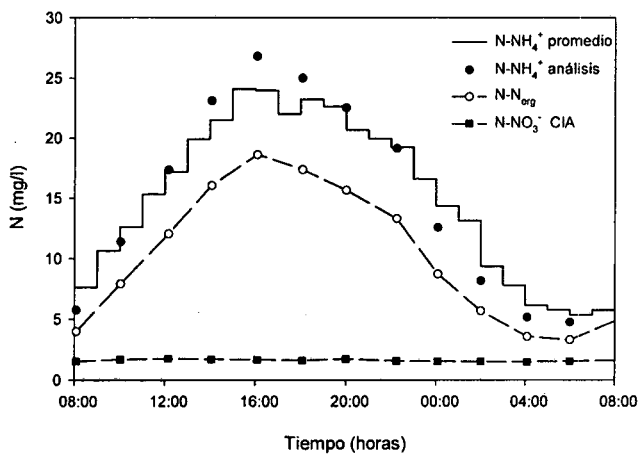
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



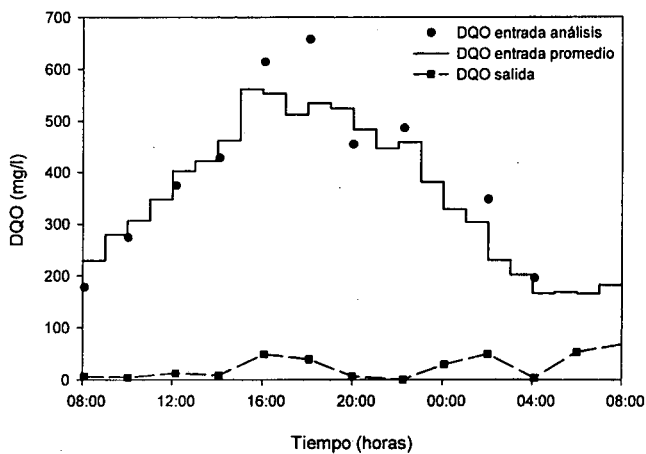
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

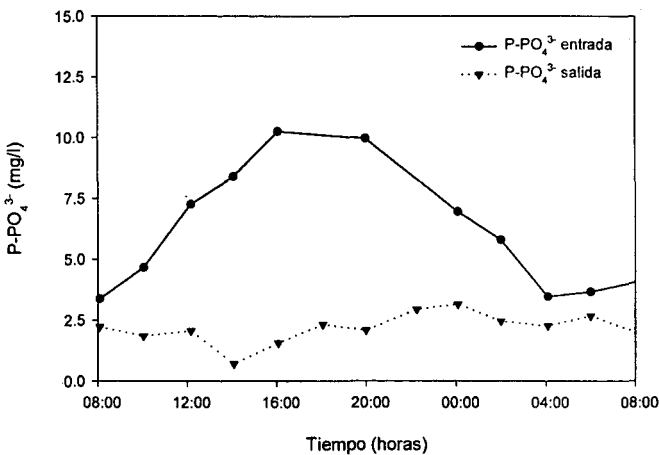


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.21. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 1



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.21. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 1

Resultados

En la tabla 5.10 se muestran los resultados del experimento 1: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	2.186
N-NO ₃ ⁻	0.503
N-NO ₂ ⁻	0.204
N total	2.893

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.129
% eliminación de N	77.8
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	75.6
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	17.4
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	7.0
mg N eliminado / g SSV d	22.75
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	4.91
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.13
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.46

Tabla 5.10. Resultados experimento 1

Comentarios

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene en un rango de 20 a 23 °C, aunque a partir de las 12:00 horas es bastante estable alrededor de 22 °C.

pH. En el tercer reactor se mantiene estable alrededor del punto de consigna, 7.5. En el primer reactor se mantiene en el rango 6.75 – 7.00, mientras en el segundo está alrededor de 7.25.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100 mV. En el reactor anóxico se mueve alrededor de -300 mV. Los picos que aparecen

se producen al devolver a ese reactor el caudal de entrada integrado durante 5 minutos para obtener una muestra representativa de la entrada al sistema.

Oxígeno. Se mantiene correctamente en los valores consignados, excepto en el periodo comentado en el apartado incidencias.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos mayores a 12 mg/l sobre las 20:00 horas. Este es el experimento con mayores concentraciones a la salida del sistema.

NO₃⁻ salida. Se presenta un máximo de concentración de 2.5 mg/l sobre las 02:00 horas. El análisis "off-line" con el equipo CIA presenta cierto offset desde las 08:00 a las 20:00 horas.

NO₂⁻ salida. El máximo (1.2 mg/l) también se presenta sobre las 02:00 horas. En este caso, la diferencia entre los dos sistemas de análisis se presenta durante todo el periodo de monitorización. El offset en estas medidas puede ser debido a problemas con la solución de electrolito del sistema CIA.

OUR. En el reactor 2 el consumo es siempre superior al del reactor 3. Se observa una evolución con similar tendencia a la composición de entrada a la planta.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan adecuadamente a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. El contenido en nitrato de la entrada se mantiene constante, ya que la única contribución es la del agua de red, que se suele mantener constante.

Entrada DQO. Los análisis de DQO se aproximan a los de entrada previstos, excepto dos muestras a las 16:00 y a las 18:00 horas.

Salida DQO. Se mantiene en valores muy bajos, prácticamente toda la DQO es eliminada en el proceso.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 3 y 10 mg/l, valores máximos ligeramente elevados respecto a los esperados.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene estable alrededor de 2.5 mg/l.

Valoración global

A pesar de ser las condiciones con menor control, la eliminación de nitrógeno es cercana al 78 %. Si la entrada fuera constante, la eliminación hubiera sido superior, pero el aumento de caudal y concentración del perfil de entrada, provoca que el sistema no sea capaz de transformar todo el nitrógeno de entrada. Vista en porcentaje, la eliminación es satisfactoria, pero como concentración de nitrógeno a la salida, la eliminación no es adecuada, ya que no cumple los límites legislados.

EXPERIMENTO 2

Objetivos

En este experimento se estudia la respuesta de la planta piloto a una entrada variable en composición y caudal, utilizando una recirculación externa variable. La variación de este caudal permite la recirculación de lodos adecuada para tratar el caudal de entrada de la planta. Este control permite mantener una relación alimento/microorganismos favorable.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.11 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación, entrada total de nitrógeno y sólidos en suspensión volátiles en la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4250
1	4840
2	4990
3	5030
Total sistema	454.3 gramos
DSVI	180 ml

Tabla 5.11. Condiciones experimento 2

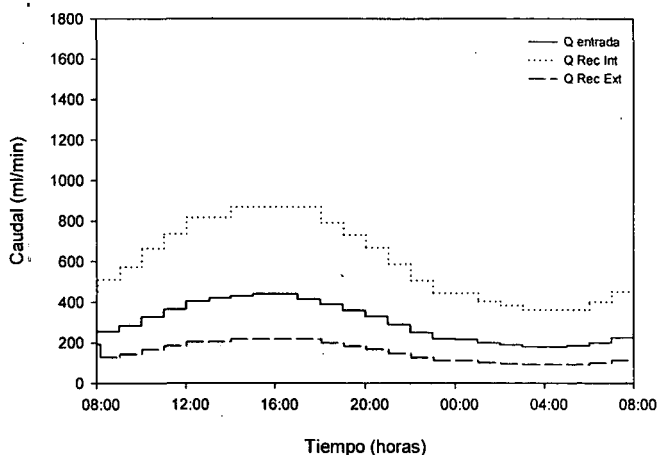
Incidencias de operación

Planta piloto

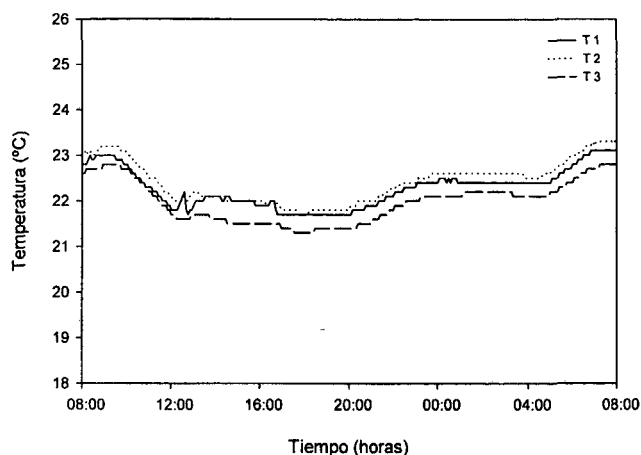
- Parada por alarma de nivel alto reactor 1 de 12:42 a 13:03. Esta pequeña parada provoca una ligera perturbación en el pH, temperatura y potencial redox de los reactores.
- Se repiten los problemas con el comportamiento del control de oxígeno en el reactor 3 en los periodos de muy bajo consumo de oxígeno.
- La estimación de consumo de oxígeno OUR en el reactor 3 durante esos periodos de bajo consumo (de 8:00 a 11:00 y de 02:00 a 08:00 horas) no aparece en los gráficos porque presenta un elevado error.

Analizadores

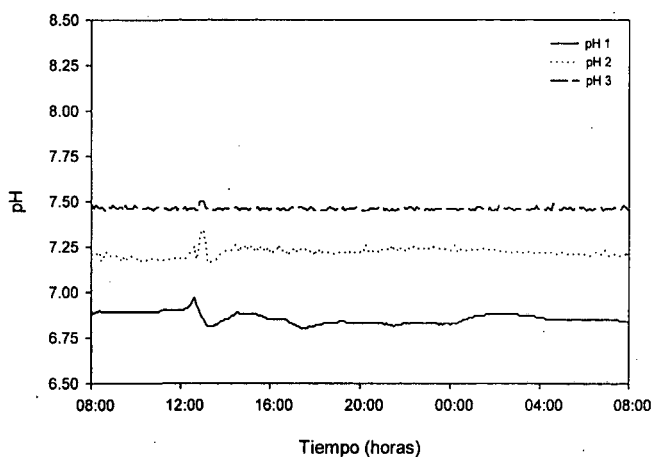
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 14:15 a 15:20 horas por recalibración de los analizadores FIA y CFA.



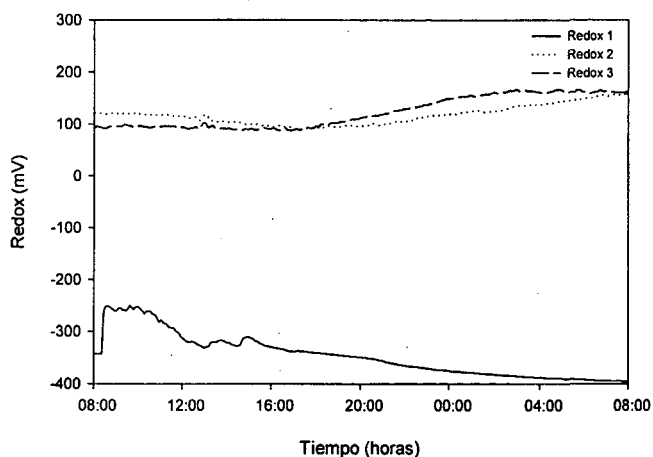
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



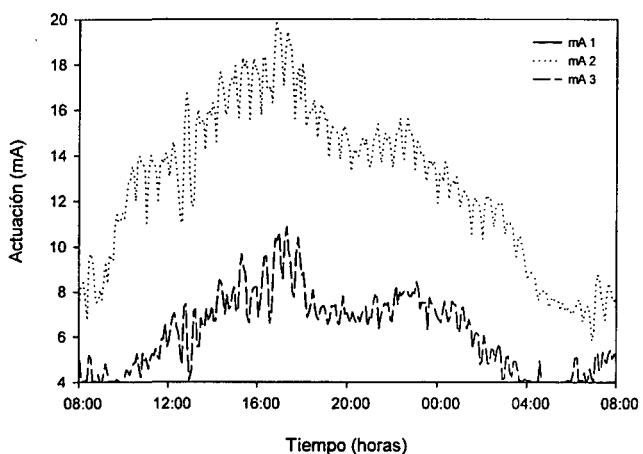
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



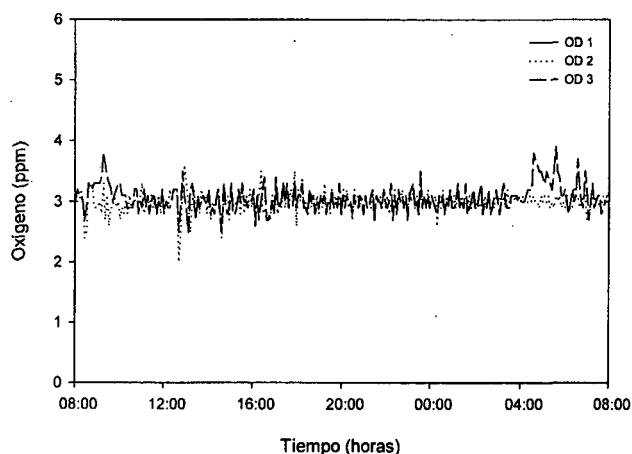
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

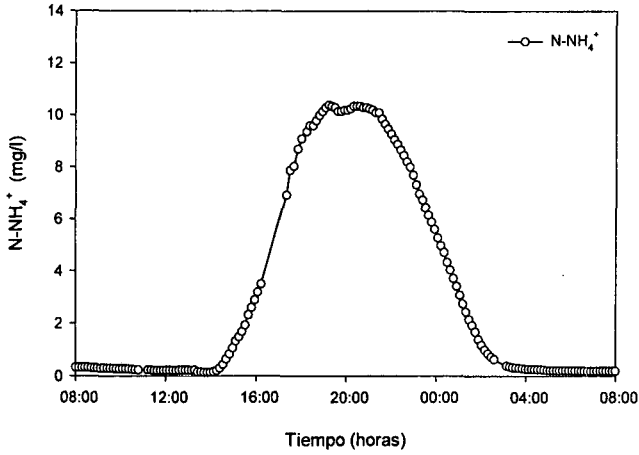


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

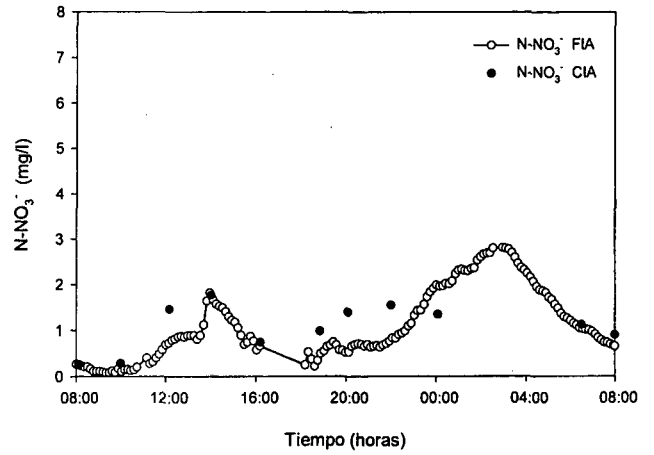


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

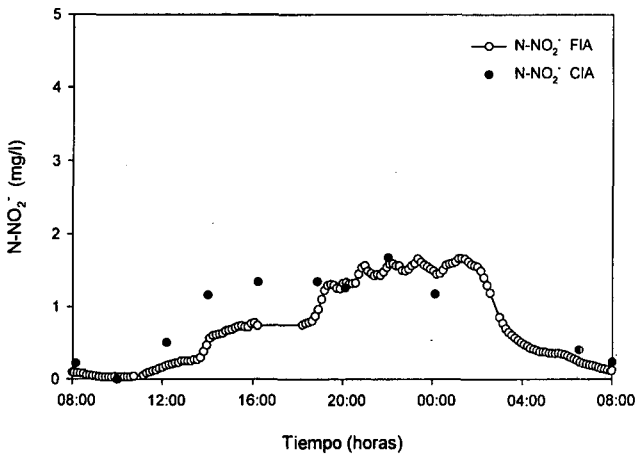
Fig. 5.22. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 2



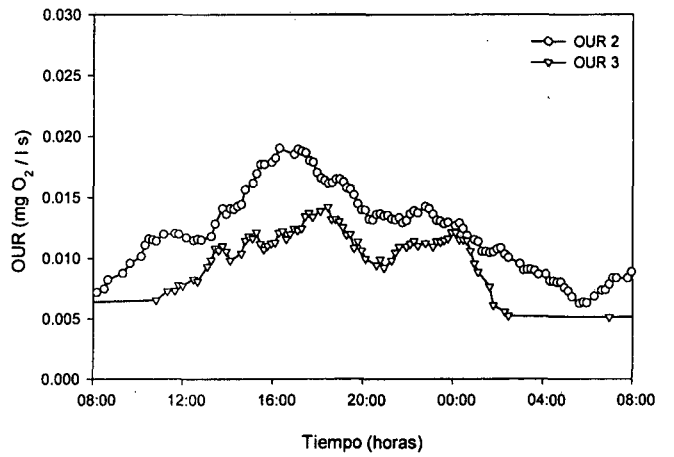
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



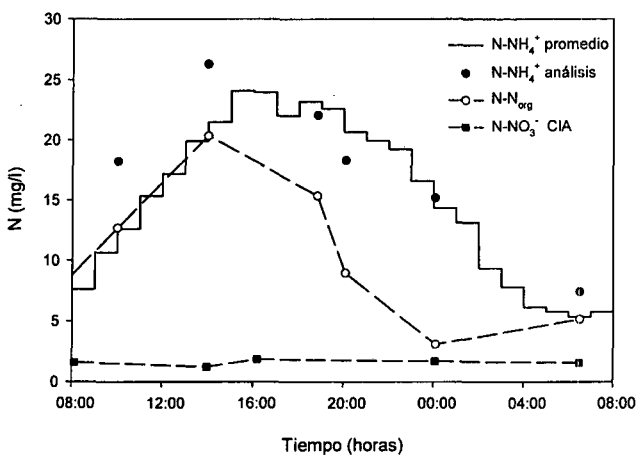
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



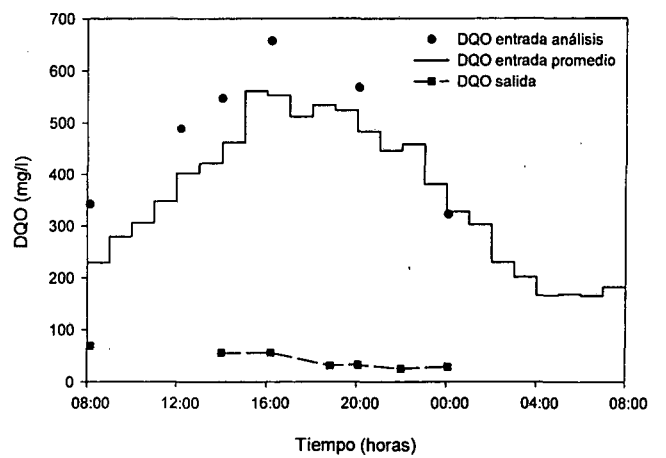
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

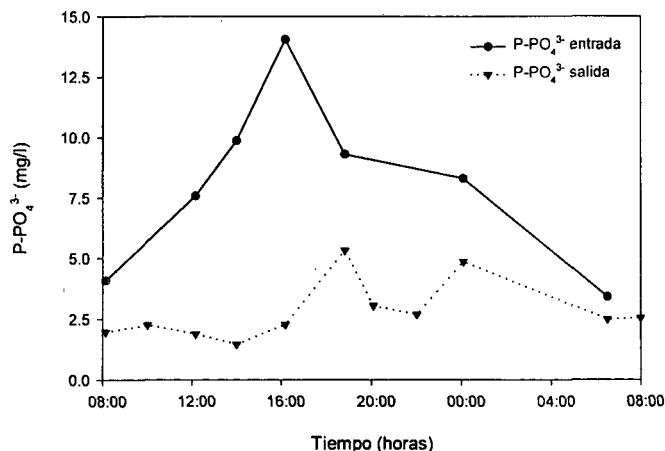


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.22. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 2



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.22. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 2

Resultados

En la tabla 5.12 se muestran los resultados del experimento 2: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.532
N-NO ₃ ⁻	0.410
N-NO ₂ ⁻	0.307
N total	2.249

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.773
% eliminación de N	82.7
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	68.1
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	18.2
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	13.7
mg N eliminado / g SSV d	23.71
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	3.37
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.90
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.68

Tabla 5.12. Resultados experimento 2

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. Las recirculaciones interna y externa se mantienen correctamente en las relaciones consignadas en el sistema experto.

Temperatura. Se mantiene en un rango aproximado de 22 a 23 °C.

pH. En el tercer reactor se mantiene estable alrededor del punto de consigna, 7.5. En el primer reactor se mantiene en el rango 6.75 – 7.00, mientras en el segundo está alrededor de

7.25. Las únicas perturbaciones que aparecen son debidas a la parada comentada en Incidencias.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100 – 150 mV. En el reactor anóxico se mueve de –300 mV a –400 mV.

Oxígeno. Se mantiene correctamente en los valores consignados, excepto en el periodo comentado en Incidencias.

Aireación. Se puede observar un incremento de consumo de aire respecto al experimento anterior de 14:00 a 18:00 horas. Este incremento coincide con el periodo de máxima recirculación externa. Este aumento de caudal supone un mayor aporte de microorganismos para hacer frente al incremento de carga. La mayor concentración de microorganismos supone una actividad de degradación mayor y, por tanto, un incremento de las necesidades de oxígeno.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 10.3 mg/l sobre las 20:00 horas.

NO₃⁻ salida. Se presenta un máximo de concentración de 2.8 mg/l sobre las 03:00 horas. El análisis "off-line" con el equipo CIA presenta una ligera desviación respecto al FIA en algunos puntos.

NO₂⁻ salida. El máximo (1.7 mg/l) se presenta sobre las 01:15 horas. Sólo se presenta una ligera desviación de los dos análisis en algunos puntos.

OUR. Se observa un aumento de consumo en los dos reactores respecto al experimento 1 de referencia. En este caso, el consumo en el segundo reactor se aproxima a 0.020 mg O₂ / l s a la hora de máximo consumo, sobre las 16:00. Este aumento de consumo coincide con la tendencia observada en el sistema de aireación.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan aproximadamente a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La contribución de nitrato del agua de red se mantiene constante.

Entrada DQO. Los análisis de DQO se aproximan a los previstos, aunque ligeramente elevados.

Salida DQO. La eliminación se mantiene casi total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 4 y 14 mg/l. El valor máximo de las 16:00 horas es posiblemente erróneo.

Salida PO₄³⁻. Se observan valores entre 2 y 5 mg/l, aunque mayoritariamente están sobre 2.5 mg/l.

Valoración global

La introducción de la estrategia de control de relación de recirculación externa constante supone una ligera mejora en la eliminación de nitrógeno, que se acerca en este caso al 83 %. También se presenta una mejora en los niveles de vertido, que disminuyen a 10 mg/l de nitrógeno amoniacal.

EXPERIMENTO 3

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones del experimento 2 una semana más tarde, para comprobar la reproducibilidad de la respuesta de la planta ante una misma perturbación en la entrada

Condiciones experimentales

En la tabla 5.13 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto. Las condiciones son iguales que en el experimento 2, excepto una ligera disminución de un 10 % en los sólidos volátiles totales.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (09:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4690
1	4520
2	4290
3	4170
Total sistema	405.7 gramos
DSVI	190 ml

Tabla 5.13. Condiciones experimento 3

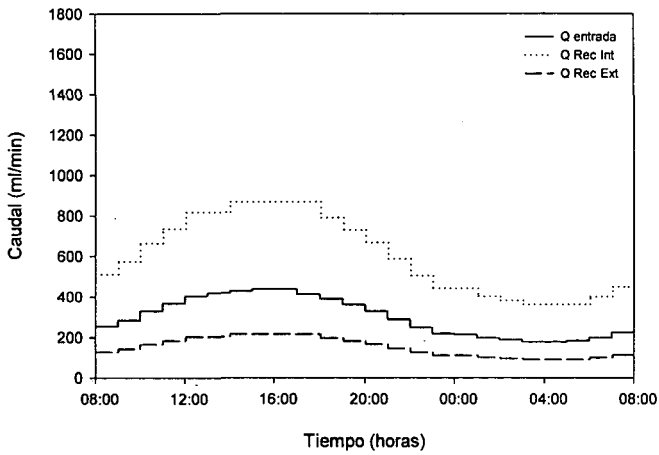
Incidencias de operación

Planta piloto

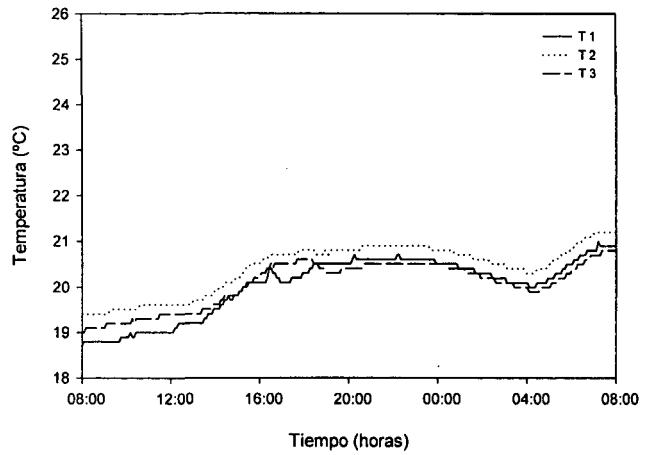
- Sobre las 9:00 horas, aparece un mal funcionamiento de la sonda de oxígeno disuelto del reactor 3, lo que provoca un exceso de aireación en el sistema.
- De 8:00 a 13:00 horas aparecen nuevamente los problemas con el control de oxígeno en el reactor 3, ya que el bajo consumo provoca su comportamiento inestable.
- De 3:00 a 8:00 horas se produce otro problema con el control de oxígeno. La válvula de aireación es incapaz de cerrar totalmente, lo que produce entrada de aire en el reactor, a pesar de que la señal de control es para mantenerla cerrada. Esto provoca que la concentración de oxígeno suba por encima del punto de consigna, a pesar de que la actuación indicada por el controlador es la correcta.
- La estimación de consumo de oxígeno OUR en el reactor 3 de 8:00 a 13:00 horas no es calculada correctamente por el bajo consumo de oxígeno. Los datos de 3:00 a 8:00 superan el filtro de error, aunque es probable que no sean muy precisos debido a lo comentado en la incidencia anterior.

Analizadores

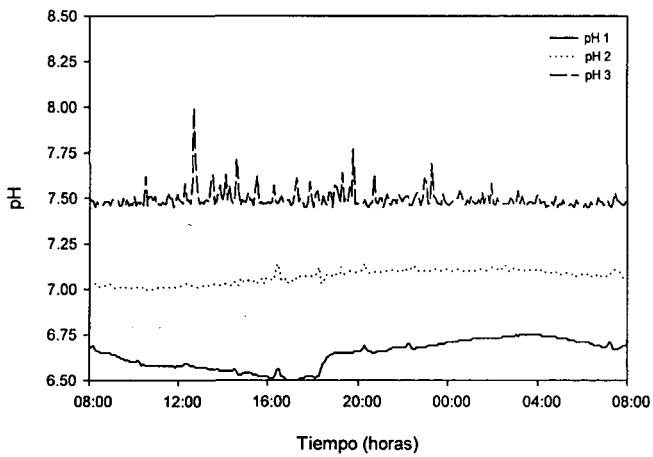
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores FIA y CFA.



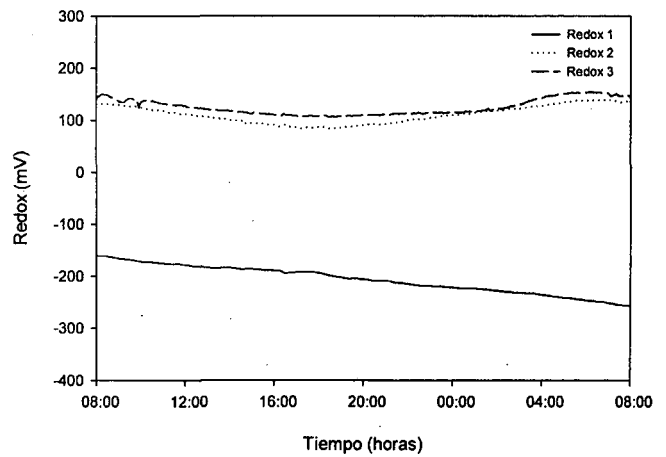
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



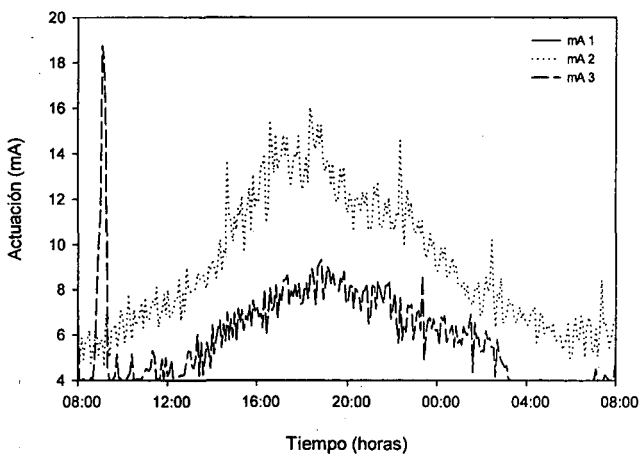
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



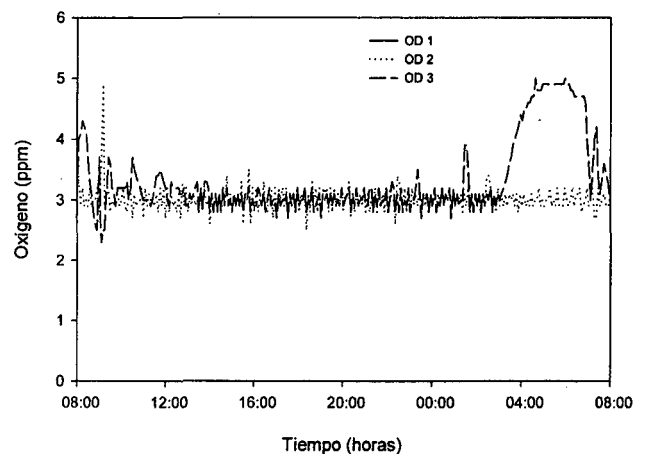
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

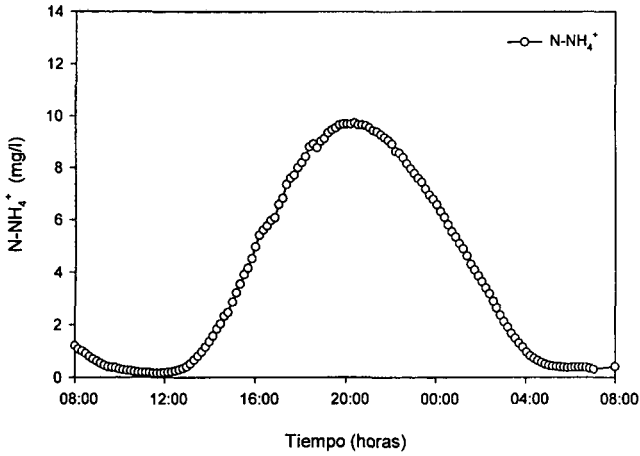


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

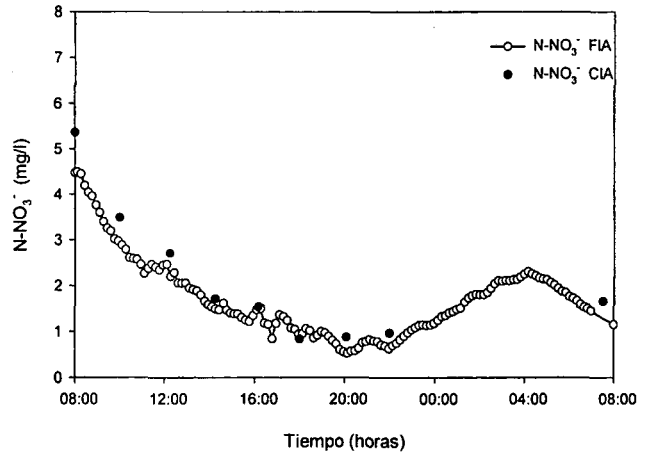


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

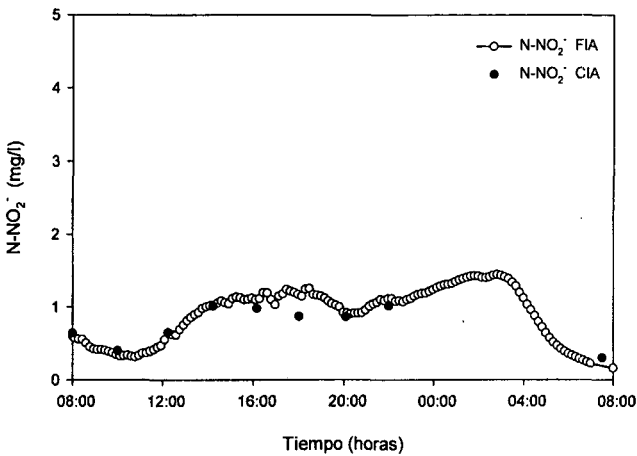
Fig. 5.23. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 3



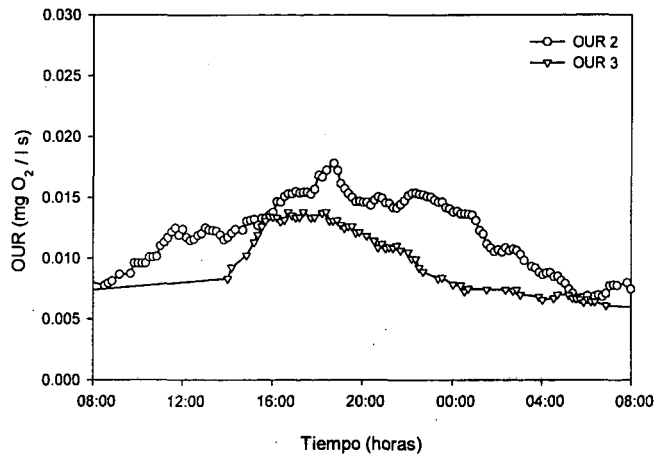
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



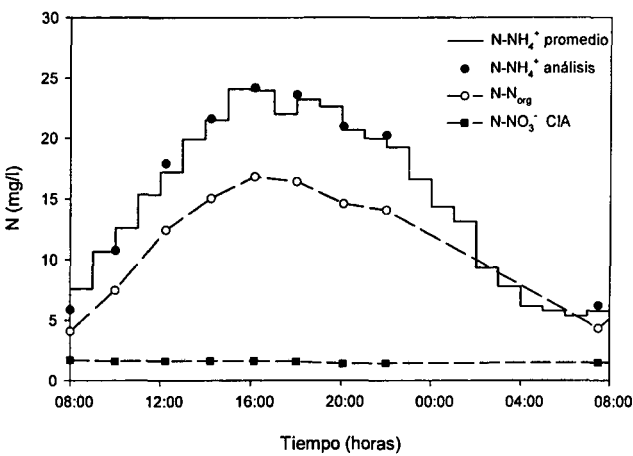
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



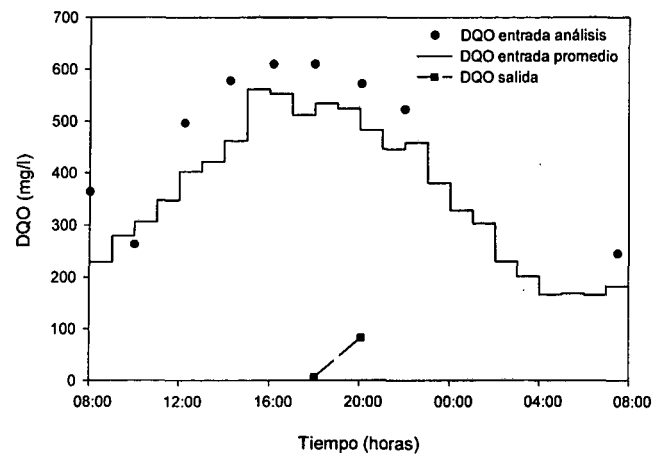
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

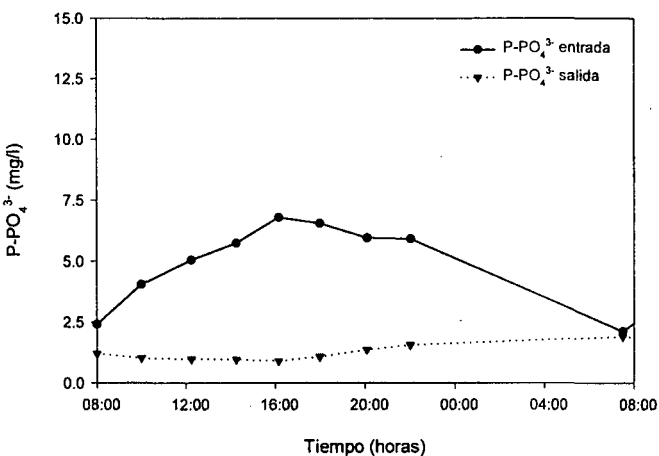


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.23. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 3



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.23. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 3

Resultados

En la tabla 5.14 se muestran los resultados del experimento 3: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.727
N-NO ₃ ⁻	0.711
N-NO ₂ ⁻	0.386
N total	2.824

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.199
% eliminación de N	78.3
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	61.2
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	25.2
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	13.7
mg N eliminado / g SSV d	25.14
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	4.26
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.75
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.95

Tabla 5.14. Resultados experimento 3

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. Recirculaciones interna y externa correctas.

Temperatura. Se mantiene en un rango aproximado de 19 a 21 °C, ligeramente menor que el de otros experimentos.

pH. En el tercer reactor se mantiene alrededor del punto de consigna, aunque se observa un comportamiento más ruidoso, provocado por la incorrecta disolución de bicarbonato en el depósito utilizado para el control. En el segundo reactor se mantiene estable alrededor de 7.0, mientras en el primero se sitúa entre 6.50 y 6.75.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100 – 150 mV. En el reactor anóxico se mueve de –150 mV a –250 mV.

Oxígeno. Se mantiene en las consignas, excepto en los periodos comentados en incidencias.

Aireación. Se puede observar un consumo de aire no muy elevado, provocado posiblemente por la menor temperatura que experimentos anteriores, así como una menor concentración de sólidos en los reactores.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 9.7 mg/l sobre las 20:00 horas.

NO₃⁻ salida. El perfil de nitrato es diferente al de los experimentos 1 y 2. Aparecen valores muy elevados al inicio, que van desapareciendo a lo largo del día. Estos valores están producidos por la agitación del sedimentador el día anterior. Los microorganismos muertos adheridos a los flóculos son desprendidos, lo que provoca un aumento de amonio en el sedimentador. Este exceso es recirculado y nitrificado en los reactores aeróbicos, lo que produce un exceso de nitrato. Este nitrato encuentra problemas para desnitrificarse en el reactor anóxico, por no existir suficiente fuente de carbono durante el horario nocturno. A medida que aumenta la carga de DQO por la mañana, este exceso de nitratos va desapareciendo. El análisis "off-line" CIA demuestra la validez de las concentraciones obtenidas con el equipo FIA, casi idénticas.

NO₂⁻ salida. El máximo (1.4 mg/l) se presenta sobre las 03:00 horas. Pueden observarse unos resultados muy similares de los equipos CIA y FIA.

OUR. El consumo máximo aparece sobre las 18:00 horas en el reactor 2, y presenta un valor sobre 0.018 mg O₂ / l s.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan muy bien a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La contribución de nitrato del agua de red se mantiene constante.

Entrada DQO. Los análisis de DQO se aproximan a los previstos, aunque ligeramente elevados.

Salida DQO. La eliminación se mantiene casi total, aunque el valor de las 20:00 horas es más elevado de lo normal.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7 mg/l.

Salida PO₄³⁻. Se observan valores entre 1 y 2 mg/l.

Valoración global

Se observa una eliminación de nitrógeno del 78.3 %. La eliminación es menor al anterior experimento, pero teniendo en cuenta la biomasa del sistema, la eliminación sube a 25.1 mg N/ g SSV d, valor superior al anterior. Los niveles de vertido de amonio se mantienen similares, 10 mg/l.

EXPERIMENTO 4

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del experimento 3, pero además se establece una secuencia aeróbica / anóxica para el reactor 1. De este modo, se quiere aprovechar el exceso de capacidad desnitrificadora del reactor 1 utilizando ciclos de condiciones aeróbicas durante 20 minutos y anóxicas durante 40 minutos.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.15 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	3 mg/l / 0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5050
1	4920
2	4790
3	4770
Total sistema	450.9 gramos
DSVI	190 ml

Tabla 5.15. Condiciones experimento 4

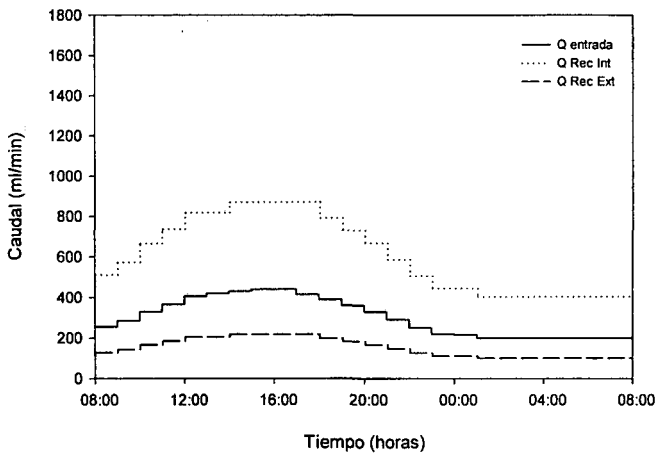
Incidencias de operación

Planta piloto

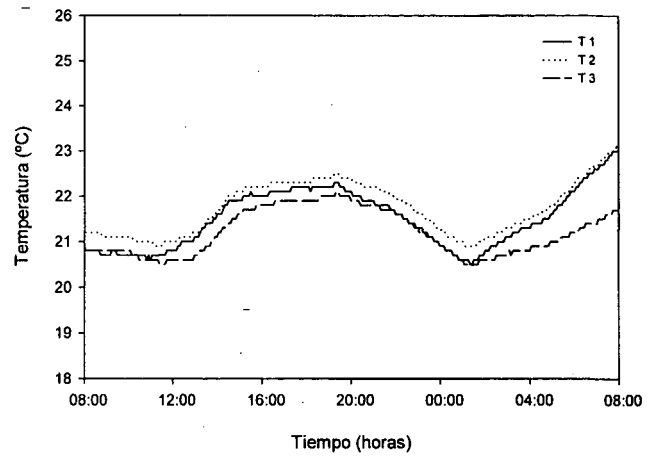
- Sobre las 1:15 horas, se detecta una alarma de funcionamiento de las bombas. Esta alarma provoca la parada de la planta, estado en el que se mantiene hasta el fin del experimento.
- A las dos horas de la parada, el sistema experto cambia la consigna de oxígeno disuelto del reactor 1 a 1 mg/l de oxígeno. De este modo, los microorganismos no sufren condiciones de falta de oxígeno durante demasiado tiempo, lo que tendría en ellos una influencia negativa.
- Se han utilizado los datos obtenidos, teniendo en cuenta que los perfiles de salida de amonio, nitrito y nitrato pueden ser reconstruidos aproximadamente. Respecto al amonio, que supone la mayor contribución al nitrógeno en la salida, puede observarse que prácticamente la totalidad del pico había salido del sistema antes de la parada.
- De 4:00 a 8:00 horas se produce de nuevo un problema con el control de oxígeno, pero esta vez en el reactor 2. La válvula de aireación es incapaz de cerrar totalmente, lo que produce entrada de aire en el reactor, a pesar de que la señal de control es para mantenerla cerrada. Esto provoca que la concentración de oxígeno suba por encima del punto de consigna, a pesar de que la actuación indicada por el controlador es la correcta.
- La estimación de consumo de oxígeno OUR en los reactores 2 y 3 de 2:00 a 8:00 horas no se calcula correctamente por el bajo consumo de oxígeno.

Analizadores

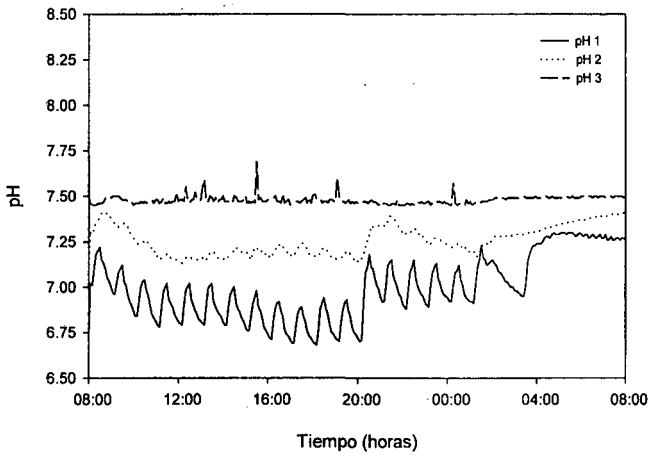
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio a partir de las 2:00 horas, por la parada de la planta piloto, aunque han sido estimados los valores previstos para realizar los cálculos de rendimiento de eliminación.



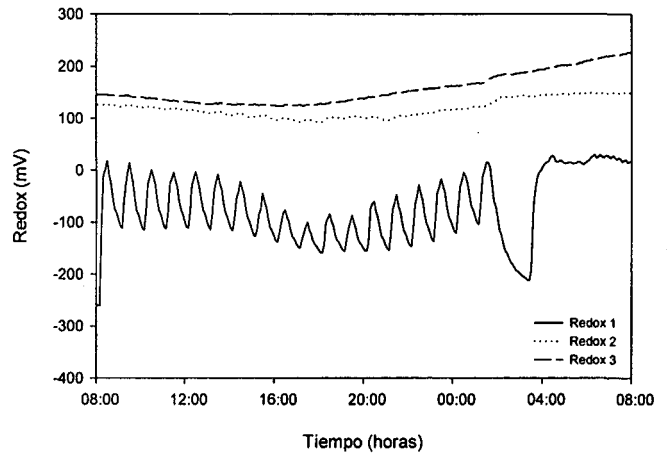
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



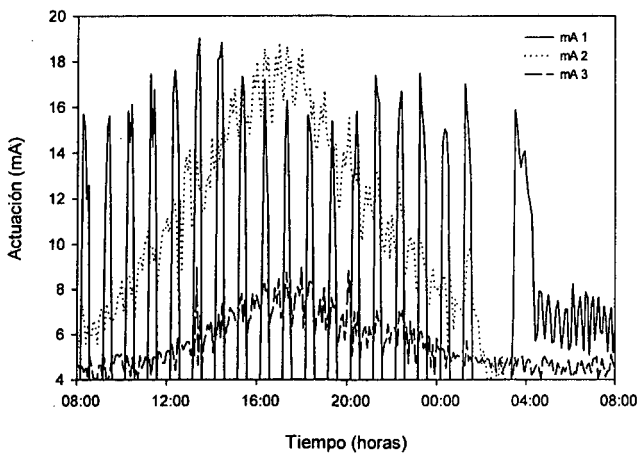
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



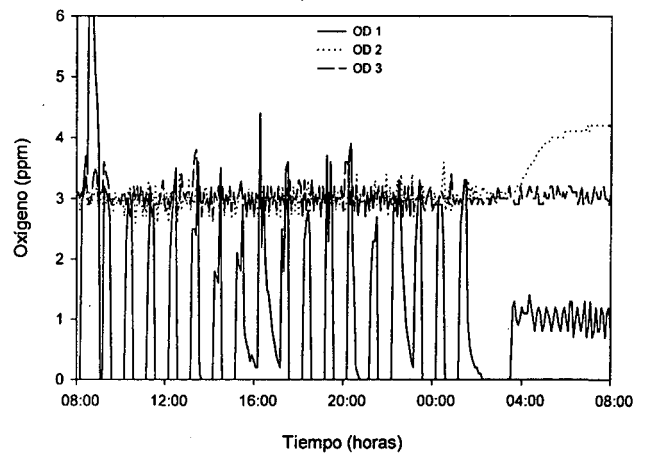
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

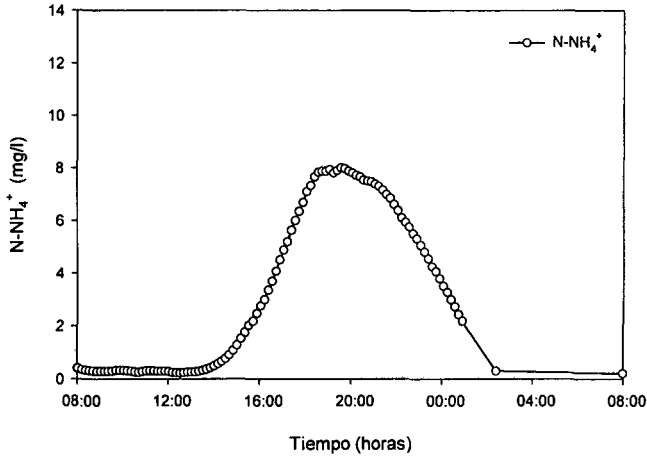


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

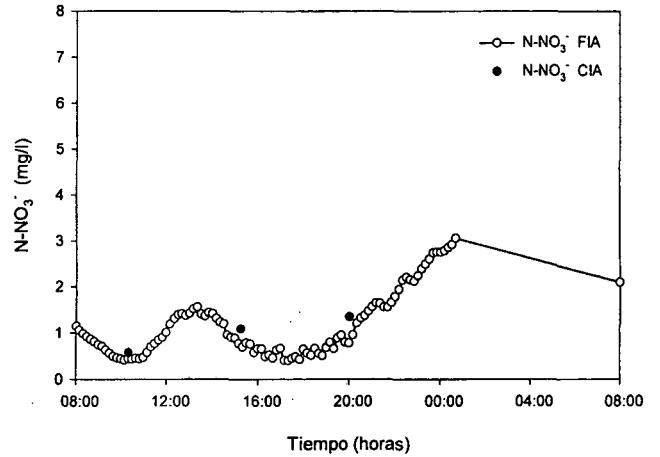


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

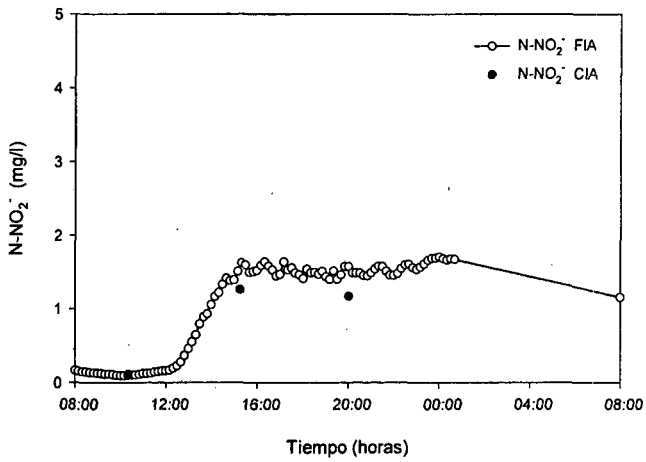
Fig. 5.24. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 4



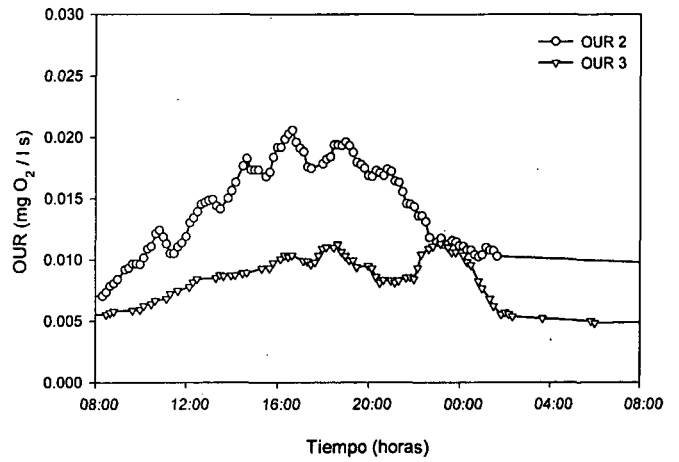
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



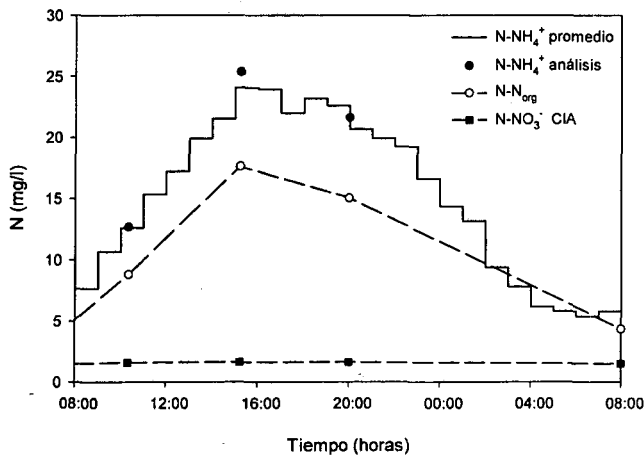
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



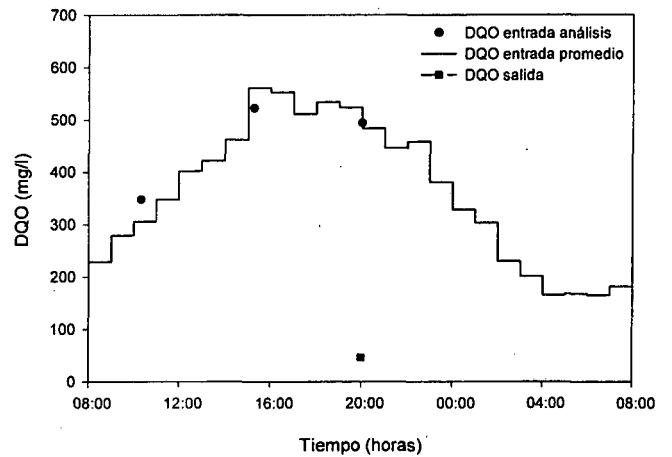
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

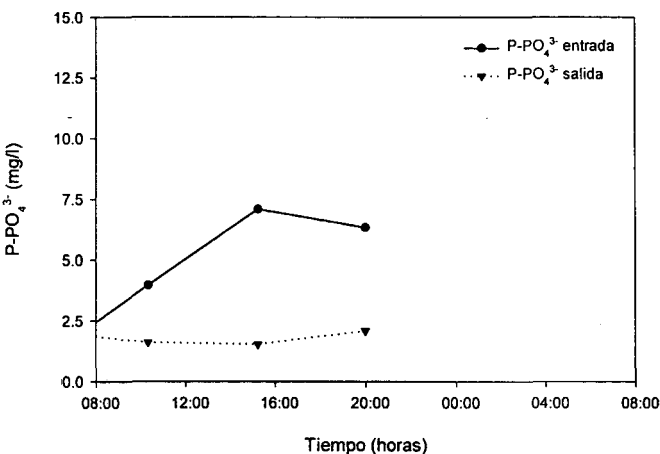


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.24. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 4



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.24. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 4

Resultados

En la tabla 5.16 se muestran los resultados del experimento 4: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.187
N-NO ₃ ⁻	0.599
N-NO ₂ ⁻	0.496
N total	2.282

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.741
% eliminación de N	82.5
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	52.0
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	26.3
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	21.7
mg N eliminado / g SSV d	23.82
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.63
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.33
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	1.10

Tabla 5.16. Resultados experimento 4

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene en un rango aproximado de 21 a 23 °C. Puede observarse un aumento de temperatura inducido por la parada.

pH. En el tercer reactor se mantiene alrededor del punto de consigna, con ligeras variaciones provocadas por el control. En el segundo reactor se mantiene alrededor de 7.25, mientras en el primero se sitúa entre 6.75 y 7.25. Este amplio margen es producido por las diferentes condiciones a la que es sometido el reactor 1. El cambio de consigna de oxígeno en el reactor a 3 mg/l provoca un aumento de pH de aproximadamente 0.25 unidades. Cuando se cambia de nuevo el oxígeno a 0 mg/l, el pH

disminuye volviendo aproximadamente a los valores anteriores al primer cambio de oxígeno.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100–200 mV. En el reactor anóxico se produce una gran variabilidad, provocada por el cambio de consigna de oxígeno. Los ciclos de 20/40 minutos, provocan unos valores cercanos a 0 mV en condiciones óxicas y unos valores aproximados a -100 mV en condiciones anóxicas. También puede observarse que cuando se produce la parada, el redox baja a valores menores de -200 mV, ya que se anula la secuencia de aireación en el reactor anóxico. El cambio de oxígeno a 1 mg/l dos horas después de la alarma provoca un nuevo cambio a valores cercanos a 0 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3, excepto en los periodos comentados en incidencias. En el reactor 1 se consigue mantener aproximadamente los valores prefijados. Aparecen pequeñas variaciones, provocadas generalmente por pequeñas burbujas de aire que inducen errores en la medida de la sonda de oxígeno.

Aireación. Se puede observar un consumo de aire reducido en el reactor 3, provocado por el consumo anterior en el reactor 1.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 8.0 mg/l sobre las 19:30 horas.

NO₃⁻ salida. En el perfil de nitrato se aprecian dos picos diferentes, provocados por la mayor nitrificación del sistema, unido a una menor desnitrificación. Los análisis CIA son similares a los FIA.

NO₂⁻ salida. El máximo (1.7 mg/l) se presenta sobre las 24:00 horas, aunque el perfil es prácticamente constante desde las 15:00 horas. Pueden observarse unos resultados muy similares de los equipos CIA y FIA.

OUR. El consumo máximo aparece sobre las 16:00 horas en el reactor 2, con 0.021 mg O₂ / l s.

Entrada NH₄⁺ y DQO. Los análisis "off-line" se ajustan a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La contribución de nitrato del agua de red se mantiene constante.

Salida DQO. La eliminación se mantiene casi total a la hora de máxima salida.

PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7 mg/l, y la de salida es cercana a 2 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es del 82.5 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa es de 23.8 mg N/ g SSV d. Los niveles de vertido de nitrógeno disminuyen, además de variar su composición, ya que la presencia de amonio en la salida es un 10% inferior.

EXPERIMENTO 5

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del experimento 4, pero se cambia la duración de los ciclos en el reactor 1. De este modo, se quiere aprovechar el exceso de capacidad desnitrificadora del reactor 1 utilizando ciclos con condiciones aeróbicas durante 30 minutos y anóxicas durante 30 minutos.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.17 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	3 mg/l / 0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (09:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5410
1	5370
2	5410
3	5430
Total sistema	502.6 gramos
DSVI	200 ml

Tabla 5.17. Condiciones experimento 5

Incidencias de operación

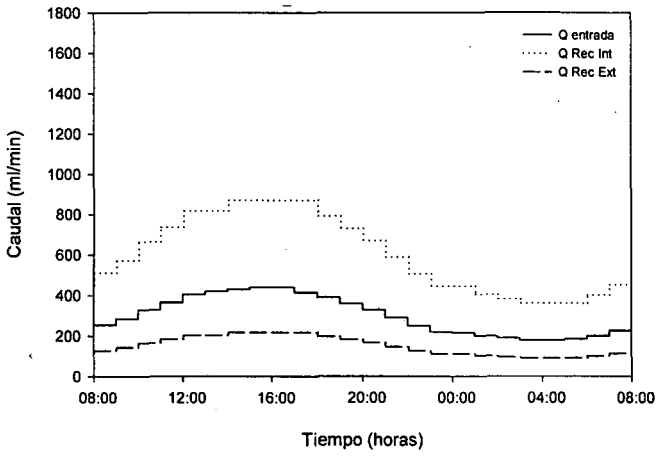
Planta piloto

- Parada por alarma de nivel en el reactor 2 de 10:17 a 10:20 horas.

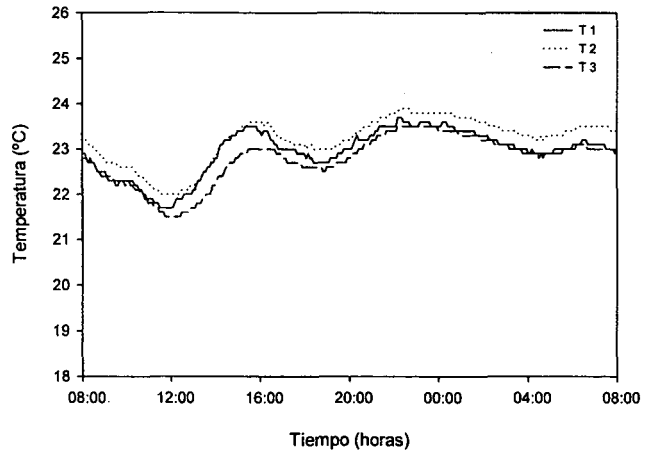
- Parada por alarma de nivel en el reactor 1 de 15:03 a 15:05 horas.
- El control de oxígeno en el reactor 3 tiene en general un comportamiento ruidoso durante todo el periodo experimental. Esto es debido al bajo consumo de oxígeno, provocado por su elevada utilización en el primer reactor.
- El comportamiento del control de oxígeno en el reactor 2 es más ruidoso de lo normal. Esto viene provocado por los cambios de consigna de oxígeno en el primer reactor. El control del reactor 2 ha de soportar una entrada variable en nivel de oxígeno. Cuando el reactor 1 pasa de anóxico a aeróbico, el reactor 2 pasa de tener una entrada sin oxígeno a una con 3 mg/l. Esto provoca que el aporte de aire al reactor 2 sea excesivo, así que el control actúa disminuyendo su aporte. Cuando las condiciones del reactor 1 se restablecen a anóxicas, el aporte resulta insuficiente en el reactor 2. Esto se traduce en una disminución del oxígeno por debajo de su punto de consigna. En conclusión, el sistema es capaz de mantener un nivel cercano al de consigna, aunque el comportamiento es más oscilante de lo normal.
- El control de oxígeno en el primer reactor presenta mayores oscilaciones. Los cambios de consigna de 0 mg/l a 3 mg/l vienen acompañados de un aumento de la agitación del 30% al 60%, para favorecer la transferencia de oxígeno. A pesar de ello, durante algunos periodos el control de oxígeno no es capaz de llegar a los valores de consigna, incluso con aireación máxima. También existe un problema provocado por pequeñas burbujas de aire que interfieren en las medidas de la sonda de oxígeno.
- En cuanto a la estimación de consumo de oxígeno, se han disminuido los errores de estimación incrementando el periodo de muestreo. También se ha introducido la medida de OUR del reactor 1 durante los periodos aeróbicos.

Analizadores

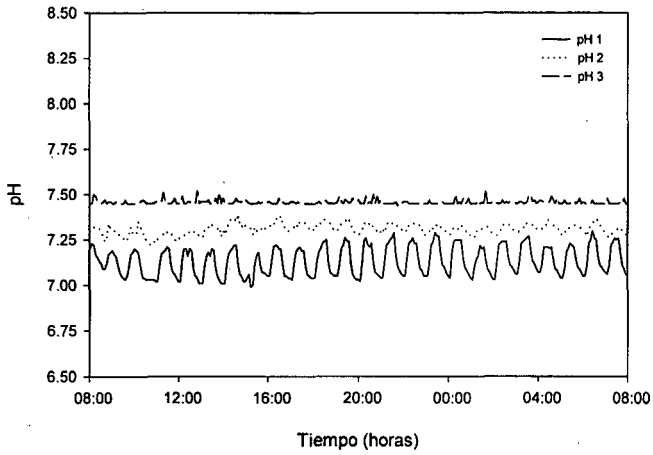
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:15 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.



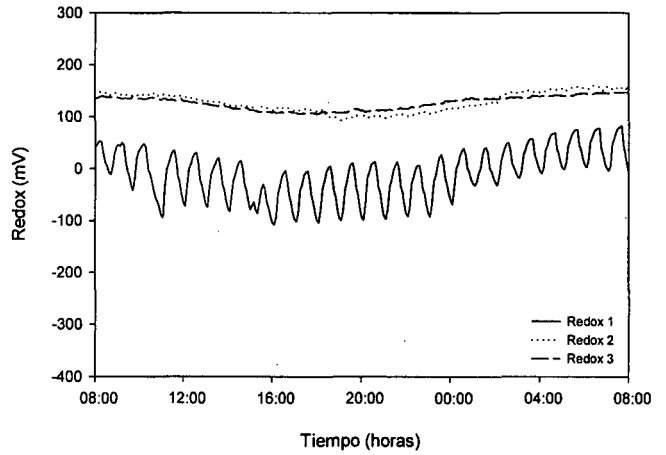
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



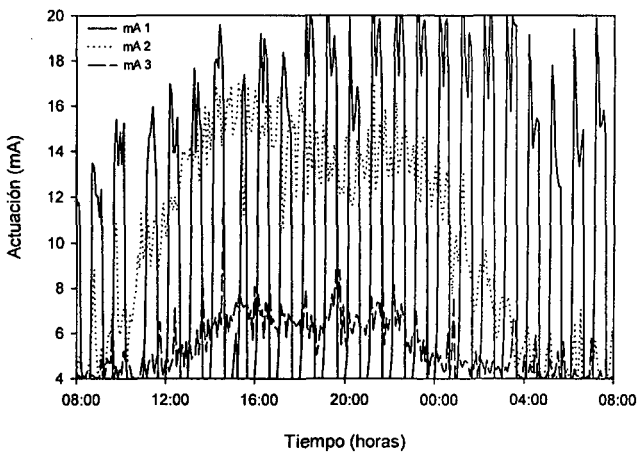
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



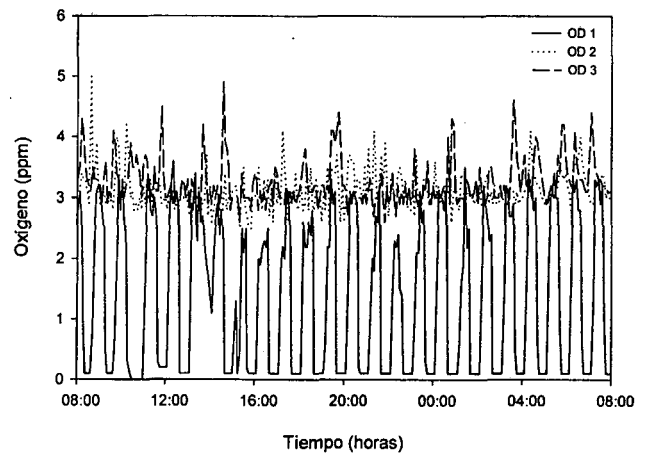
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

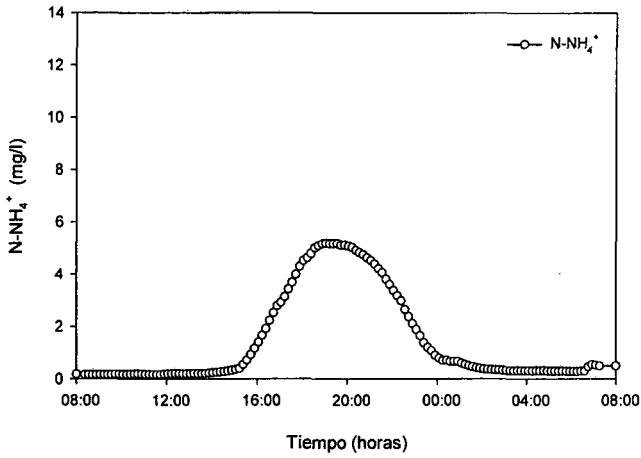


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

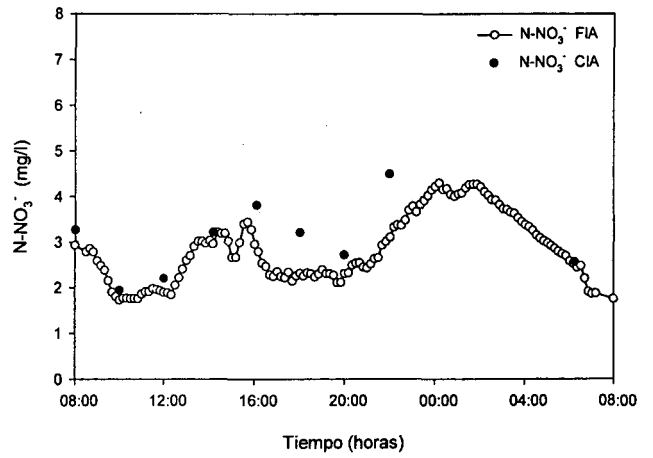


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

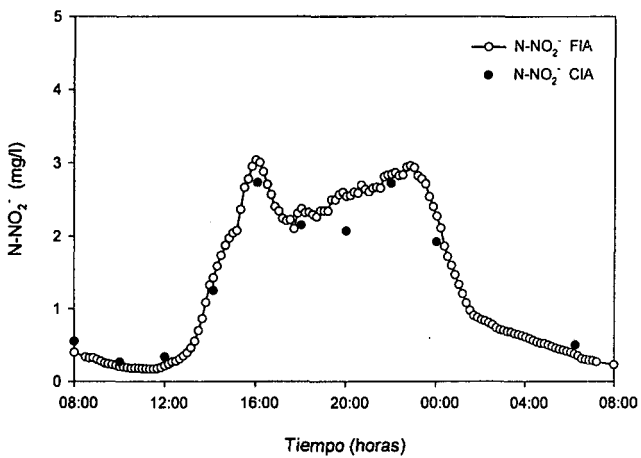
Fig. 5.25. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 5



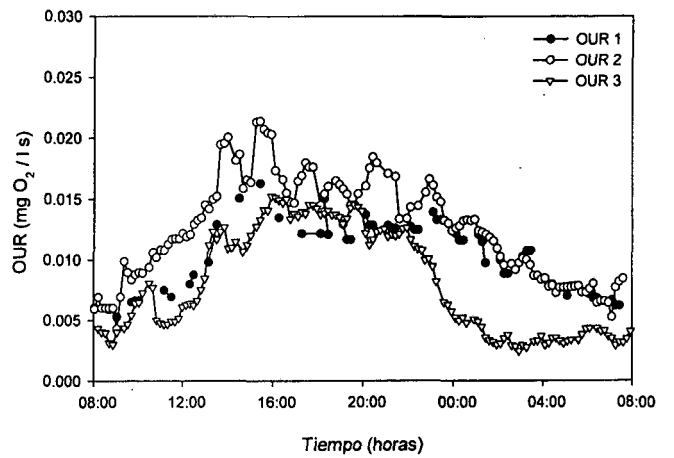
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



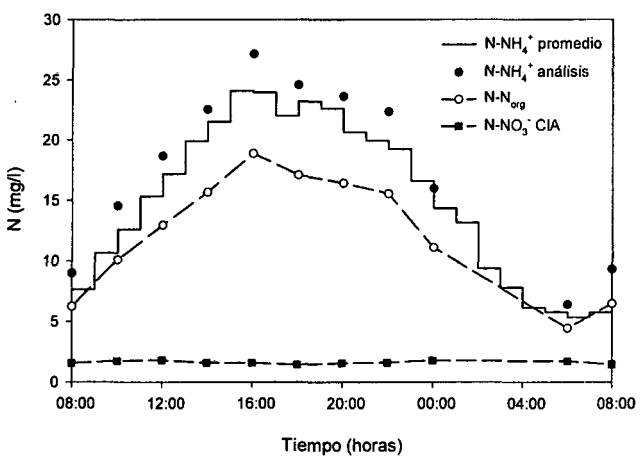
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



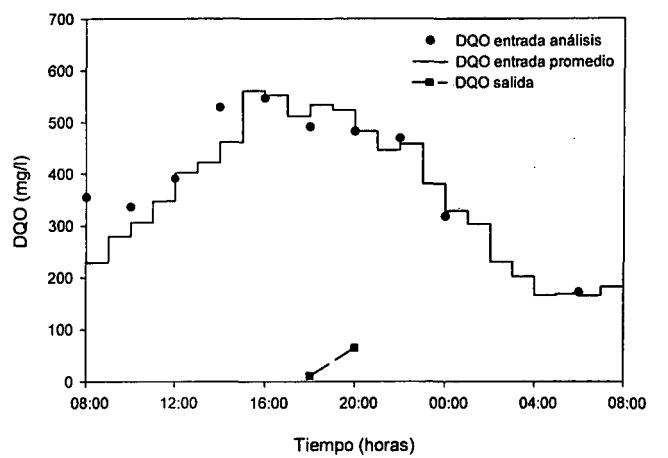
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

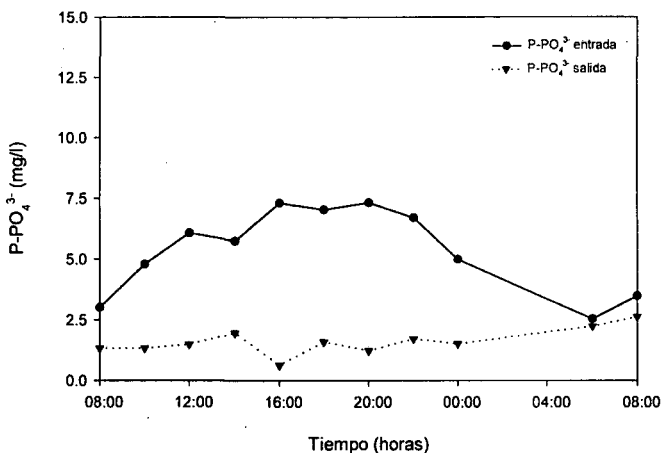


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.25. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 5



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.25. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 5

Resultados

En la tabla 5.18 se muestran los resultados del experimento 5: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.684
N-NO ₃ ⁻	1.172
N-NO ₂ ⁻	0.634
N total	2.490

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.532
% eliminación de N	80.9
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	27.4
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	47.1
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	25.5
mg N eliminado / g SSV d	20.96
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.36
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	2.33
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	1.26

Tabla 5.18. Resultados experimento 5

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene en un rango aproximado de 22 a 24 °C.

pH. En el tercer reactor se mantiene alrededor del punto de consigna. En el segundo reactor se mantiene alrededor de 7.25, con pequeñas oscilaciones provocadas por la entrada variable proveniente del primero. En éste se sitúa entre 7.00 y 7.25, margen producido por las diferentes condiciones a la que es sometido. El cambio de oxígeno a 3 mg/l provoca un aumento de pH de aproximadamente 0.2 unidades. Cuando se cambia de nuevo el oxígeno a 0 mg/l, el pH disminuye, volviendo aproximadamente a los valores anteriores al primer cambio de oxígeno.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100–200 mV. En el reactor anóxico se produce una gran variabilidad, provocada por el cambio de consigna de oxígeno. Los ciclos de 30/30 minutos, provocan variaciones entre 50 mV y -100 mV. El mayor porcentaje de condiciones aeróbicas respecto al anterior experimento, provoca valores superiores.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3 a pesar del ruido presente. En el reactor 1 se obtienen buenos resultados, excepto cuando aparecen los problemas comentados anteriormente en incidencias.

Aireación. Se puede observar un consumo de aire reducido en el reactor 3, provocado por el consumo previo en el reactor 1.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.2 mg/l sobre las 19:00 horas, los valores mínimos obtenidos hasta el momento.

NO₃⁻ salida. Aparecen valores muy elevados, muestra de que la nitrificación está muy favorecida pero también de que la desnitrificación no es óptima. El máximo es de 4.3 mg/l a las 24:00 horas. Los resultados de los analizadores son similares, aunque algún punto aparece un poco desviado.

NO₂⁻ salida. El máximo (3.0 mg/l) se presenta sobre las 16:00 horas. Pueden observarse unos resultados muy similares de los equipos CIA y FIA.

OUR. El consumo máximo aparece sobre las 15:30 horas en el reactor 2, con 0.021 mg O₂ / l s. Se ha mejorado el sistema de estimación, por lo que se obtienen valores de OUR en el reactor 3 en horarios en los que anteriormente no se disponía de datos. Así se muestran valores de consumo inferiores a 0.004 mg O₂ / l s en horario de baja carga. Por primera vez aparecen valores en el reactor 1 cuando éste se encuentra en condiciones aeróbicas. Estos valores son inferiores a los de segundo reactor, posiblemente porque la adaptación de los microorganismos de condiciones anóxicas a aeróbicas no es demasiado rápida.

Entrada NH₄⁺ y DQO. Los análisis "off-line" se ajustan a los valores de entrada previstos.

Salida DQO. Eliminación casi total.

PO₄³⁻. La entrada varía entre 2 y 7.5 mg/l, y la salida es alrededor de 2 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno baja al 80.9 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa es de 21 mg N/ g SSV d, valor inferior al anterior. La nitrificación mejora mucho, pero en detrimento de la desnitrificación, por lo que el balance global es más negativo que el anterior.

EXPERIMENTO 6

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del experimento 5, pero se cambia la duración de los ciclos en el reactor 1. De este modo, se quiere aprovechar el exceso de capacidad desnitrificadora del reactor 1 utilizando unas condiciones aeróbicas durante 30 minutos y unas anóxicas durante 60 minutos. Se alarga la duración de este periodo para evitar la acumulación de nitrato.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.19 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	3 mg/l / 0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4900
1	4965
2	4860
3	4920
Total sistema	457.0 gramos
DSVI	200 ml

Tabla 5.19. Condiciones experimento 6

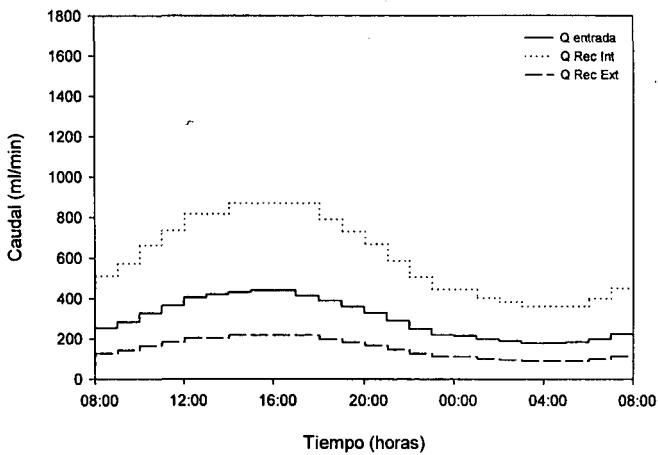
Incidencias de operación

Planta piloto

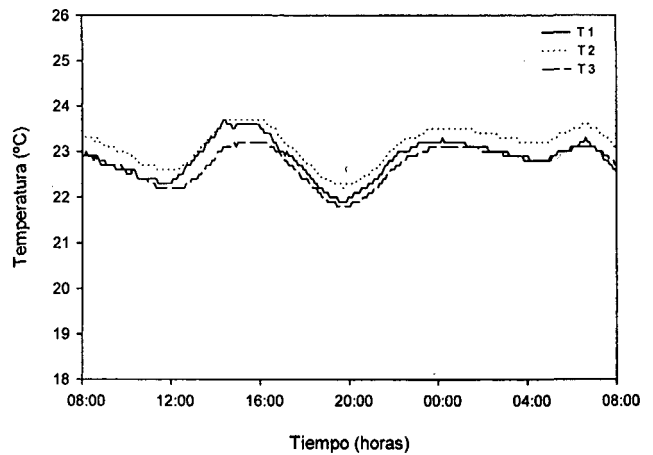
- Vuelven a aparecer los problemas con el control de oxígeno del reactor 2. El consumo es muy reducido y también se producen las perturbaciones inducidas por los cambios de consigna del reactor 1. También aparece de 8:00 a 12:00 horas el problema con la válvula de aireación. Al ser incapaz de cerrarse totalmente, se produce entrada de aire en el reactor, a pesar de que la señal de control es para mantenerla cerrada. Esto provoca que la concentración de oxígeno suba por encima del punto de consigna, a pesar de que la actuación indicada por el controlador es la correcta.
- El control de oxígeno en el primer reactor presenta también oscilaciones. El control de oxígeno no es capaz de llegar a los valores de consigna, incluso con aireación máxima, durante algunos periodos de consumo elevado. También se repiten las interferencias en la medida de oxígeno provocadas por pequeñas burbujas de aire.

Analizadores

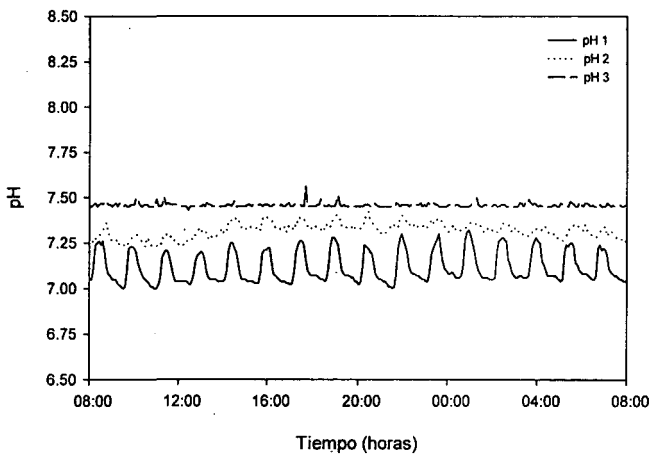
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.



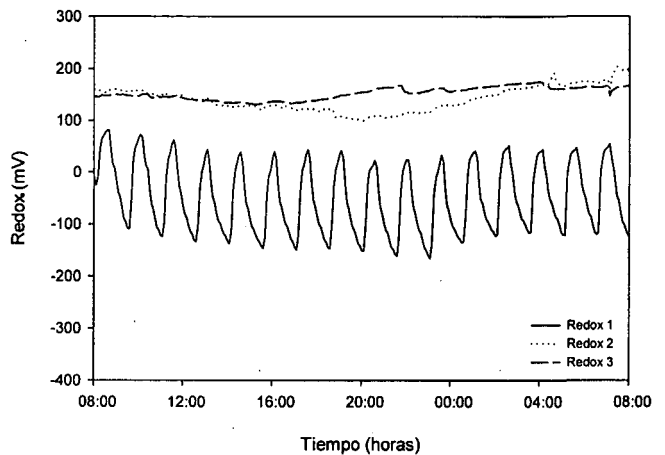
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



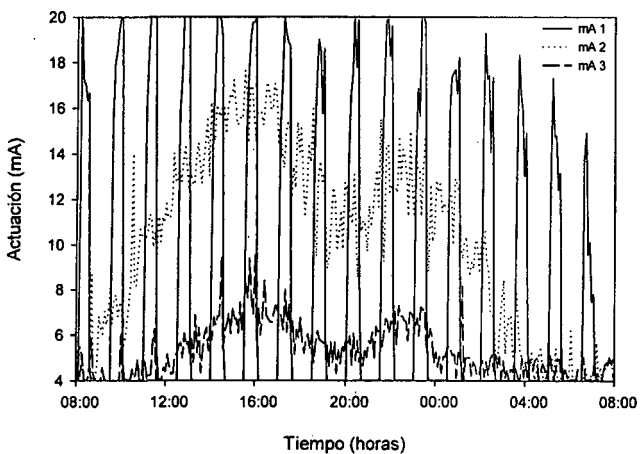
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



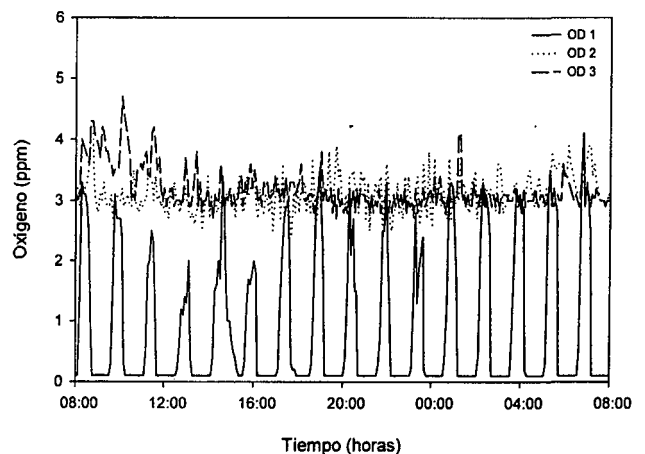
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

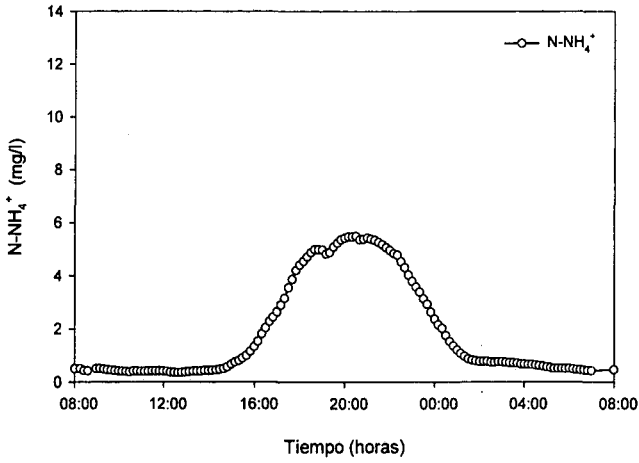


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

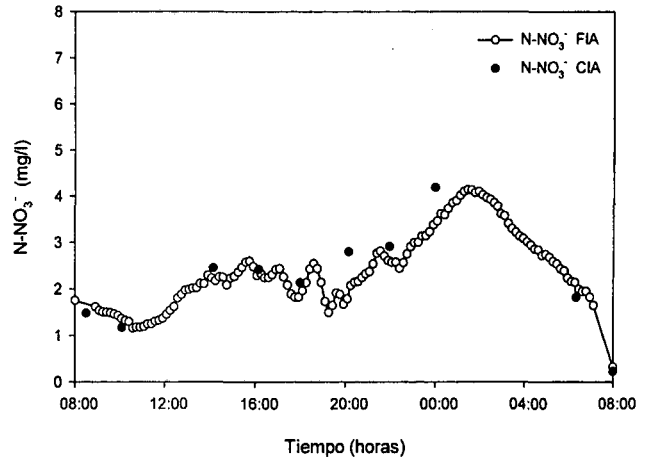


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

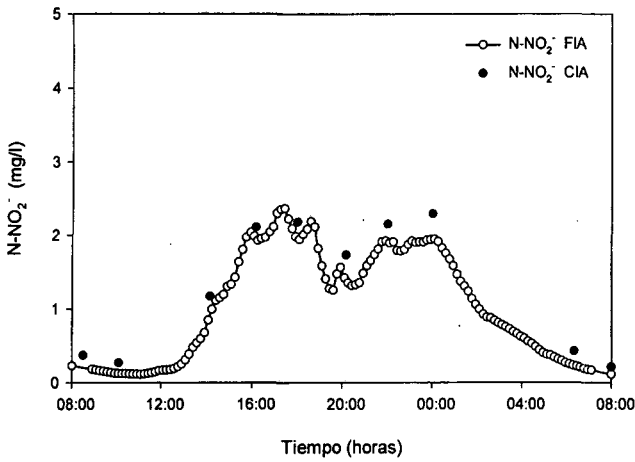
Fig. 5.26. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 6



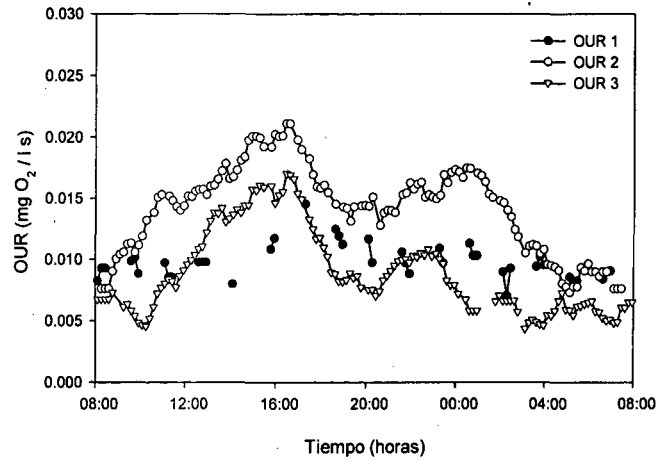
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



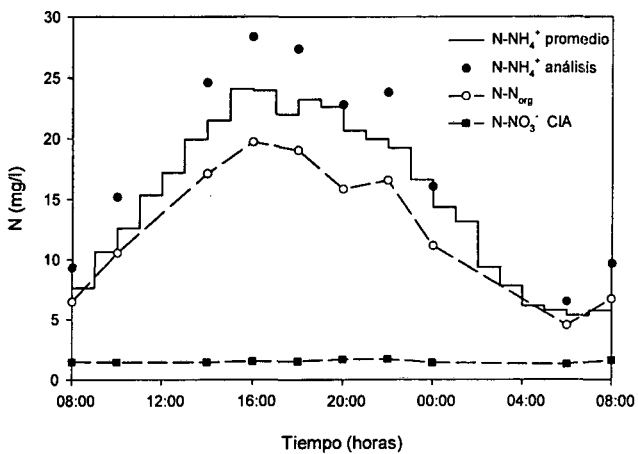
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



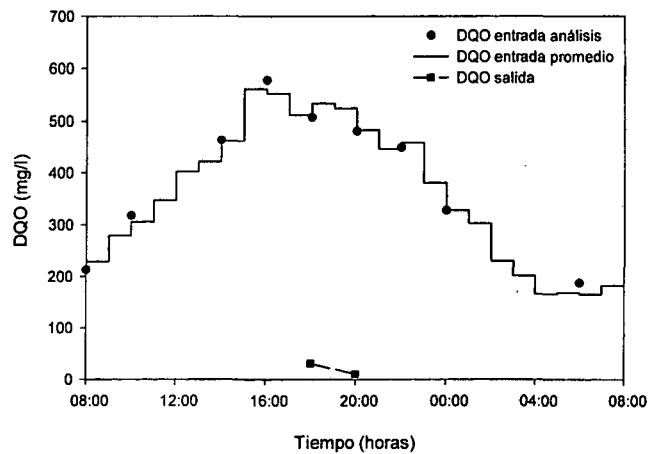
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

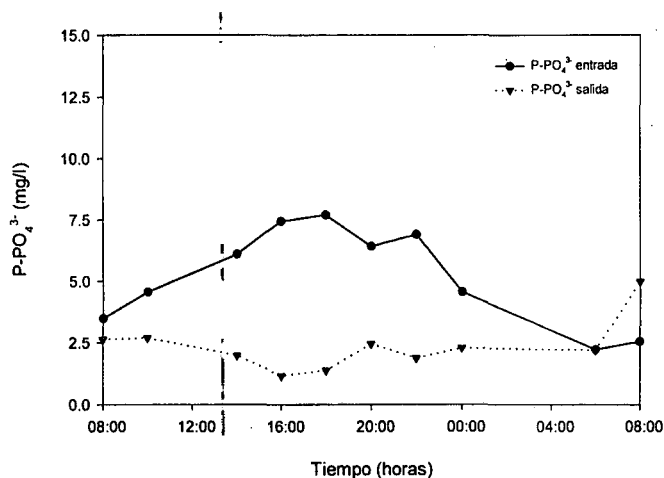


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.26. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 6



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.26. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 6

Resultados

En la tabla 5.20 se muestran los resultados del experimento 6: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.837
N-NO ₃ ⁻	0.966
N-NO ₂ ⁻	0.468
N total	2.271

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.751
% eliminación de N	82.6
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	36.9
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	42.5
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	20.6
mg N eliminado / g SSV d	23.53
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.83
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	2.11
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	1.02

Tabla 5.20. Resultados experimento 6

Comentarios

Variables "in-time"

Temperatura. Se mantiene entre 22 y 24 °C.

pH. En el tercer reactor se mantiene alrededor del punto de consigna. En el segundo reactor se mantiene alrededor de 7.25, con pequeñas oscilaciones provocadas por la entrada variable del primero. En éste se sitúa entre 7.00 y 7.25, por las diferentes condiciones a la que es sometido. El cambio de oxígeno a 3 mg/l provoca un aumento de pH de aproximadamente 0.25 unidades. Cuando se cambia de nuevo el oxígeno a 0 mg/l, el pH disminuye, volviendo aproximadamente a los valores anteriores. Se

puede apreciar, dentro del periodo anóxico de una hora, una primera rápida disminución de pH, seguida de otra disminución mucho más lenta el resto del periodo.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100–200 mV. En el reactor anóxico se produce una gran variabilidad, provocada por el cambio de consigna de oxígeno. En este caso las variaciones se producen entre 100 y –100 mV. El potencial redox disminuye prácticamente 200 mV durante un periodo anóxico, aunque se recuperan los valores anteriores en la siguiente secuencia aeróbica.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3 a pesar del ruido presente. En el reactor 1 se obtienen buenos resultados, excepto en los casos que el sistema de aireación no es capaz de llegar a los niveles consignados.

Aireación. Se puede volver a observar un consumo de aire reducido en el reactor 3, provocado por el consumo previo en el reactor 1.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.5 mg/l sobre las 20:30 horas.

NO₃⁻ salida. Aparecen valores muy elevados, muestra de que la nitrificación está favorecida pero también de que la desnitrificación no es óptima. El máximo es de 4.1 mg/l a las 1:30 horas. Los resultados CIA y FIA son similares.

NO₂⁻ salida. El máximo (2.4 mg/l) se presenta sobre las 17:30 horas. Este valor es inferior al del anterior experimento. Pueden observarse unos resultados CIA y FIA muy similares.

OUR. El consumo máximo aparece sobre las 16:30 horas en el reactor 2, con 0.021 mg O₂ / l s. Los valores obtenidos en el reactor 1 son bastante constantes durante todo el experimento, no están tan influenciados por la variación de carga como en los otros reactores.

Entrada NH₄⁺ y DQO. Los análisis "off-line" se ajustan a los valores de entrada previstos, aunque el amonio aparece ligeramente elevado en los periodos de máxima carga.

Salida DQO. Eliminación casi total.

PO₄³⁻. La entrada varía entre 2 y 8 mg/l, y la salida es alrededor de 2 mg/l. El último punto de la salida se produce porque el sedimentador había sido agitado ligeramente para evitar la salida de lodos. Esto provoca la transferencia al líquido de parte de fosfato en el interior de los flóculos.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno sube al 82.6 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa es de 23.5 mg N/ g SSV d, valor superior al anterior. Con esta secuencia, la nitrificación mejora, sin que afecte tanto a la desnitrificación, por lo que el balance global es mejor al anterior.

EXPERIMENTO 7

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del experimento 6, pero se cambia la duración de los ciclos en el reactor 1. De este modo, se intenta aprovechar el exceso de capacidad desnitrificadora del reactor 1 utilizando unas condiciones aeróbicas durante 10 minutos y unas anóxicas durante 20 minutos.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.21 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	3 mg/l / 0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4900
1	4660
2	4640
3	4590
Total sistema	433.1 gramos
DSVI	215 ml

Tabla 5.21. Condiciones experimento 7

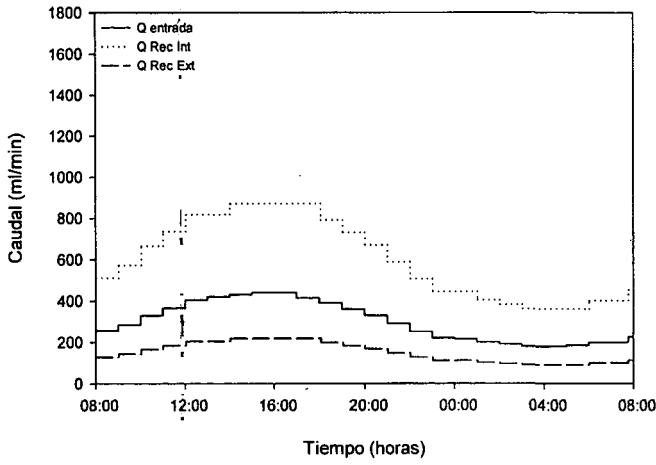
Incidencias de operación

Planta piloto

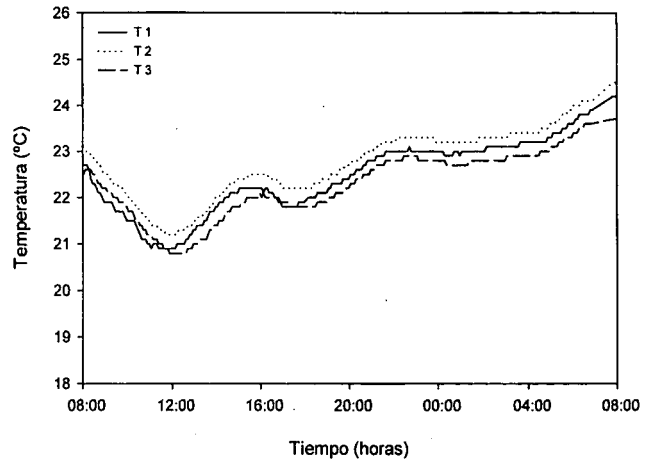
- Parada por problemas de pérdida de lodos en el sedimentador de 7:00 a 7:45 horas. Al no efectuar las secuencias de aireación, las variables presentan tendencias diferentes.
- De nuevo existen problemas con el control de oxígeno del reactor 2. El consumo es muy reducido y también se producen las perturbaciones inducidas por los cambios de consigna del reactor 1. También aparece de 8:00 a 12:00 horas el problema con la válvula de aireación. Al ser incapaz de cerrarse totalmente, se produce entrada de aire en el reactor, a pesar de que la señal de control es para mantenerla cerrada.
- El control de oxígeno en el primer reactor no es capaz de llegar a los valores de consigna, incluso con aireación máxima, durante algunos periodos de consumo elevado. Este hecho se ve incrementado porque el tiempo de aireación (10 minutos) es muy reducido, lo que no da tiempo a establecer las condiciones de consigna partiendo de una situación anóxica.

Analizadores

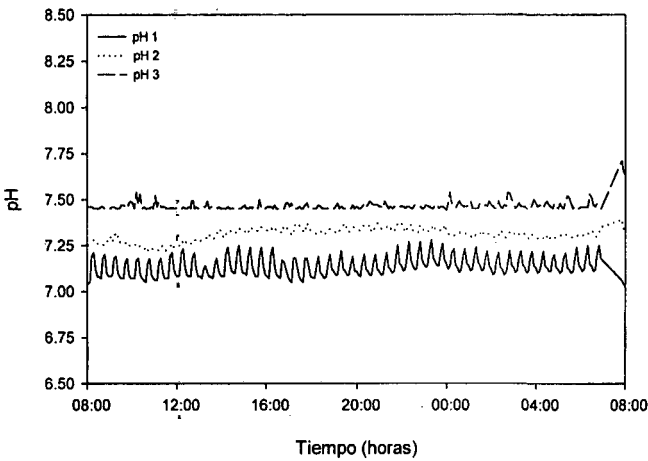
- No se dispone de datos amonio de 8:00 a 11:45 horas por problemas con el equipo CFA.
- Del equipo FIA tampoco se disponen datos de 8:00 a 11:45, excepto una muestra obtenida "off-line" a las 10:00 horas. En este caso se debe a la entrada de aire en la columna de reducción de nitratos, lo que provoca análisis erróneos.
- De 3:00 a 8:00 horas existen problemas de lectura del equipo CFA, lo que también interfiere con el equipo FIA. Las lecturas incorrectas provocan que no se obtenga la cadencia de análisis normal.
- La aparición de un exceso de nitratos en el sedimentador provoca un fenómeno de "rising". De este modo, se produce pérdida de biomasa en la salida, que interfiere consumiendo nitrato en el sistema de muestreo y provocando algunas medidas inferiores en ese periodo.
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.



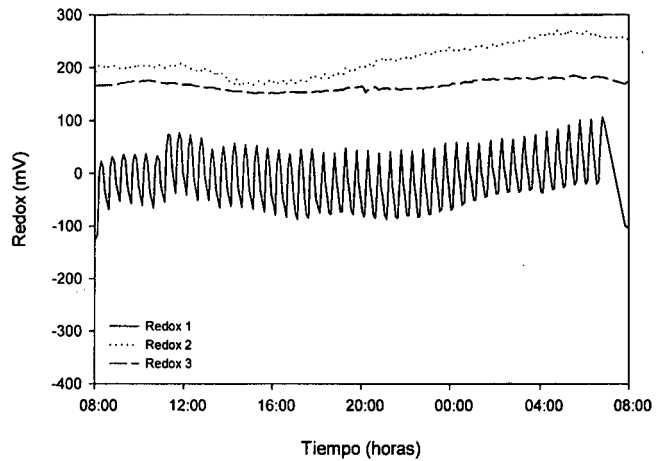
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



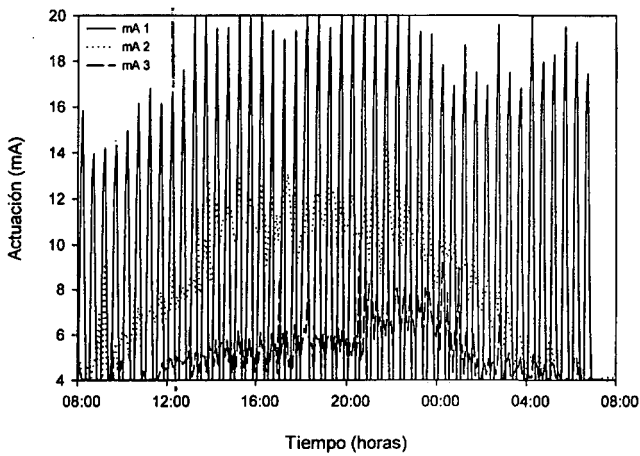
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



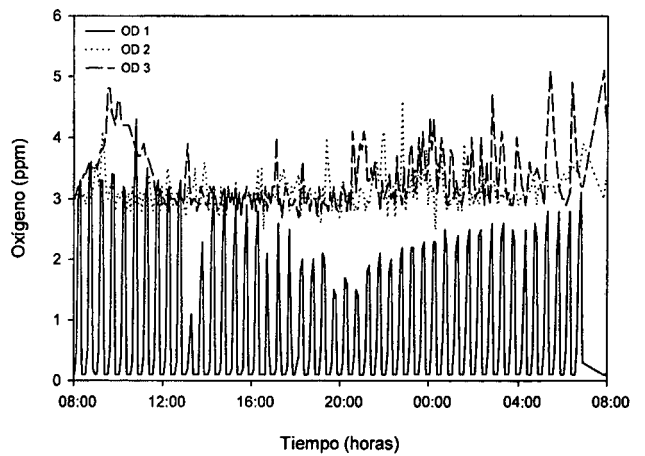
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

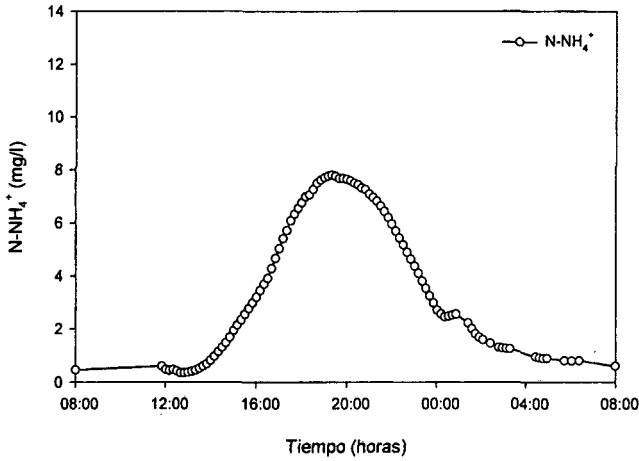


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

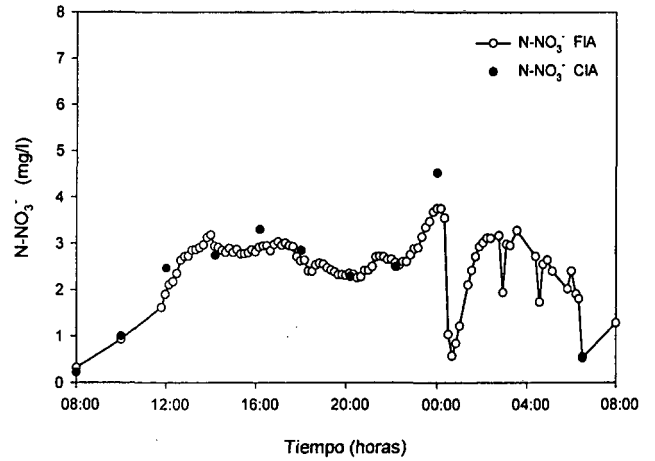


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

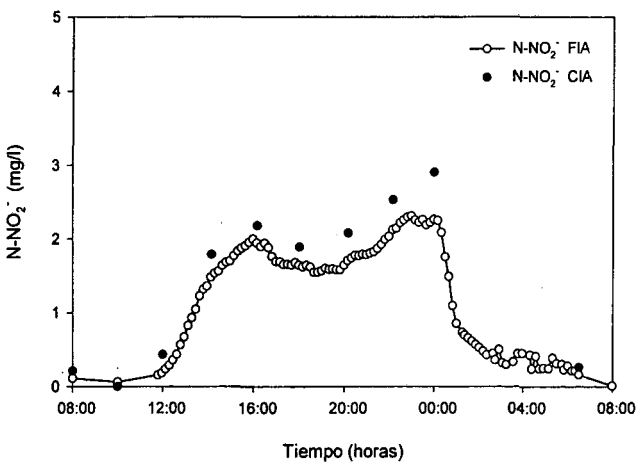
Fig. 5.27. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 7



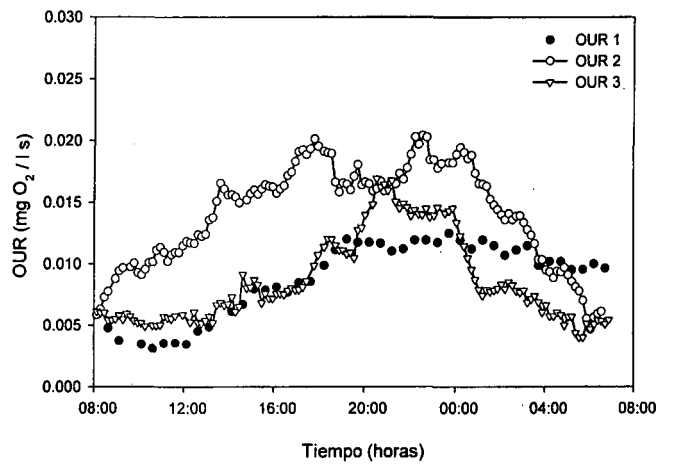
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



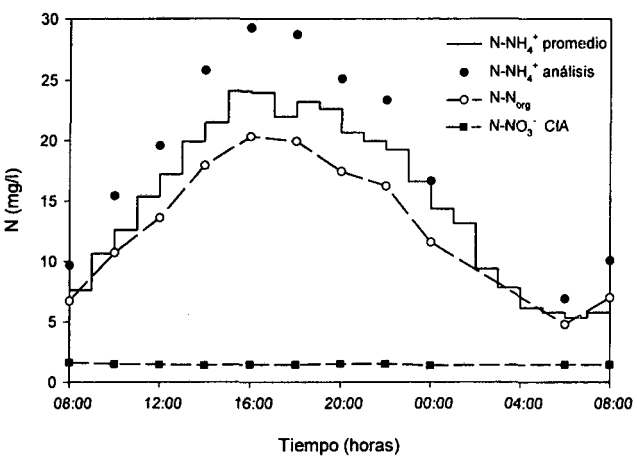
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



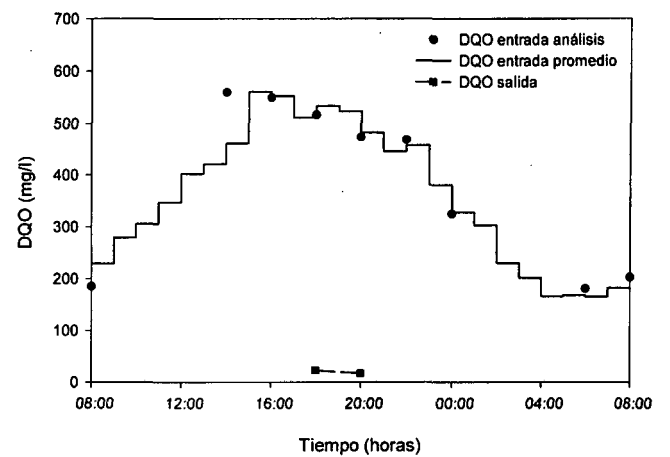
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

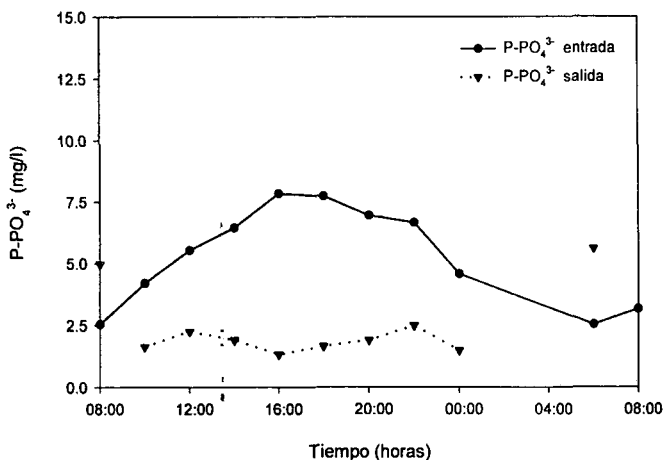


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.27. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 7



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.27. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 7

Resultados

En la tabla 5.22 se muestran los resultados del experimento 7: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.261
N-NO ₃ ⁻	0.998
N-NO ₂ ⁻	0.478
N total	2.737

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.285
% eliminación de N	79.0
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	46.0
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	36.5
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	17.5
mg N eliminado / g SSV d	23.75
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.91
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	2.30
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	1.10

Tabla 5.22. Resultados experimento 7

Comentarios

Variables "in-line"

Temperatura. Varía entre 21 y 24 °C.

pH. En el tercer reactor se mantiene alrededor del punto de consigna, excepto después de la parada de las 7:00 horas. En el segundo reactor se mantiene alrededor de 7.25, con muy ligeras oscilaciones provocadas por la entrada variable del primero. En éste se sitúa entre 7.10 y 7.25, por las diferentes condiciones a la que es sometido. El cambio de oxígeno a 3 mg/l

provoca un aumento de pH de aproximadamente 0.15 unidades. Cuando se cambia de nuevo el oxígeno a 0 mg/l, el pH disminuye, volviendo aproximadamente a los valores anteriores.

Redox. En el reactor 3 se mantiene alrededor de 100–200 mV. En el 2 se miden valores mayores, entre 200 y 300 mV. En el reactor anóxico se produce un comportamiento variable, provocado por el cambio de consigna de oxígeno. En este caso se producen valores entre 50 y –50 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3 a pesar del ruido presente. En el reactor 1 se obtienen resultados adecuados, excepto cuando el sistema de aireación no es capaz de alcanzar los valores de las consignas.

Aireación. Se puede volver a observar un consumo de aire reducido en el reactor 3, mientras que en el reactor 2 el consumo tampoco es muy elevado. Esto es provocado por el alto consumo previo en el reactor 1.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 7.8 mg/l sobre las 19:30 horas, mayores que los anteriores.

NO₃⁻ salida. Aparecen valores elevados, muestra de que la nitrificación está favorecida pero también de que la desnitrificación no es óptima. El máximo es de 3.7 mg/l a las 24:00 horas. Los resultados CIA y FIA son similares excepto algún análisis aislado.

NO₂⁻ salida. El máximo (2.3 mg/l) se presenta sobre las 23:00 horas. Pueden observarse unos resultados CIA y FIA con igual tendencia, pero con algunos puntos ligeramente desplazados.

OUR. El consumo máximo aparece sobre las 22:30 horas en el reactor 2, con 0.020 mg O₂ / l s. Los valores obtenidos en el reactor 1 son similares a los del reactor 3.

Entrada NH₄⁺ y DQO. Los análisis "off-line" se ajustan a los valores de entrada previstos, aunque el amonio medido es ligeramente elevado.

Salida DQO. La eliminación de DQO es casi total.

PO₄³⁻. La entrada varía entre 2 y 8 mg/l, y la salida es alrededor de 2 mg/l. El primer y último punto de la salida son elevados porque en el sedimentador aparecen desprendimientos de biomasa que al ser agitado ligeramente para que sedimente de nuevo, se provoca la transferencia al líquido de parte de fosfato del interior de los flóculos.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es del 79.0 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa es de 23.75 mg N / g SSV d. Con esta secuencia, la nitrificación no se ve tan mejorada, aunque el balance global es correcto.

EXPERIMENTO 8

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones de los experimentos 2 y 3 para comprobar la reproducibilidad de la respuesta de la planta ante una misma perturbación en la entrada.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.23 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:30 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5640
1	5590
2	5560
3	5600
Total sistema	519.8 gramos
DSVI	145 ml

Tabla 5.23. Condiciones experimento 8

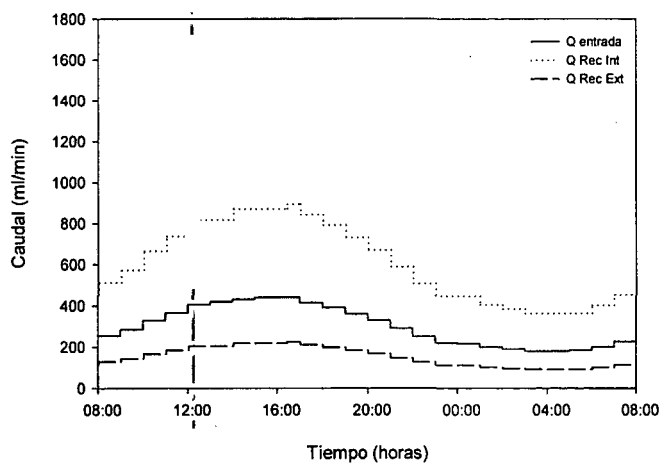
Incidencias de operación

Planta piloto

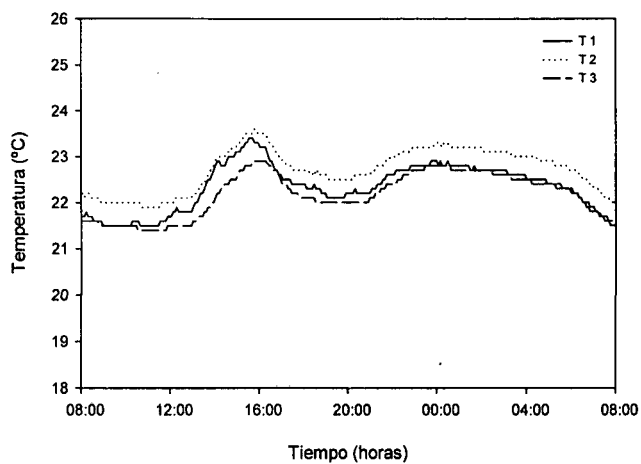
- El comportamiento del control de oxígeno es ligeramente ruidoso en los reactores 2 y 3, debido al reducido consumo durante ciertos periodos.
- El control de pH en este experimento no ha sido muy adecuado. El error ha sido inducido por el electrodo de pH del tercer reactor. Éste electrodo ha medido valores inferiores a los reales, por lo que ha comenzado a actuar excesivamente sobre la bomba de adición de bicarbonato. Sobre las 16:00 horas la adición es muy elevada, por lo que afecta al pH del resto de los reactores. Una vez ajustada sobre las 16:30 horas, la medida obtenida es bastante mayor al punto de consigna. A partir de ese momento, la adición de bicarbonato se paraliza y el pH va recuperando valores inferiores. Observando los valores de los reactores 1 y 2, se detecta otro error del electrodo de pH 3. Esto provoca de nuevo la adición excesiva de bicarbonato, con la subida de pH en los tres reactores.

Analizadores

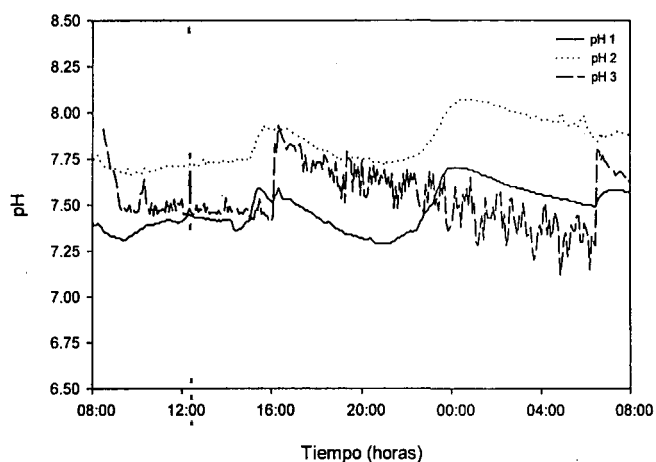
- No se dispone de datos de amonio de 19:00 a 20:15 horas por recalibrado del equipo CFA.
- Del equipo FIA tampoco se disponen datos de 16:45 a 20:45, por problemas con la columna de reducción de nitrato del analizador.
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.
- En este experimento no hay disponibles datos "off-line" de nitrato, nitrito ni fosfato.



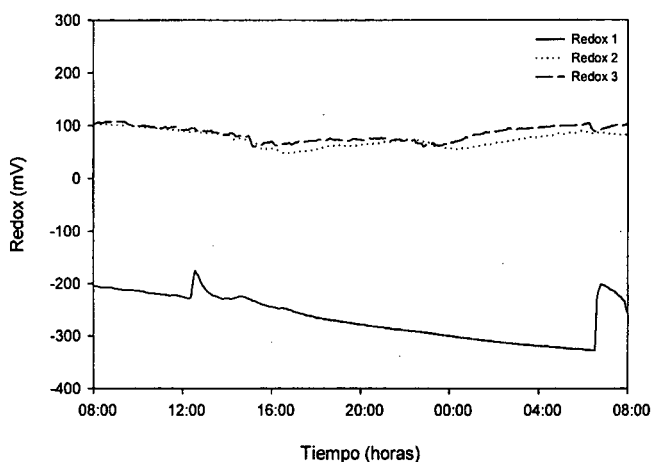
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



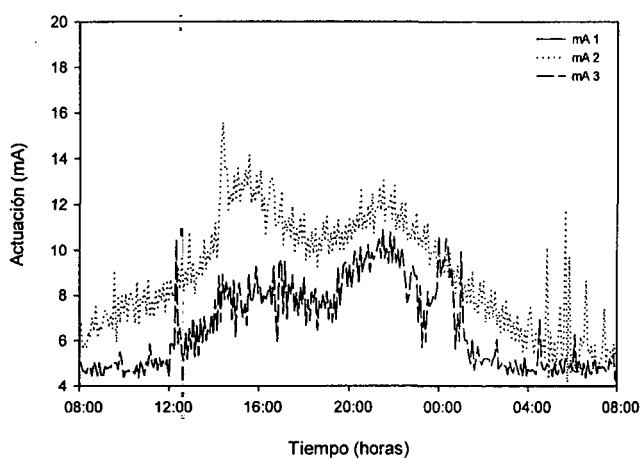
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



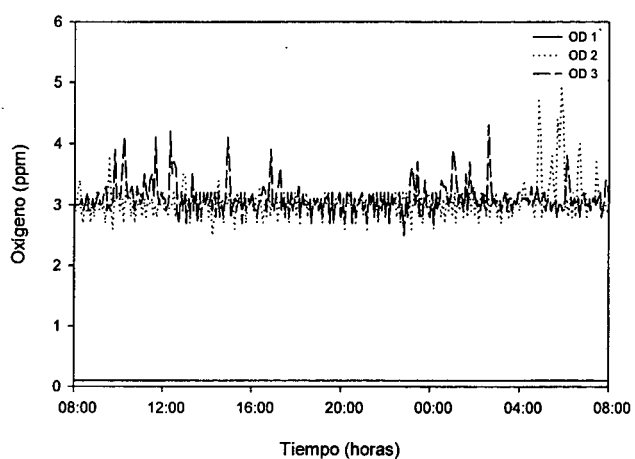
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

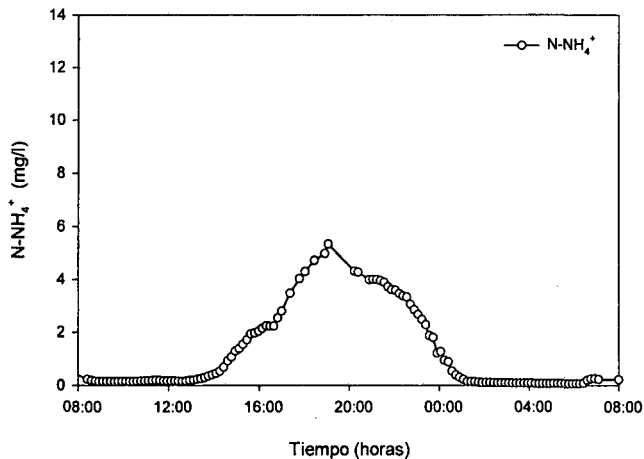


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

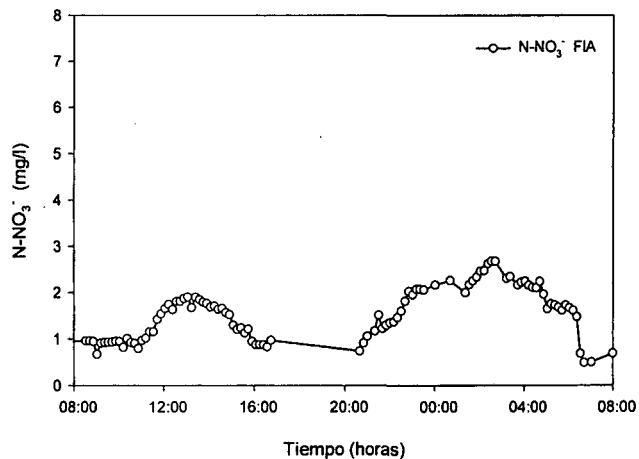


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

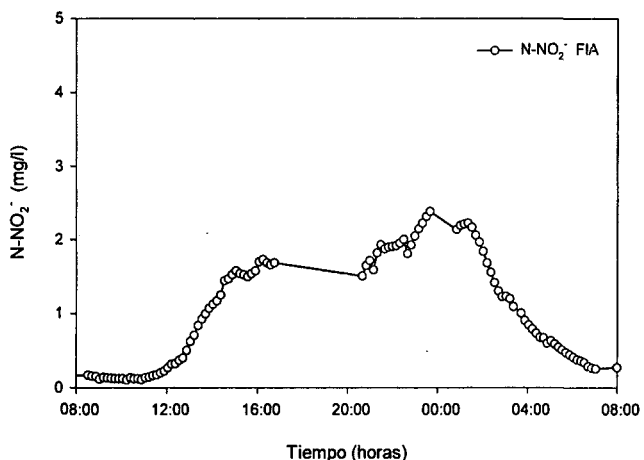
Fig. 5.28. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 8



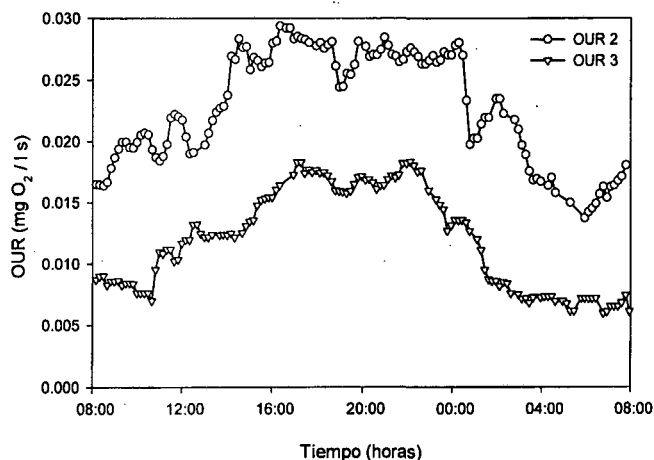
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



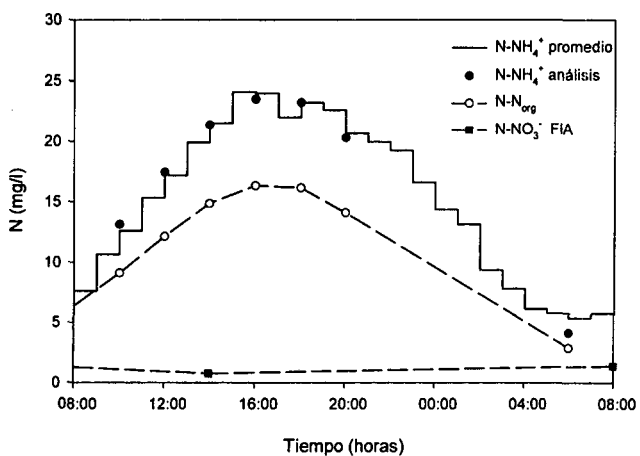
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) de la salida



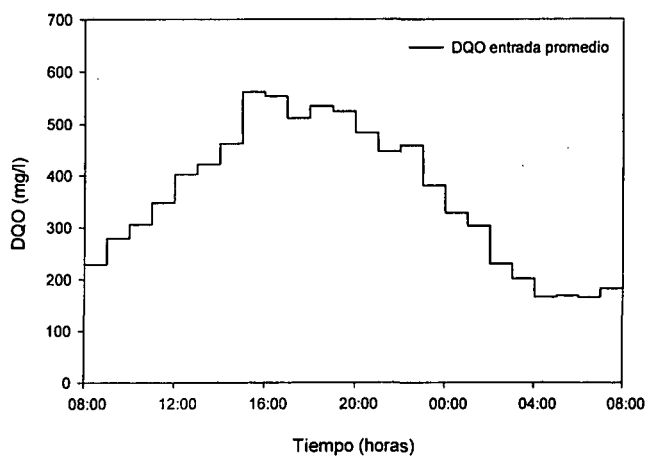
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos



(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada de la planta

Fig. 5.28. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 8

Resultados

En la tabla 5.24 se muestran los resultados del experimento 8: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.702
N-NO ₃ ⁻	0.588
N-NO ₂ ⁻	0.499
N total	1.789

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.233
% eliminación de N	86.3
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	39.2
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	32.9
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	27.9
mg N eliminado / g SSV d	21.61
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.35
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.13
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.96

Tabla 5.24. Resultados experimento 8

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. Las recirculaciones interna y externa se mantienen correctamente en las relaciones consignadas en el sistema experto.

Temperatura. Se mantiene en un rango de 21.5 a 23.5 °C.

pH. En este experimento, los valores de pH presentan una gran variabilidad, provocados por los problemas con el controlador de pH del reactor 3, tal como se ha comentado en el apartado de incidencias. A pesar de esta variabilidad provocada por el exceso de bicarbonato, los valores varían entre 7.25 y 8.00.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100 mV. En el reactor anóxico se miden valores aproximados entre -200 y -300 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3 a pesar del ruido presente.

Aireación. Se observa un consumo no muy elevado en los dos reactores aeróbicos.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.3 mg/l sobre las 19:00 horas.

NO₃⁻ salida. Los valores máximos no son muy elevados. El máximo es de 2.7 mg/l a las 2:30 horas.

NO₂⁻ salida. El máximo (2.4 mg/l) se presenta sobre las 23:40 horas.

OUR. Durante todo el experimento, se observan valores de consumo muy elevados en ambos reactores, posiblemente debido a la alta concentración de microorganismos. El consumo máximo aparece sobre las 16:30 horas en el reactor 2, con 0.029 mg O₂ / l s, aunque valores parecidos se observan desde las 14:00 a las 24:00 horas.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan muy adecuadamente a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. Se ha medido la concentración de nitrato con el analizador FIA, observando que los valores son muy similares.

DQO. No se dispone de datos de análisis de DQO, pero se supone que las concentraciones de entrada son las medias.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es muy elevada, del 86.3 %. Aunque a primera vista el experimento tiene un rendimiento muy bueno, si se considera la biomasa del sistema, la eliminación es de 21.6 mg N / g SSV d, valor ligeramente bajo.

EXPERIMENTO 9

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones de los experimentos 2, 3 y 8 para comprobar la reproducibilidad de la respuesta de la planta ante una misma perturbación en la entrada. Permitirá disponer de una referencia actualizada para los experimentos posteriores.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.25 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	6690
1	6190
2	6100
3	6060
Total sistema	574.0 gramos
DSVI	185 ml

Tabla 5.25. Condiciones experimento 9

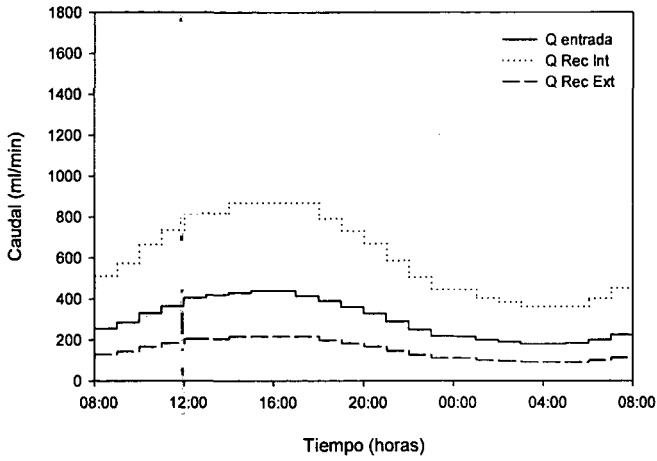
Incidencias de operación

Planta piloto

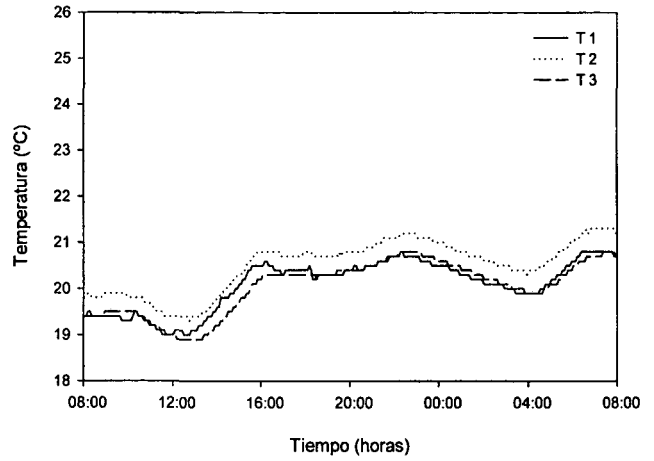
- El control de oxígeno muestra un comportamiento ruidoso en los dos reactores aeróbicos. Sobre las 7:00 horas aparece un error importante en el reactor 3, posiblemente causado por una mala lectura de la sonda.
- El control de pH ha funcionado mejor que en el experimento anterior, aunque también se detecta alguna perturbación. Sobre las 24:00 horas, la medida de pH del reactor 3 no es correcta, por lo que adiciona en exceso bicarbonato, lo que se traduce en un incremento de pH en el resto de los reactores. A pesar de ello, el valor de pH durante el experimento no ha sufrido una desviación muy grande.

Analizadores

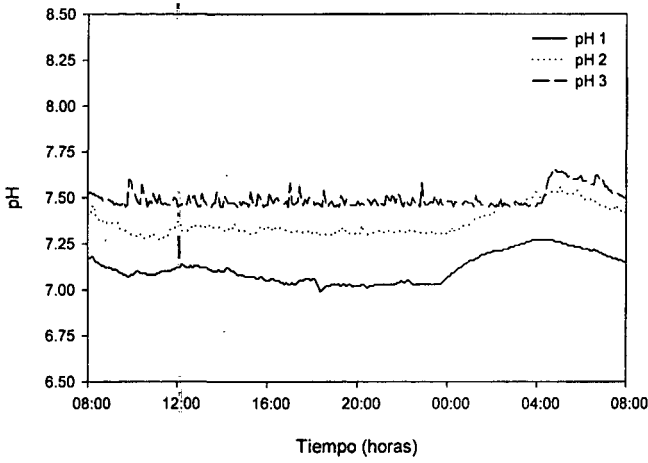
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.



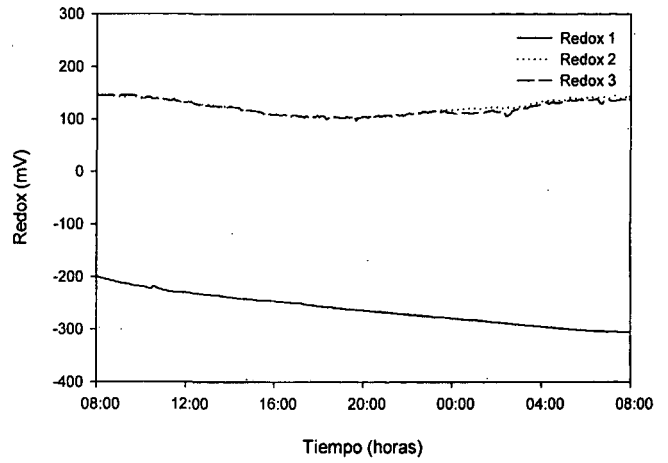
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



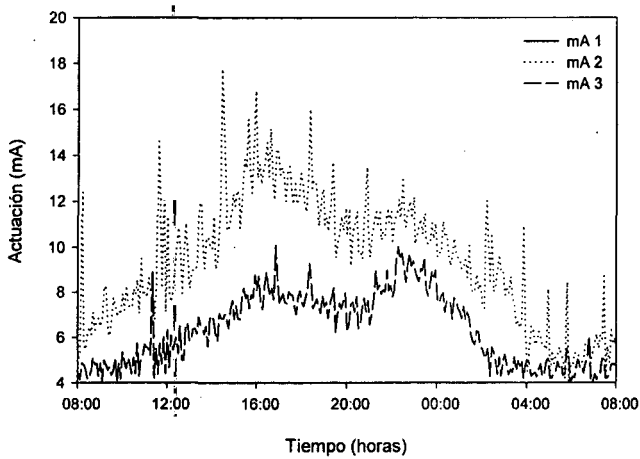
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



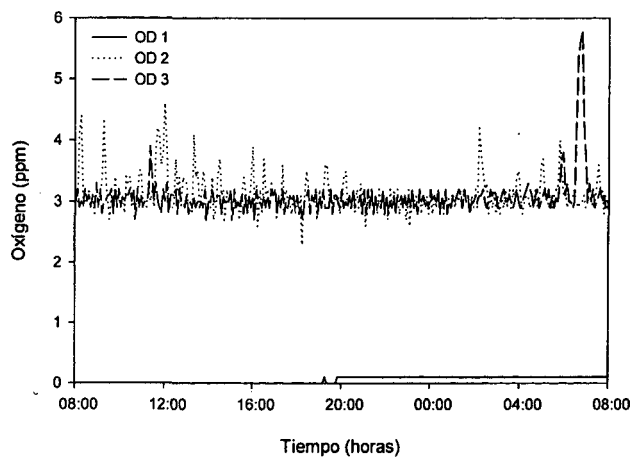
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

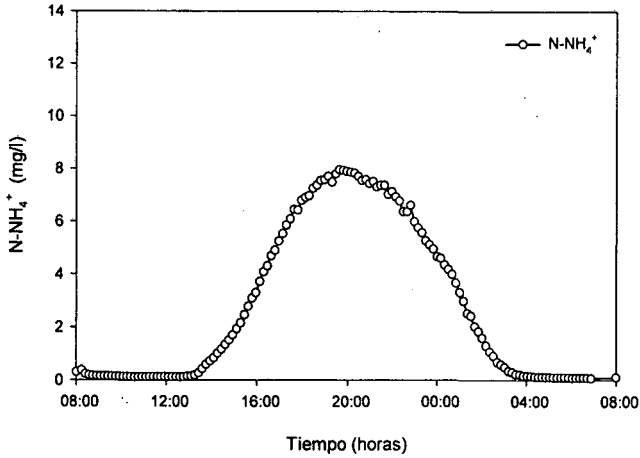


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

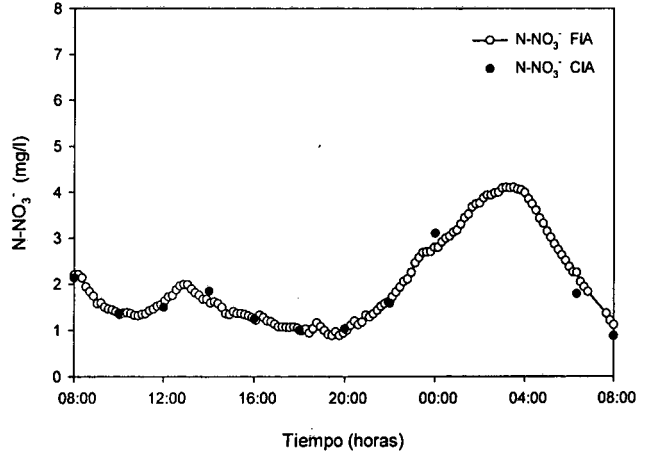


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

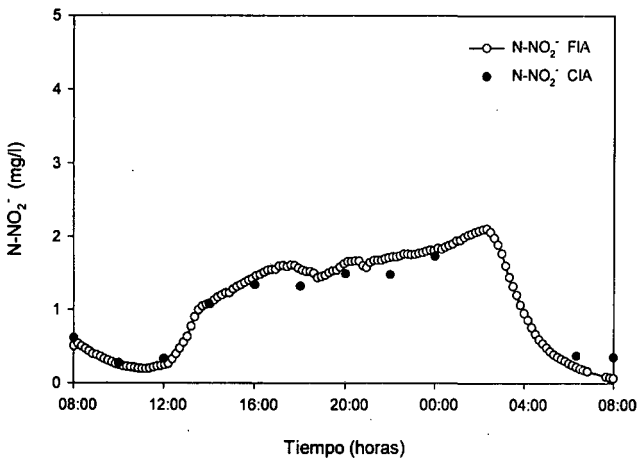
Fig. 5.29. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 9



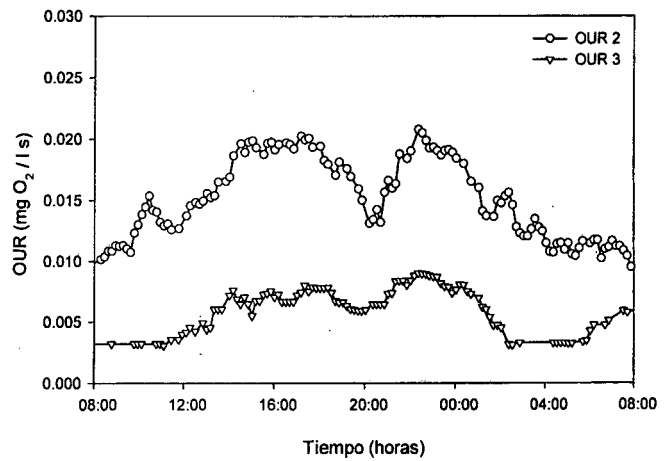
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



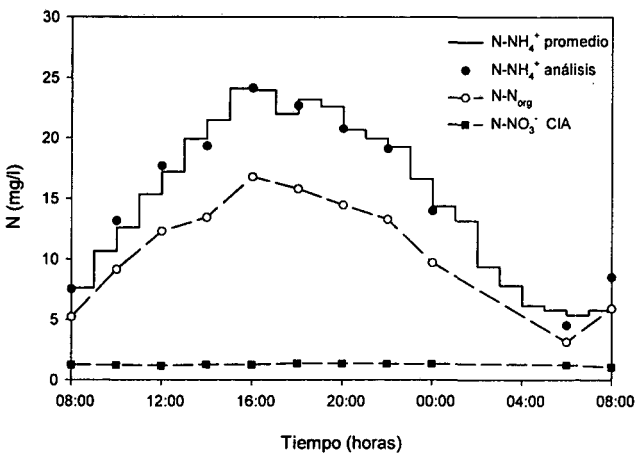
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



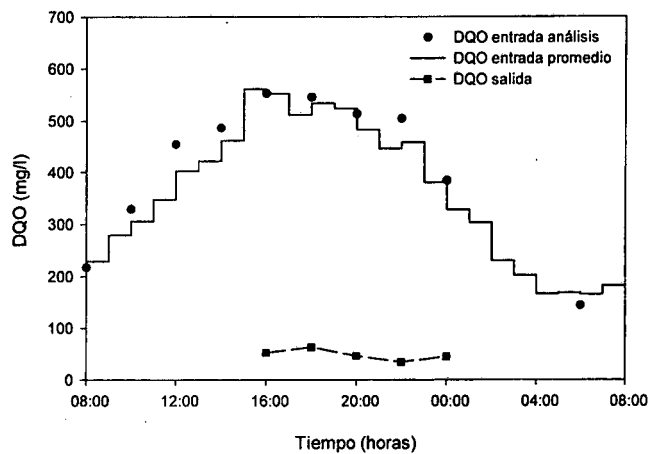
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

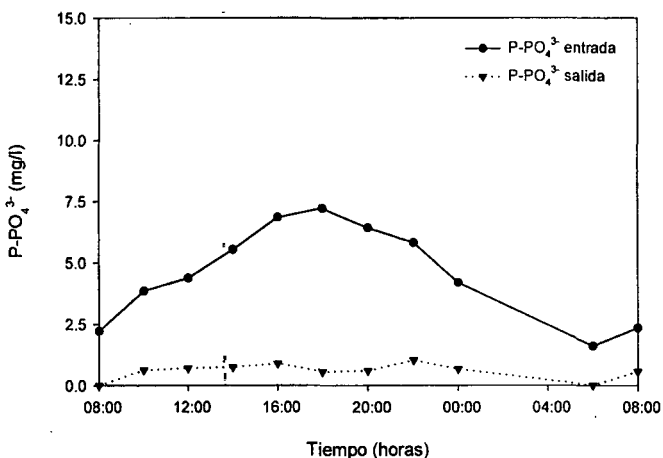


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.29. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 9



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.29. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 9

Resultados

En la tabla 5.26 se muestran los resultados del experimento 9: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.283
N-NO ₃ ⁻	0.779
N-NO ₂ ⁻	0.480
N total	2.542

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.480
% eliminación de N	80.5
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	50.5
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	30.6
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	18.9
mg N eliminado / g SSV d	18.26
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.24
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.36
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.84

Tabla 5.26. Resultados experimento 9

Comentarios

Variables in-line

Caudales de recirculación. Las recirculaciones interna y externa se mantienen correctamente en las relaciones consignadas en el sistema experto.
Temperatura. Se mantiene con valores de 19 a 21 °C.
pH. El control funciona correctamente en el reactor 3, por lo que se mantiene en valores cercanos al

consignado. Solo aparece cierta desviación durante las últimas horas del experimento, debido a los problemas comentados en incidencias. En el reactor 2 se mantiene entre 7.25 y 7.50, mientras que en el primero varía entre 7.00 y 7.25.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100-150 mV. En el reactor anóxico disminuye durante todo el experimento desde -200 a -300 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3 a pesar del ruido presente.

Aireación. Se observa un consumo medio en los dos reactores aeróbicos.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 8.0 mg/l sobre las 19:30 horas.

NO₃⁻ salida. Los valores máximos son algo elevados. El máximo es de 4.1 mg/l a las 3:30 horas. Pueden observarse dos picos. El mayor, producido durante la madrugada, aparece por la falta de materia orgánica utilizable para desnitrificar en condiciones anóxicas. Las medidas del analizador CIA son prácticamente iguales a las obtenidas "on-line" con el FIA.

NO₂⁻ salida. El máximo (2.1 mg/l) se presenta sobre las 2:30 horas, aunque de 14:00 a 3:00 horas la concentración se mantiene bastante constante. Los análisis con el equipo CIA son muy similares a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo normales en ambos reactores. El consumo máximo aparece sobre las 17:30 horas en el reactor 2, con 0.020 mg O₂ / l s, aunque valores parecidos se observan en diferentes periodos.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan muy adecuadamente a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada de nitrato, medida con el analizador CIA, se ha mantenido prácticamente constante.

Entrada DQO. Los análisis se ajustan bien a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7.5 mg/l, valores similares a los esperados.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene estable e inferior a 1 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es normal, del 80.5 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa, la eliminación es de 18.3 mg N / g SSV d, valor ligeramente bajo. Además, la eliminación de amonio no es muy elevada, ya que más de la mitad del nitrógeno de la salida se encuentra en esta forma.

EXPERIMENTO 10

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del anterior, modificando únicamente la consigna de oxígeno disuelto en los reactores aeróbicos. Esto permite obtener datos de rendimiento de eliminación para unas condiciones donde se favorece la nitrificación mediante el aumento de oxígeno.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.27 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	5 mg/l
3	Aeróbico	5 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5640
1	5590
2	5560
3	5600
Total sistema	519.8 gramos
DSVI	190 ml

Tabla 5.27. Condiciones experimento 10

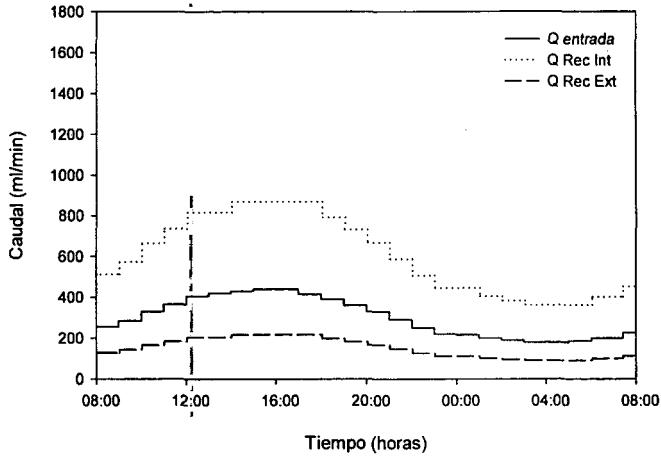
Incidencias de operación

Planta piloto

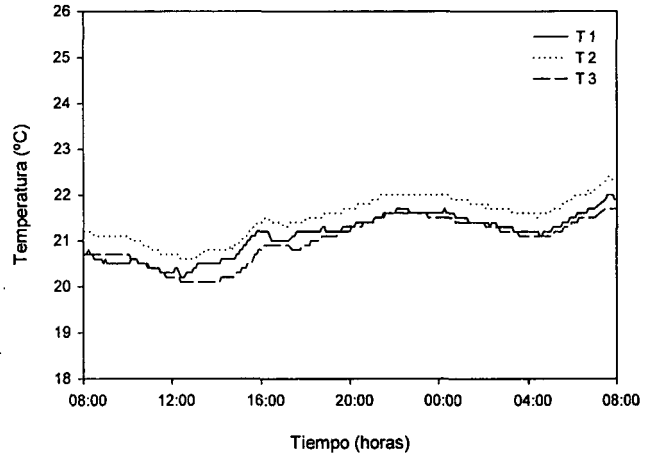
- Parada por escape de agua de 17:19 a 17:21.
- La planta piloto es parada de 7:00 a 7:30 horas para realizar tareas de mantenimiento.
- El control de oxígeno funciona correctamente en los reactores aeróbicos, consiguiéndose mantener el valor consignado de 5 mg/l. Esta consigna provoca la entrada excesiva de oxígeno en el primer reactor. Esto sucede sobre todo a partir de horarios con alto caudal de entrada, y por lo tanto, con altos caudales de recirculación interna. A partir de las 16:00 horas se puede observar oxígeno en el reactor 1, llegando a valores de 2 mg/l durante largos periodos.
- El control de pH ha funcionado de un modo similar al experimento anterior. También han aparecido algunos problemas de lectura de pH en el tercer reactor, lo que ha provocado la dosificación excesiva de bicarbonato y, por tanto, un ligero incremento de pH en todo el sistema.

Analizadores

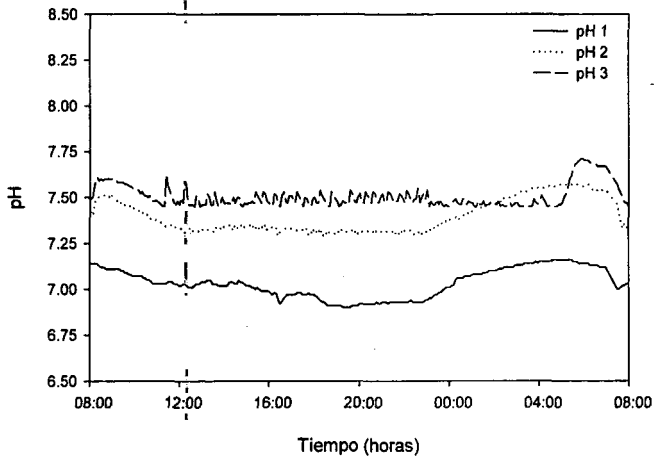
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 horas por recalibración de los analizadores.



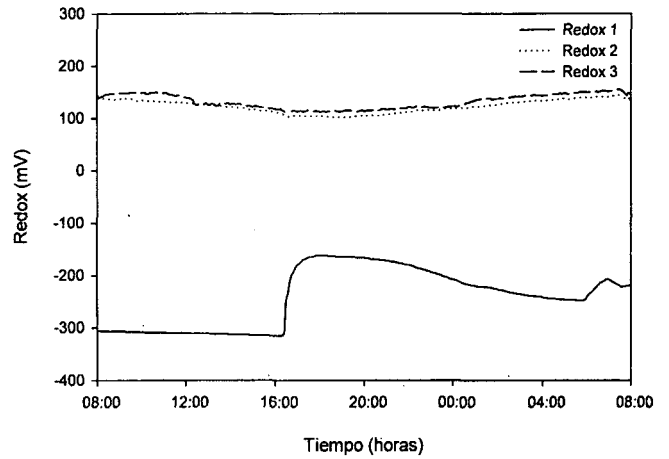
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



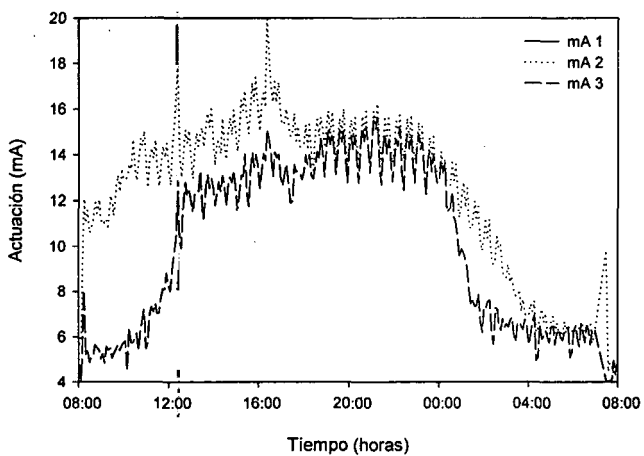
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



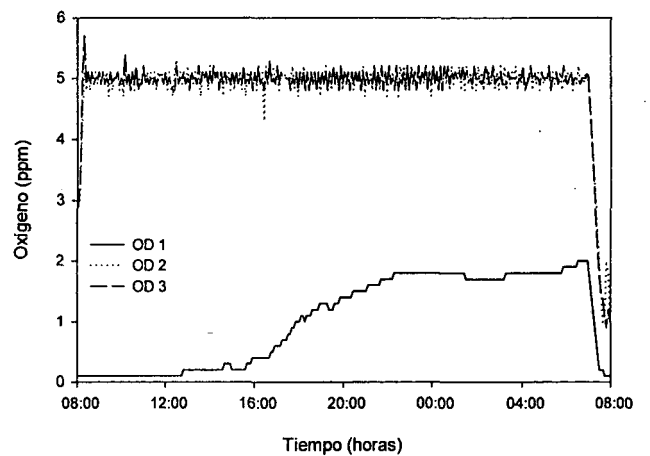
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

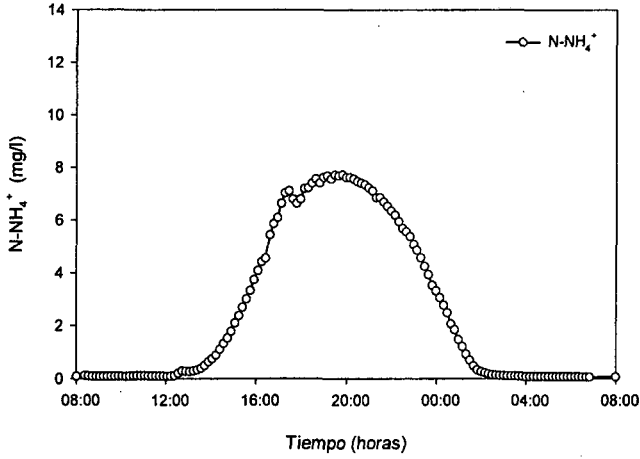


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

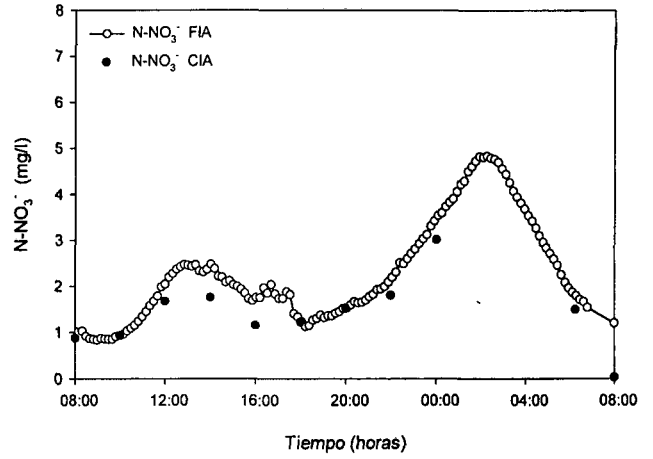


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

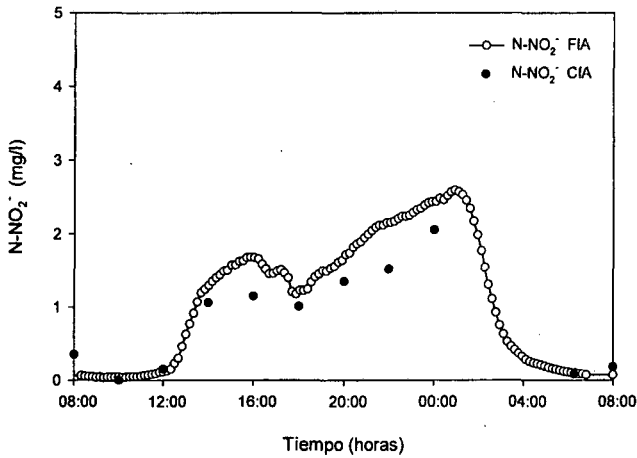
Fig. 5.30. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 10



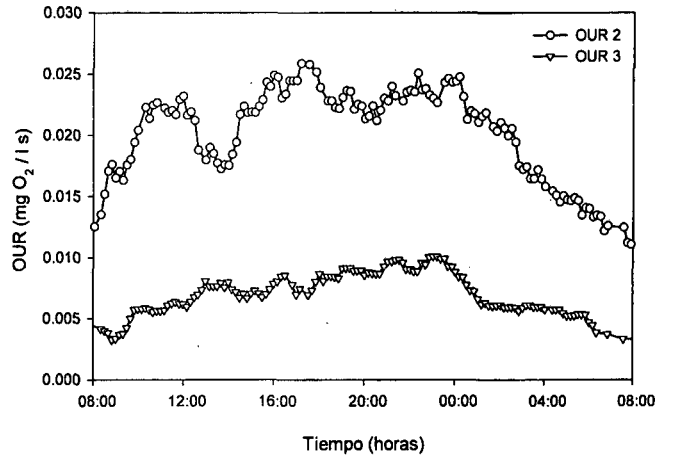
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



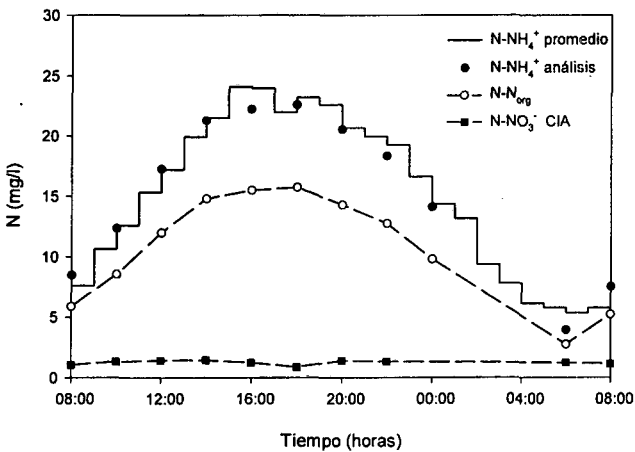
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



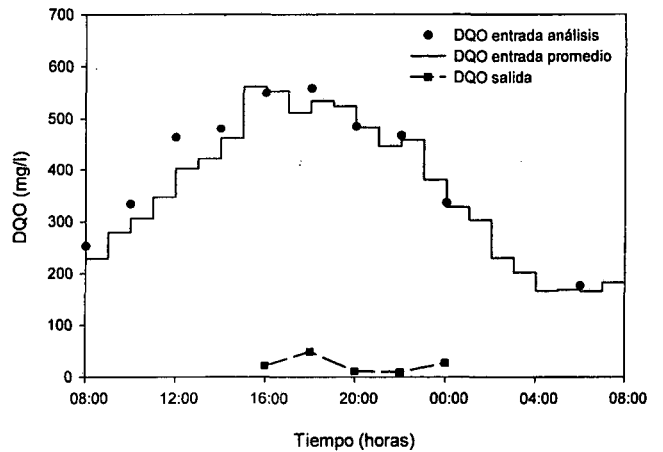
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

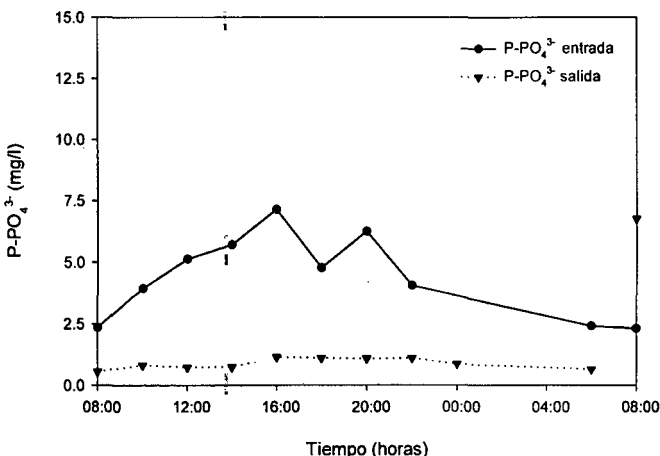


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.30. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 10



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.30. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 10

Resultados

En la tabla 5.28 se muestran los resultados del experimento 10: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.225
N-NO ₃ ⁻	0.906
N-NO ₂ ⁻	0.478
N total	2.609

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.41
% eliminación de N	80.0
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	47.0
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	34.7
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	18.3
mg N eliminado / g SSV d	20.03
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.36
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.74
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.92

Tabla 5.28. Resultados experimento 10

Comentarios

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene con valores de 20 a 22 °C.
pH. El control funciona correctamente en el reactor 3, por lo que se mantiene en valores cercanos al consignado. Como en el experimento anterior, aparece cierta desviación durante las últimas horas, debido a los problemas comentados. En el reactor 2 se mantiene entre 7.25 y 7.50, mientras que en el primero varía entre 6.90 y 7.15.

Redox. En los reactores 2 y 3 se mantiene alrededor de 100-150 mV. En el reactor anóxico aparecen valores iniciales de -300 mV. A partir de las 16:00 horas, cuando aparecen concentraciones

elevadas de oxígeno en el reactor, los valores de redox aumentan a valores cercanos a -150 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3, excepto en el último periodo que la planta está parada. En el reactor 1 no se pueden mantener los valores de 0 mg/l que proporcionarían condiciones anóxicas, debido a la recirculación interna que introduce un exceso de oxígeno en el reactor. Esto hace desfavorecer el proceso de desnitrificación.

Aireación. Se observa un consumo elevado de aire en los dos reactores. Este consumo es provocado por el alto punto de consigna de oxígeno en los reactores aeróbicos, lo que obliga a mantener un elevado caudal de aire en el reactor.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 7.7 mg/l sobre las 19:30 horas.

NO₃⁻ salida. Los valores máximos son elevados. El máximo es de 4.8 mg/l a las 2:00 horas. Pueden observarse dos picos. El mayor, producido durante la madrugada, aparece por la falta de materia orgánica utilizable para desnitrificar en condiciones anóxicas. Las medidas del analizador CIA son similares a las obtenidas "on-line" con el FIA.

NO₂⁻ salida. El máximo (2.6 mg/l) se presenta sobre las 1:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen la misma tendencia que los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo bastante elevados en el reactor 2, mientras que en el 3 no se ven muy incrementados. El consumo máximo aparece sobre las 17:00 horas en el reactor 2, con 0.028 mg O₂ / l s, aunque valores similares aparecen en diferentes periodos.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan bien a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada de nitrato, medida con el analizador CIA, se ha mantenido prácticamente constante.

Entrada DQO. Valores ajustados a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7.5 mg/l, valores correctos.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene estable e inferior a 1 mg/l, excepto el último punto. Éste presenta un incremento provocado por la agitación de lodos a la que es sometido el sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es normal, del 80.0 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa, la eliminación es de 20.0 mg N / g SSV d, valor muy parecido al anterior. Puede observarse que la eliminación de amonio no es mejorada prácticamente al aumentar la consigna de oxígeno de 3 a 5 mg/l.

EXPERIMENTO 11

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del anterior, disminuyendo únicamente la consigna de oxígeno disuelto en los reactores aeróbicos. Esto permite obtener datos de rendimiento de eliminación para unas condiciones de oxígeno disuelto donde la nitrificación se encuentra menos favorecida.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.29 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	1 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (10:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5460
1	5310
2	5360
3	5410
Total sistema	499.4 gramos
DSVI	200 ml

Tabla 5.29. Condiciones experimento 11

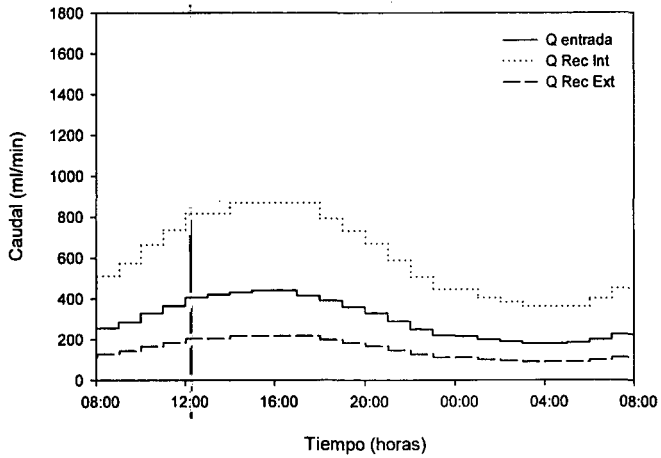
Incidencias de operación

Planta piloto

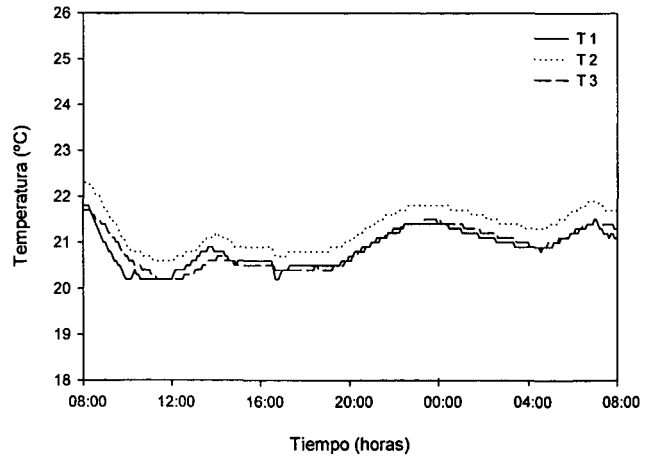
- Parada por alarma de funcionamiento de las bombas de 16:40 a 16:42.
- El control de oxígeno funciona correctamente en los reactores aeróbicos, consiguiéndose mantener el valor consignado de 1 mg/l. Para obtener estos valores de oxígeno, las dos válvulas de aireación trabajan en una zona muy cerrada. Esto provoca que su comportamiento no sea muy lineal, por lo que aparecen de nuevo las oscilaciones de concentración ya aparecidas en otros experimentos.
- El control de pH ha funcionado correctamente, aunque también se han repetido ligeramente los problemas con el electrodo de pH del tercer reactor. Al final del periodo experimental se ha producido una dosificación excesiva de bicarbonato y, por tanto, un ligero incremento de pH en todo el sistema.

Analizadores

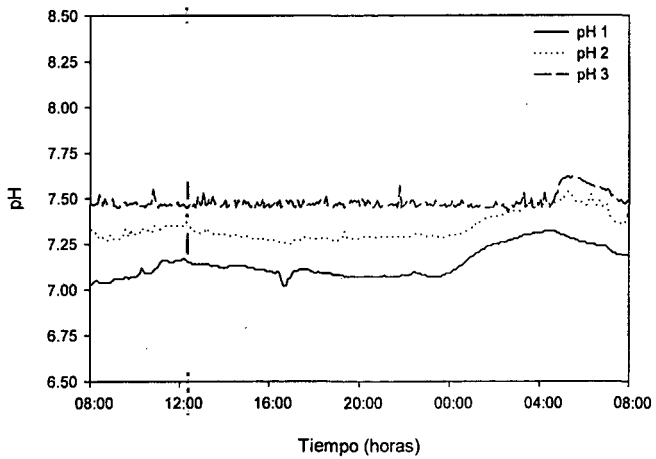
- Se disponen datos de nitrato, nitrito y amonio de todo el periodo experimental.



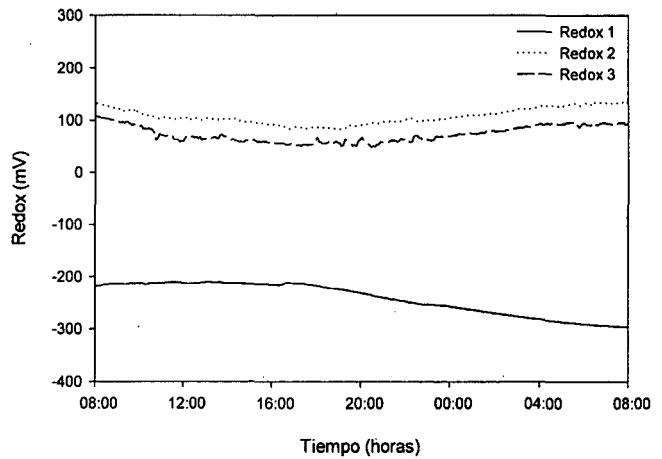
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



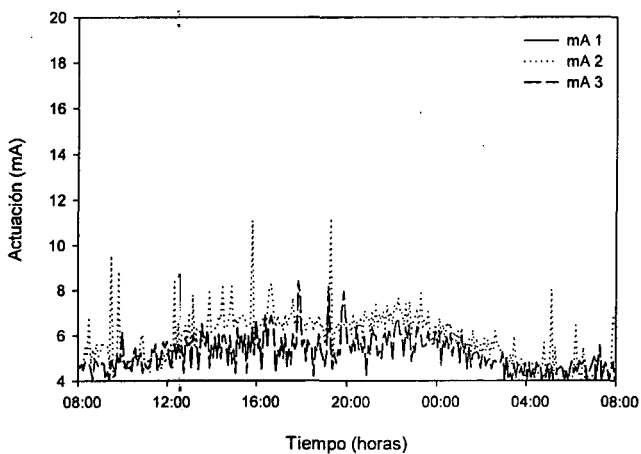
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



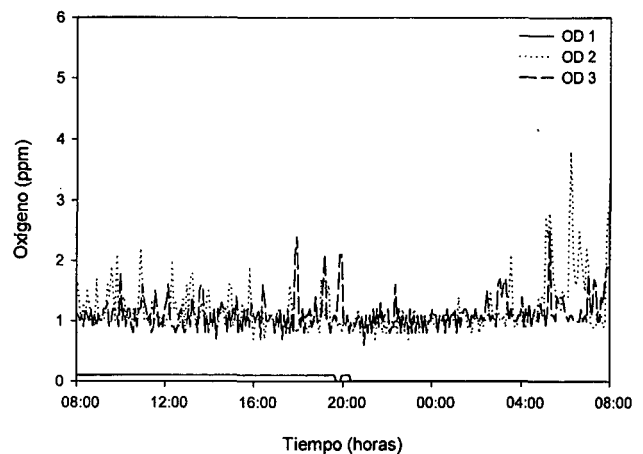
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

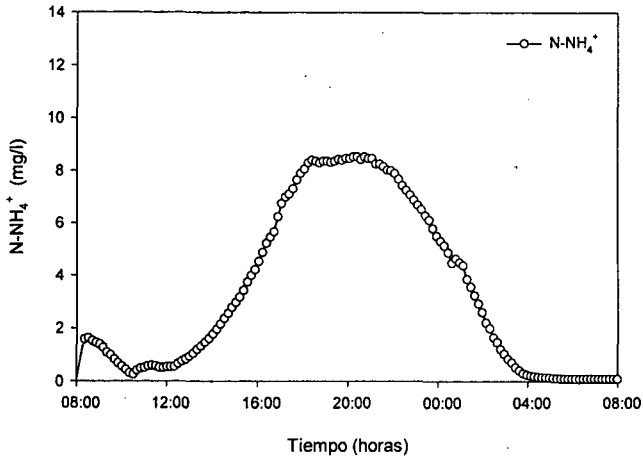


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

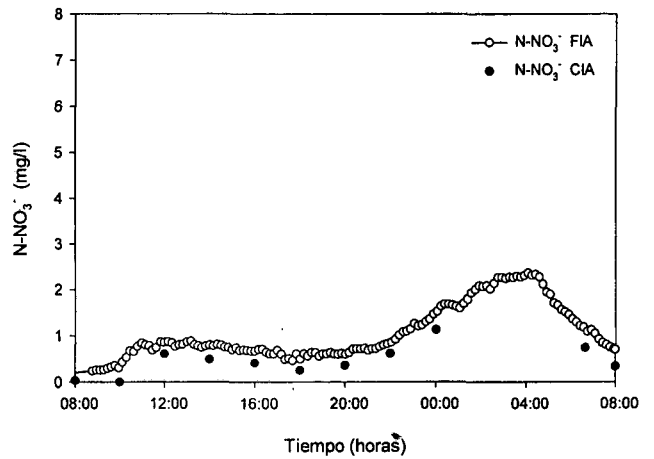


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

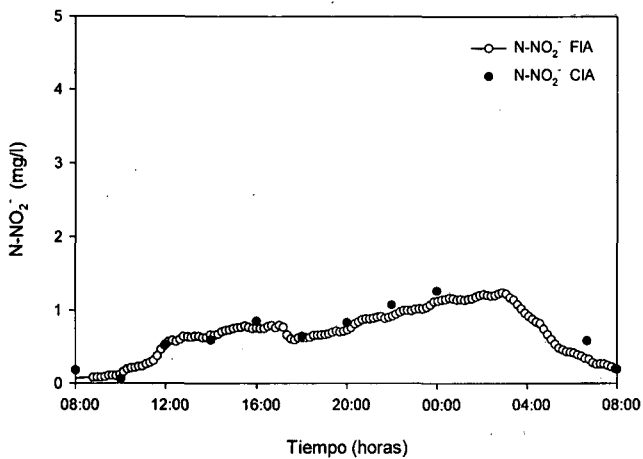
Fig. 5.31. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 11



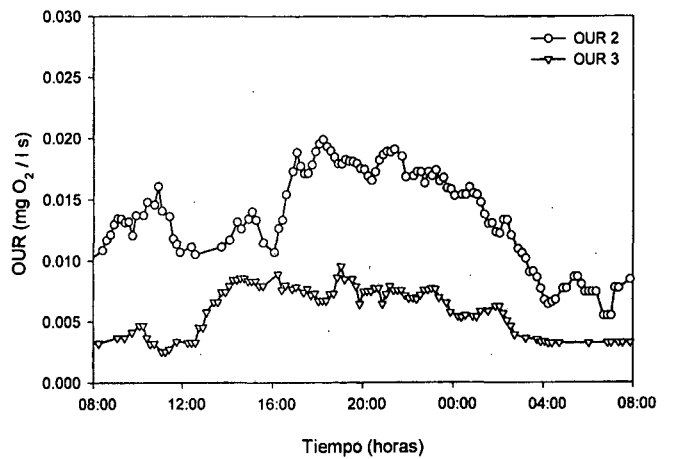
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



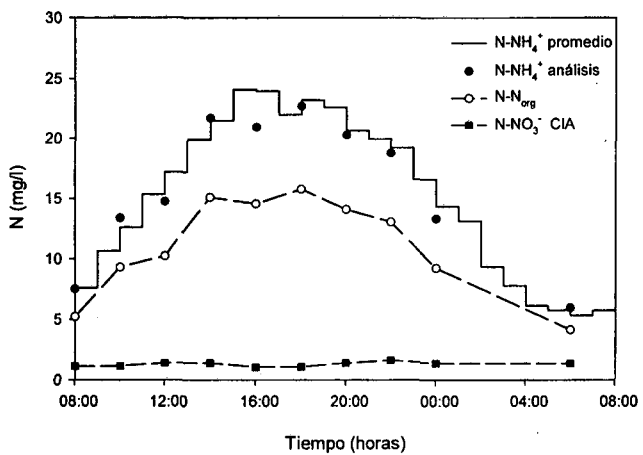
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



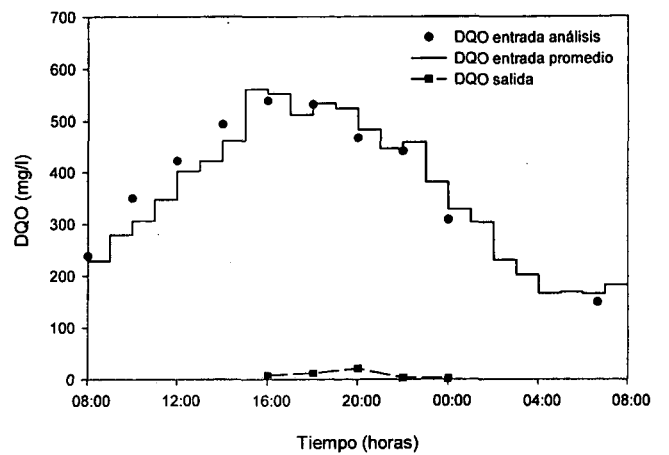
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

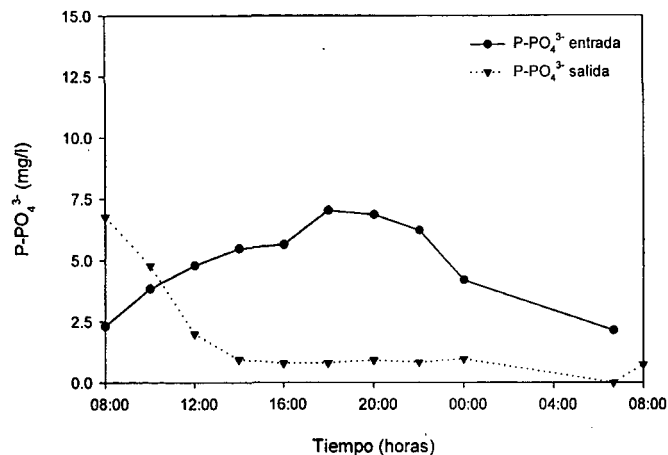


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.31. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 11



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.31. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 11

Resultados

En la tabla 5.30 se muestran los resultados del experimento 11: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.599
N-NO ₃ ⁻	0.394
N-NO ₂ ⁻	0.284
N total	2.277

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.74
% eliminación de N	82.5
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	70.2
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	17.3
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	12.5
mg N eliminado / g SSV d	21.5
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	3.20
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.79
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.57

Tabla 5.30. Resultados experimento 11

Comentarios

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene con valores de 20 a 22 °C.
pH. El control funciona correctamente en el reactor 3, por lo que se mantiene en valores cercanos al consignado. Como en el experimento anterior, con una ligera desviación durante las últimas horas. En el reactor 2 se mantiene entre 7.25 y 7.50, mientras que en el primero varía entre 7.00 y 7.25.

Redox. En el reactor 2 se mantiene entre valores de 100 y 150 mV. En el tercero se miden valores inferiores, entre 50 y 100 mV, provocados posiblemente por la menor presencia de oxígeno

en el medio respecto al experimento anterior. En el reactor anóxico aparecen valores entre -200 y -300 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3, a excepción de las pequeñas oscilaciones provocadas por la falta de linealidad de las válvulas de aireación en la zona de trabajo.

Aireación. Se observa un consumo muy reducido de aire en los dos reactores. Este bajo consumo es provocado por el bajo punto de consigna de oxígeno en los reactores aeróbicos. Conviene considerar que el caudal de aireación no es linealmente proporcional a la abertura de la válvula, por lo que el caudal de aire introducido no es tan reducido como el gráfico de actuación puede hacer suponer.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 8.5 mg/l sobre las 20:30 horas.

NO₃⁻ salida. Los valores máximos son bastante reducidos. El máximo es de 2.4 mg/l a las 4:00 horas. Se puede comprobar que la baja consigna de oxígeno favorece a la desnitrificación. Las medidas del analizador CIA ofrecen la misma tendencia que las obtenidas "on-line" con el FIA.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.2 mg/l) se presenta sobre las 3:00 horas. Son valores bastante inferiores a los de anteriores experimentos. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores muy similares a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo normales en ambos reactores. El consumo máximo aparece sobre las 17:00 horas en el reactor 2, con 0.020 mg O₂ / l s, aunque valores similares aparecen en diferentes periodos.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan bien a los valores de entrada previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada de nitrato se mantiene prácticamente constante.

Entrada DQO. Valores ajustados a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7.5 mg/l, valores correctos.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene estable e inferior a 1 mg/l, excepto las primeras muestras. En ellas se observa el efecto de la agitación anterior del sedimentador, con el consiguiente desprendimiento del fosfato adherido a los flóculos del sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es normal - elevada, del 82.5 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa, la eliminación es de 21.5 mg N / g SSV d. En estas condiciones se favorece mucho la desnitrificación, mientras la nitrificación no se encuentra beneficiada. Los resultados globales son buenos en cuanto a eliminación de nitrógeno.

EXPERIMENTO 12

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones de los experimentos 2, 3, 8 y 9 para comprobar la reproducibilidad de la respuesta de la planta ante una misma perturbación en la entrada. Permite disponer de una referencia actualizada para los experimentos posteriores.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.31 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 2
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:30 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	6550
1	6450
2	6460
3	6350
Total sistema	598.2 gramos
DSVI	200 ml

Tabla 5.31. Condiciones experimento 12

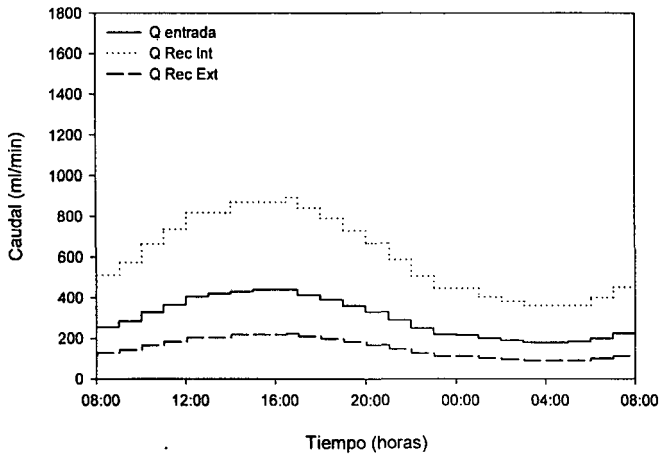
Incidencias de operación

Planta piloto

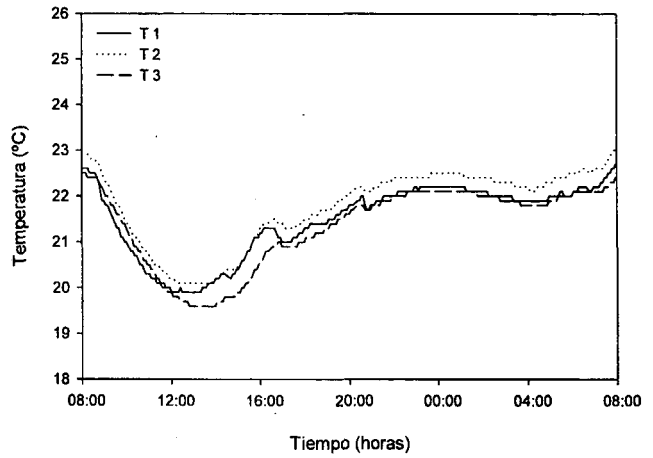
- Parada por alarma de nivel en el reactor 1 de 8:48 a 8:50.
- Parada por escape de agua de 12:07 a 12:08.
- Parada por alarma de nivel en el reactor 1 de 14:26 a 14:28.
- Parada por alarma de nivel en el reactor 1 de 6:40 a 6:42.
- A las 7:15 horas se produce un fallo del compresor general, por lo que la planta no puede funcionar. La parada afecta a las bombas neumáticas de trasvase de líquido entre reactores y al sistema de aireación. Puede observarse que el control de oxígeno actúa con una señal de salida máxima, pero la concentración de oxígeno de los reactores aeróbicos disminuye hasta 0 mg/l.
- El control de oxígeno mantiene el valor de consigna de 3 mg/l, aunque presenta un comportamiento muy oscilante, provocado principalmente por el bajo consumo. En el reactor 1 aparece un pequeño pico de oxígeno sobre las 20:00 horas, provocado por un cambio de consigna erróneo, pero de corta duración, desde el sistema experto.
- El control de pH ha funcionado correctamente, excepto algunas perturbaciones provocadas por la medida del tercer reactor.

Analizadores

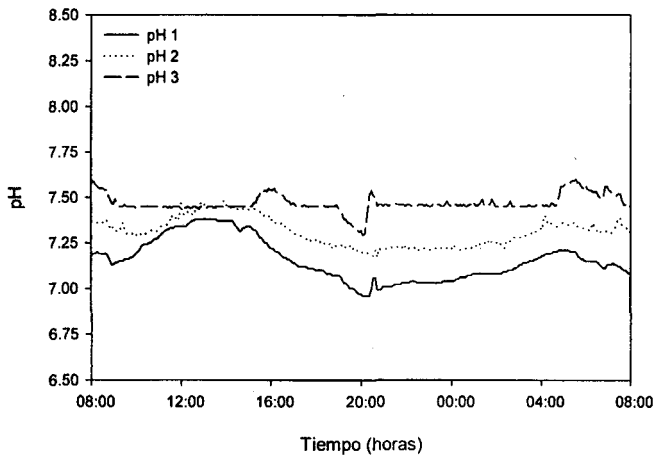
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 8:00 a 8:45 horas y de 6:30 a 8:00 por recalibración de los analizadores.



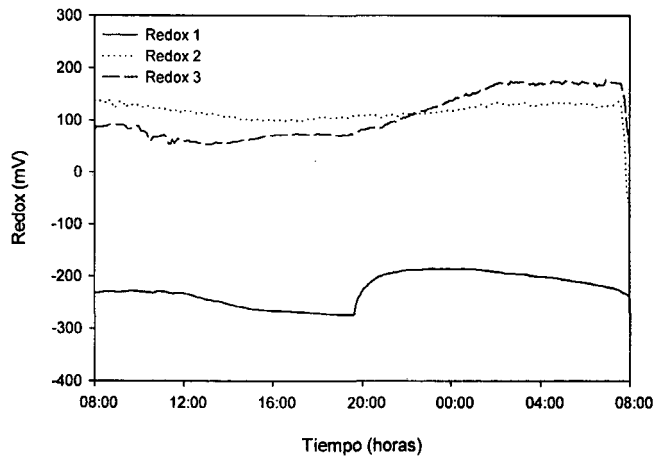
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



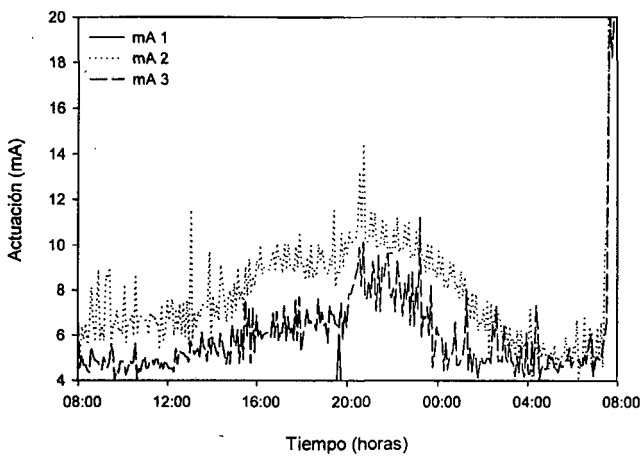
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



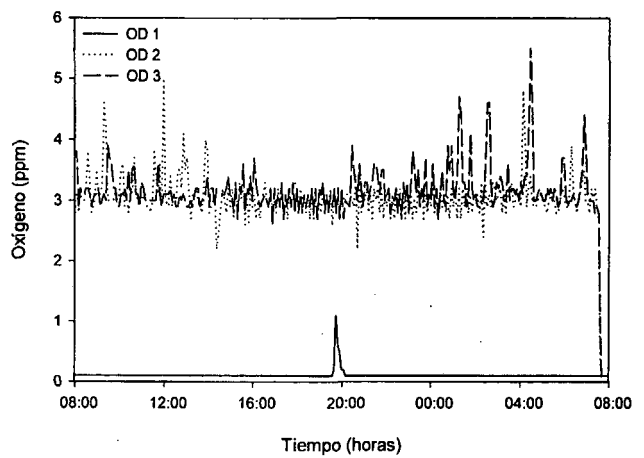
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

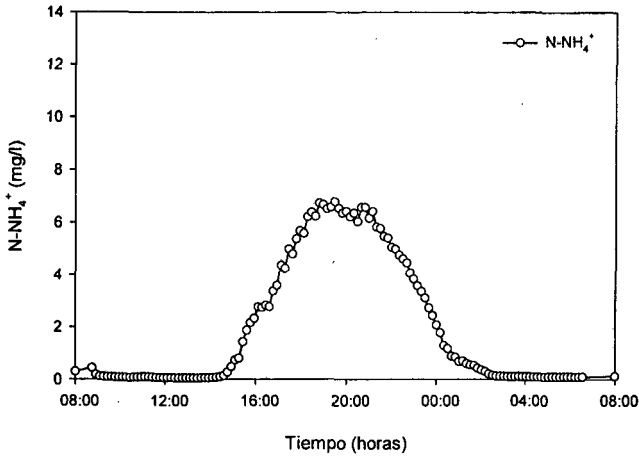


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

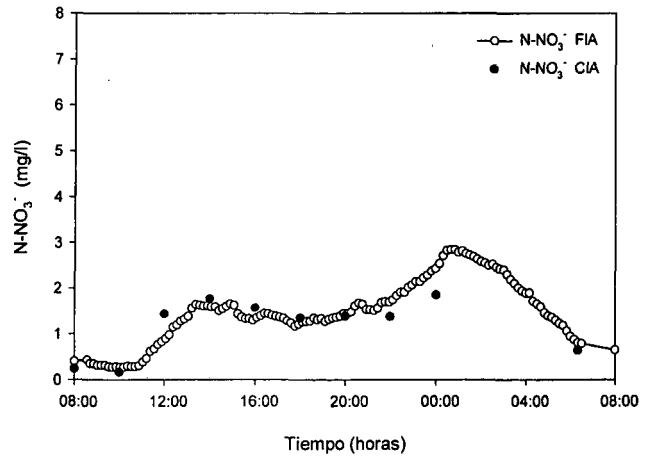


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

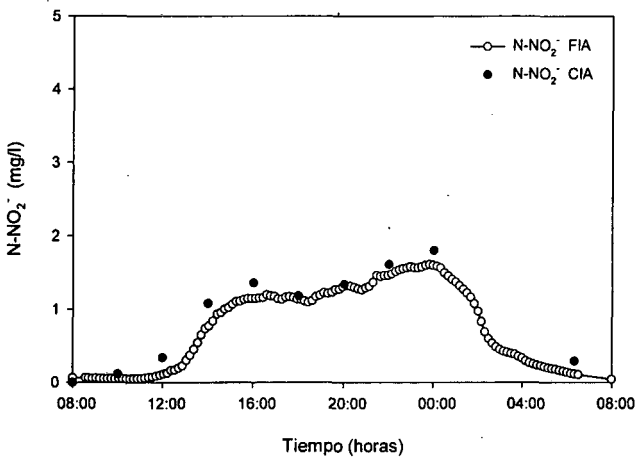
Fig. 5.32. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 12



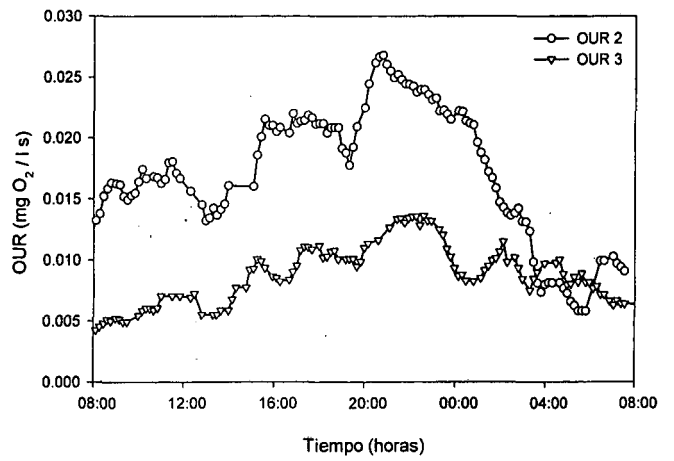
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



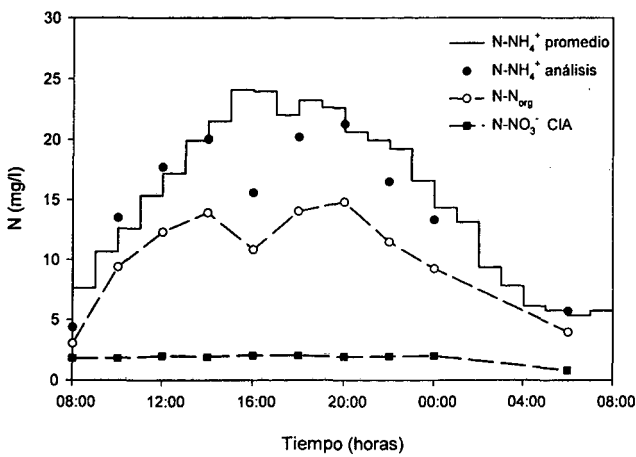
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



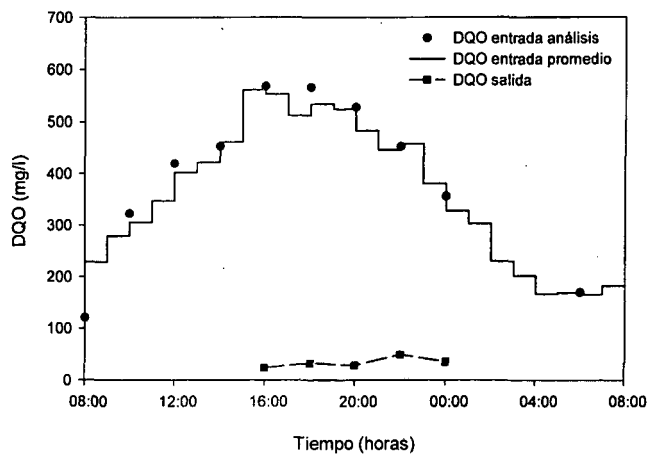
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

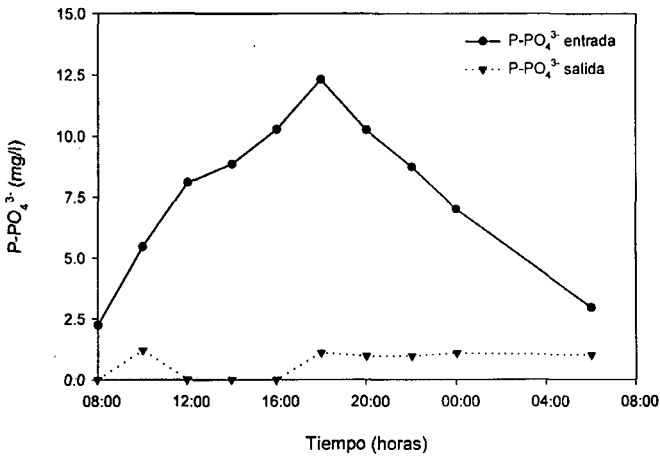


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.32. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 12



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.32. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 12

Resultados

En la tabla 5.32 se muestran los resultados del experimento 12: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.907
N-NO ₃ ⁻	0.594
N-NO ₂ ⁻	0.334
N total	1.835

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.188
% eliminación de N	85.9
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	49.4
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	32.4
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	18.2
mg N eliminado / g SSV d	18.70
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.52
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.99
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.56

Tabla 5.32. Resultados experimento 12

Comentarios

Variables "in-line"

Temperatura. Se mantiene con valores de 20 a 23 °C. pH. El control en el reactor 3 presenta algunas variaciones, aunque se consigue mantener unos valores cercanos a la consigna. En los reactores 1

y 2 se produce una cierta variabilidad, aunque siempre con rangos no demasiado amplios. En el reactor 2 se mantiene entre 7.25 y 7.50. En el 1, los valores varían entre 7.00 y 7.40.

Redox. En el reactor 1 varía entre -200 y -300 mV. Puede observarse la perturbación en esta medida que supone la introducción de aire durante un corto periodo de tiempo. En el 2 se mantiene entre 100 y 150 mV, a excepción del último periodo en el que no hay aireación. En el 3 se aprecia una mayor variabilidad, con valores entre 50 y 200 mV.

Oxígeno. Se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3, aunque se presentan oscilaciones provocadas por la falta de linealidad de las válvulas de aireación en la zona de bajo consumo.

Aireación. Se observa un consumo no demasiado elevado en los dos reactores.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 6.8 mg/l sobre las 19:30 horas.

NO₃⁻ salida. Se observan valores normales. El máximo es de 2.8 mg/l a las 00:30 horas. Las medidas del analizador CIA son muy similares a las obtenidas "on-line" con el FIA.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.6 mg/l). se presentan sobre las 00:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores muy similares a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo algo elevados en ambos reactores. El consumo máximo aparece sobre las 20:30 horas en el reactor 2, con 0.027 mg O₂ / l s.

Entrada NH₄⁺. Los análisis "off-line" se ajustan bien a los valores de entrada previstos, excepto algún valor ligeramente bajo.

Entrada NO₃⁻. La entrada de nitrato se mantiene prácticamente constante.

Entrada DQO. Valores ajustados a los previstos.

Salida DQO. Eliminación casi total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 12 mg/l, con algunos valores más altos de lo esperado.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene estable e inferior a 1 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es elevada, del 85.9 %. Considerando eliminación por unidad de biomasa, la eliminación es de 18.70 mg N / g SSV d, por lo cual el rendimiento de eliminación es normal en estas condiciones. La elevada concentración de microorganismos (casi 600 gramos en total) produce el alto consumo de aire y la elevada eliminación obtenida.

EXPERIMENTO 13

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del anterior, pero se introduce la estrategia de control que varia la recirculación interna en función de la concentración de nitrato más nitrito a la salida.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.33 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (11:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	6930
1	7090
2	7140
3	6960
Total sistema	655.7 gramos
DSVI	200 ml

Tabla 5.33. Condiciones experimento 13

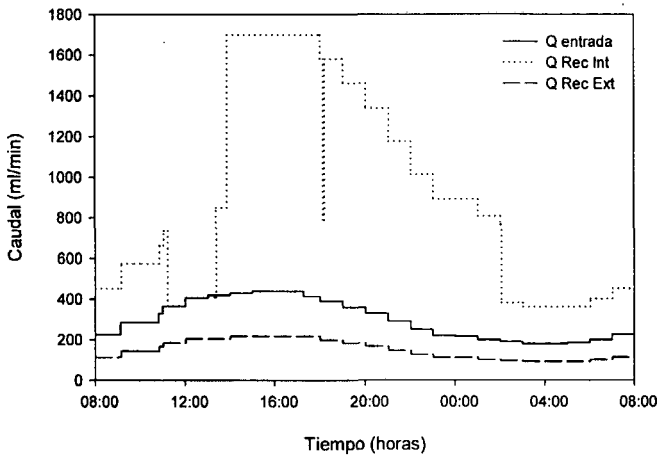
Incidencias de operación

Planta piloto

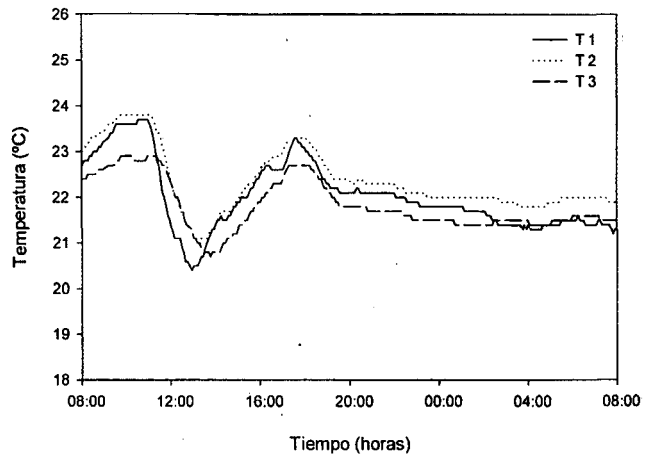
- Debido al fallo del compresor general a las 7:15 horas, no es posible el inicio del experimento hasta las 10:48 horas. Ya que durante este periodo la salida de nitrógeno de la planta es casi despreciable, se pueden realizar los cálculos de eliminación considerando el periodo de 24 horas. Se observa que durante este periodo el control de oxígeno actúa con una señal de salida máxima, pero la concentración de oxígeno de los reactores aeróbicos disminuye hasta 0 mg/l, excepto un corto periodo en que se recupera el aire de red. También se modifican los valores de pH y redox.
- Parada por escape de agua de 12:04 a 12:05.
- Parada por escape de agua de 12:47 a 12:53.
- Parada por alarma de nivel en el reactor 1 de 16:55 a 17:15, provocado por un corte del aire comprimido general.
- El control de oxígeno mantiene el valor de consigna de 3 mg/l, con un comportamiento ligeramente ruidoso, excepto en los periodos de falta de aire.
- El control de pH ha funcionado correctamente en función del pH del reactor 3, pero comparando con la medida del resto de reactores, se observan ciertos problemas de medida del electrodo de pH del reactor 3.

Analizadores

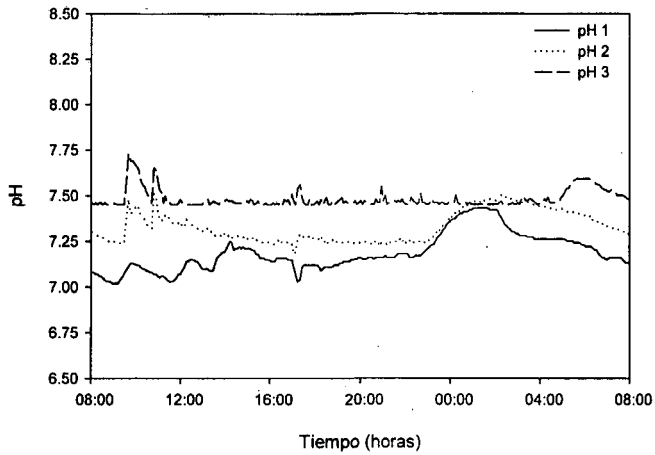
- No existen datos de los analizadores de 8:00 a 10:00 horas porque la planta se encuentra parada.
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 por recalibración de los analizadores.



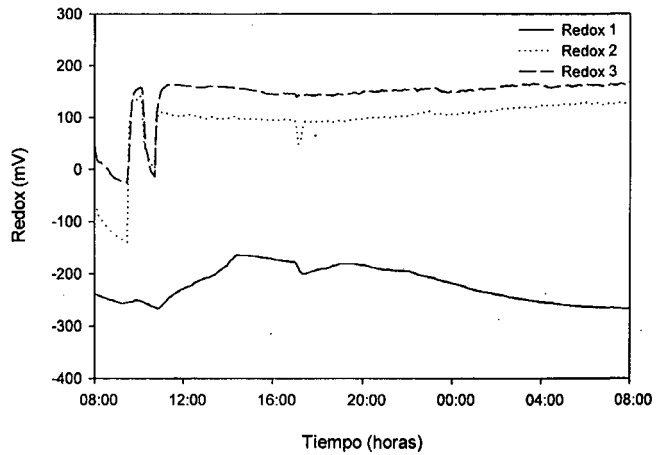
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



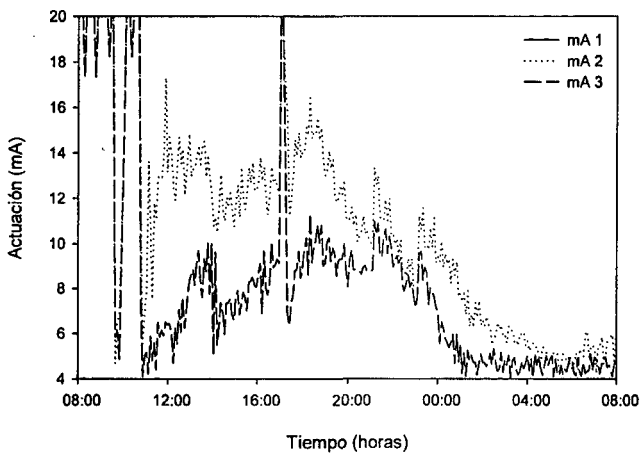
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



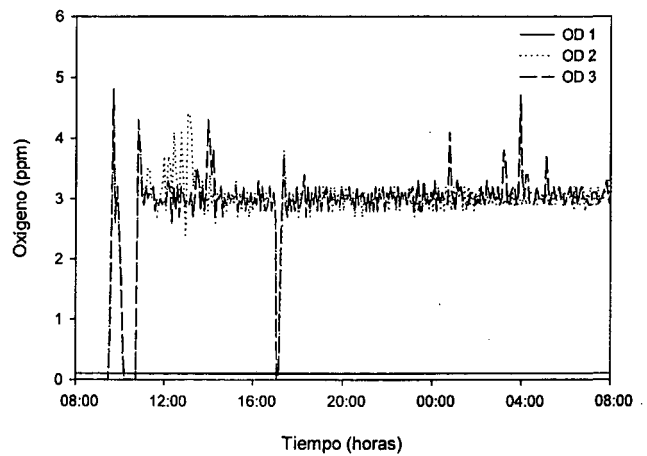
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

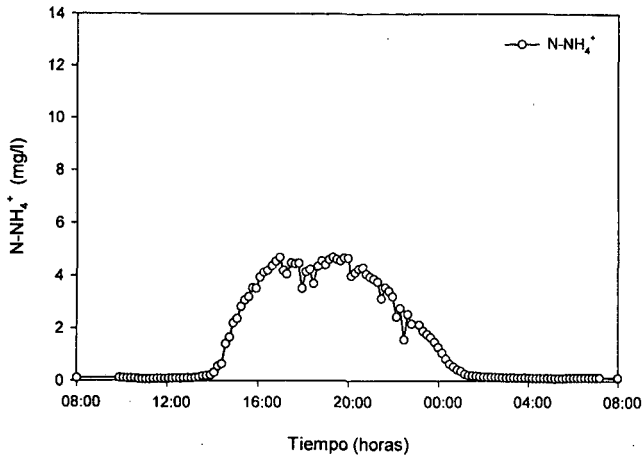


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

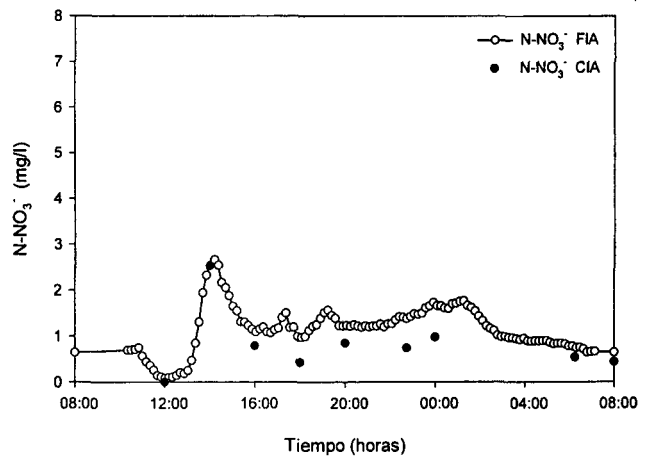


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

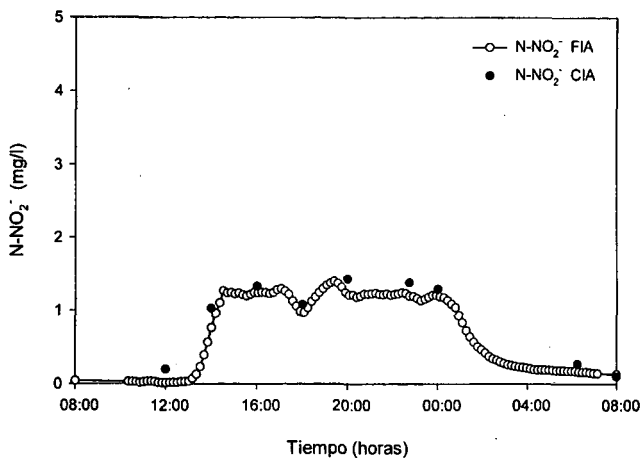
Fig. 5.33. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 13



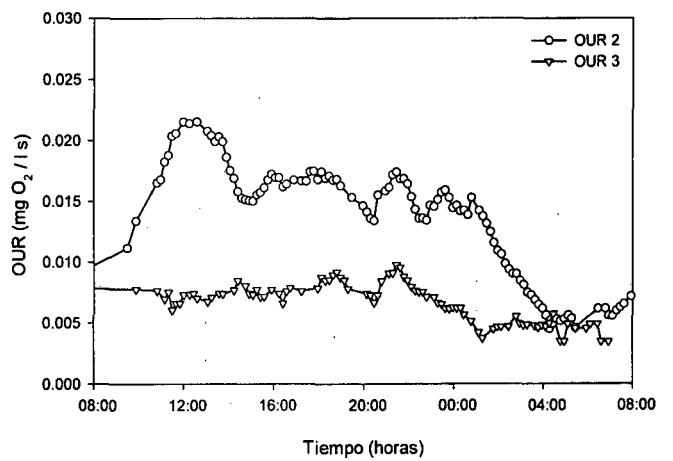
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



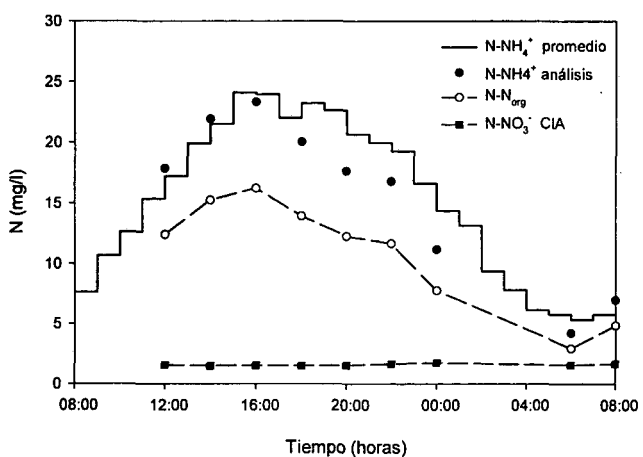
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



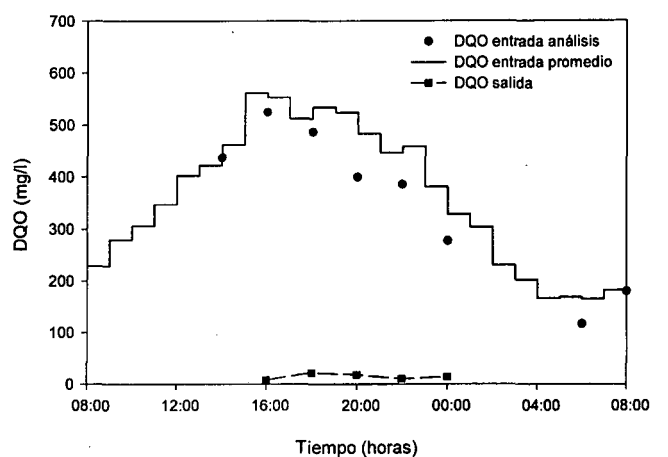
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

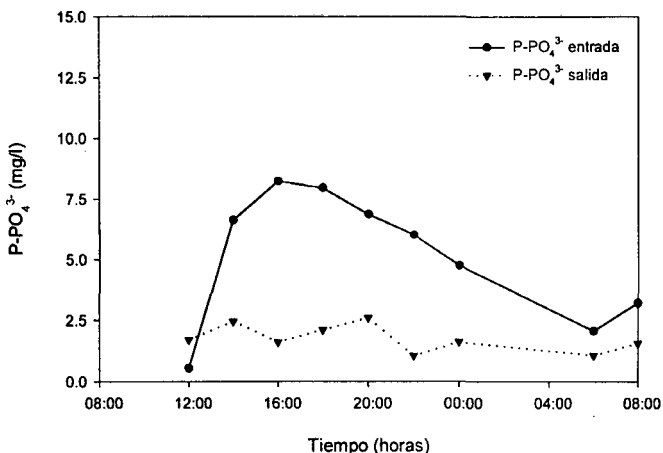


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.33. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 13



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.33. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 13

Resultados

En la tabla 5.34 se muestran los resultados del experimento 13: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.762
N-NO ₃ ⁻	0.479
N-NO ₂ ⁻	0.303
N total	1.544

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.478
% eliminación de N	88.1
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	49.3
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	31.1
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	19.6
mg N eliminado / g SSV d	17.51
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.16
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.73
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.46

Tabla 5.34. Resultados experimento 13

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La recirculación externa se mantiene correctamente en el valor de relación de recirculación definido. Para la interna, esta relación varía en función del valor de N-NO_x en la salida. Se pueden apreciar periodos en que esta relación tiene un valor de 1, 2 y 4.

Temperatura. Es ligeramente oscilante al inicio del experimento, aunque siempre se mantiene en valores de 20 a 24 °C.

pH. El control en el reactor presenta ligeras variaciones, aunque se mantiene en valores cercanos a la consigna. En el reactor 2 se mantiene entre 7.25 y 7.50. En el reactor 1, los valores oscilan 7.00 y 7.40.

Redox. En el reactor 1 varía entre -150 y -300 mV. En los reactores 2 y 3 se observan valores muy bajos cuando no funciona el compresor al inicio del experimento. Exceptuando estos valores, el redox del reactor 2 se mueve alrededor de 100 mV. En el reactor 3 los valores varían alrededor de 150 mV.

Oxígeno. Con excepción del periodo inicial sin aireación, se mantiene en los valores consignados en los reactores 2 y 3. Aparece el ruido ya presente en otros experimentos, provocado por el procedimiento de estimación de OUR.

Aireación. Se observa un consumo normal en los dos reactores.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 4.7 mg/l sobre las 17:00 horas.

NO₃⁻ salida. Se observan una reducción en estos valores. El máximo es de 2.7 mg/l a las 14:00 horas, aunque estos valores sólo se producen durante un corto periodo de tiempo. Las medidas del analizador CIA tienen una tendencia similar, aunque se encuentran algo desplazadas.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.4 mg/l) se presentan sobre las 19:30 horas, pero la concentración de salida permanece bastante estable entre 14:00 y 2:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores muy similares a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo no muy elevados. El consumo máximo aparece sobre las 12:00 horas en el reactor 2, con 0.022 mg O₂ / l s, aunque estos valores tienen una duración muy reducida.

Entrada NH₄⁺. Algunos análisis se encuentran un poco desplazados de los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada permanece constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores ligeramente inferiores a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es casi total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 1 y 8 mg/l, valores cercanos a los esperados.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene alrededor de 2 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es muy elevada, del 88.1 %. Por unidad de biomasa, la eliminación es de 17.51 mg N / g SSV d, por lo cual el rendimiento de eliminación es normal en estas condiciones. La concentración de microorganismos es muy elevada, de aquí los buenos resultados.

EXPERIMENTO 14**Objetivos**

En este experimento se repiten las condiciones del anterior, para comprobar la reproducibilidad de la respuesta.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.35 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
<i>Reactor</i>	<i>Estado</i>	<i>Consigna OD</i>
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (09:00 horas)	
<i>Reactor</i>	<i>SSV (mg/l)</i>
0	5970
1	5750
2	5660
3	5610
Total sistema	530.3 gramos
DSVI	200 ml

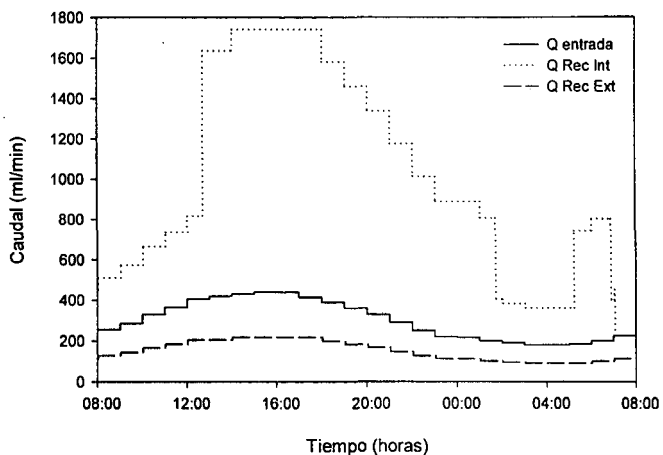
Tabla 5.35. Condiciones experimento 14

Incidencias de operación*Planta piloto*

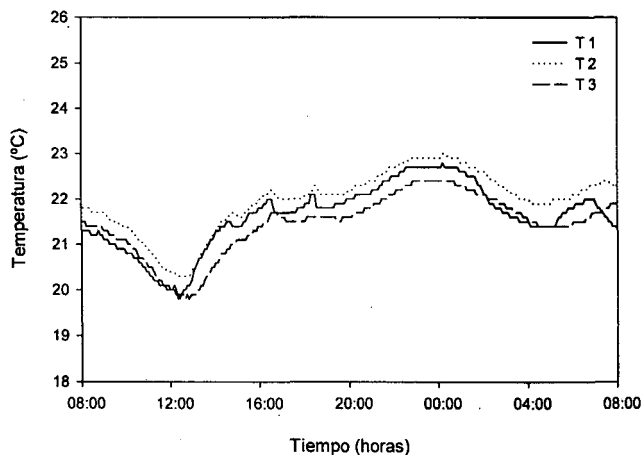
- Parada por alarma de nivel en el reactor 2 de 12:49 a 12:52.
- El control de pH funciona correctamente, excepto ligeras oscilaciones.

Analizadores

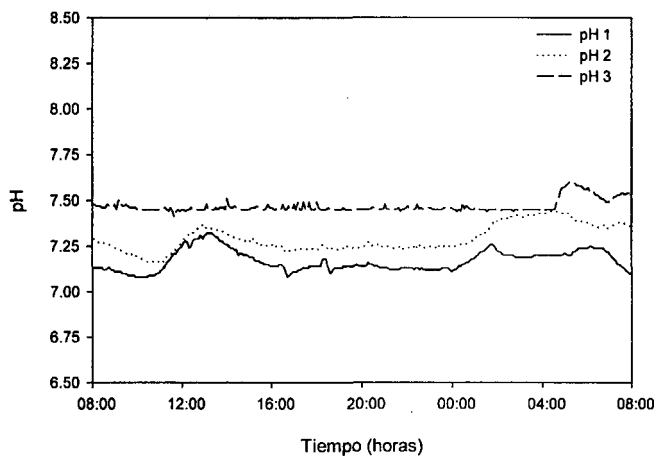
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 8:00 a 9:00 por recalibración de los analizadores.



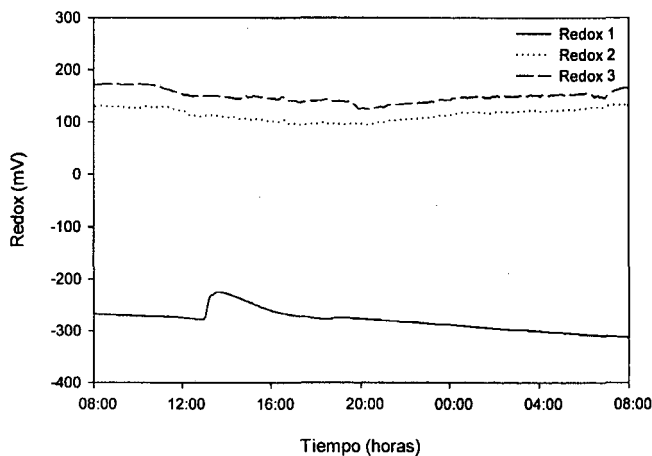
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



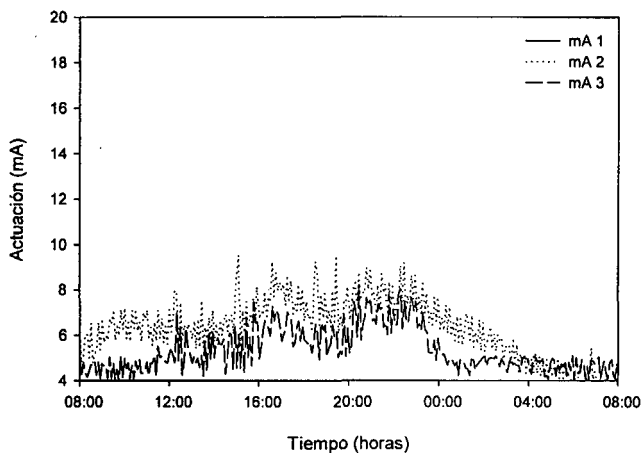
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



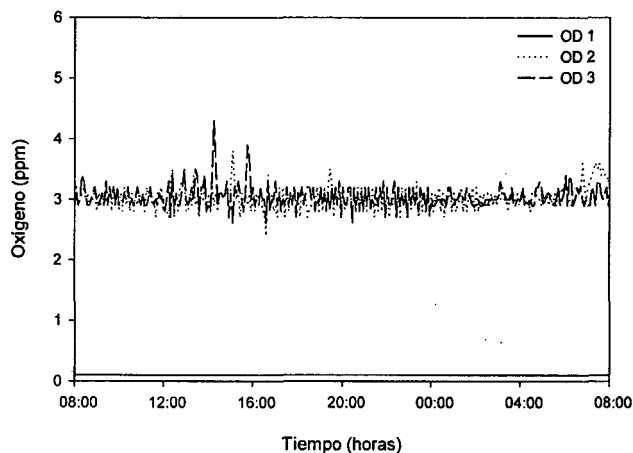
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

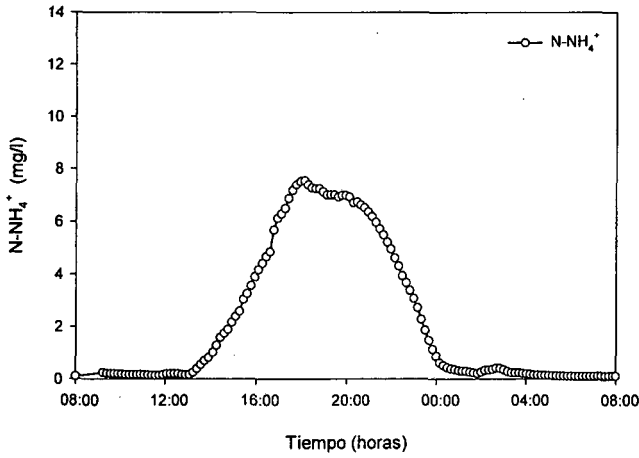


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

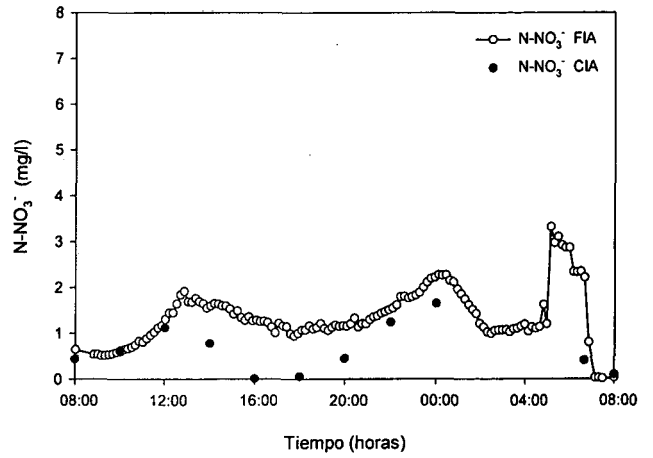


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

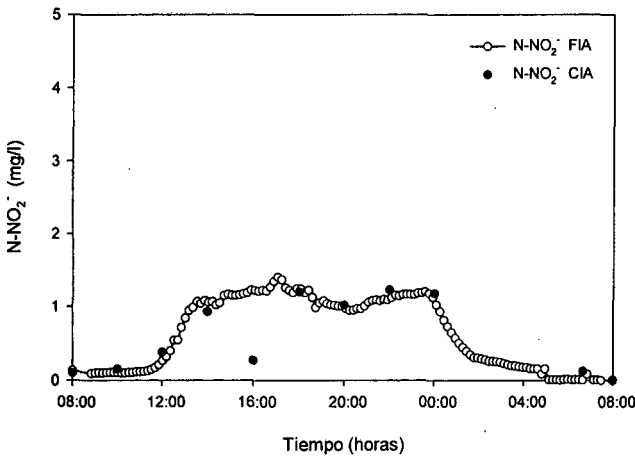
Fig. 5.34. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 14



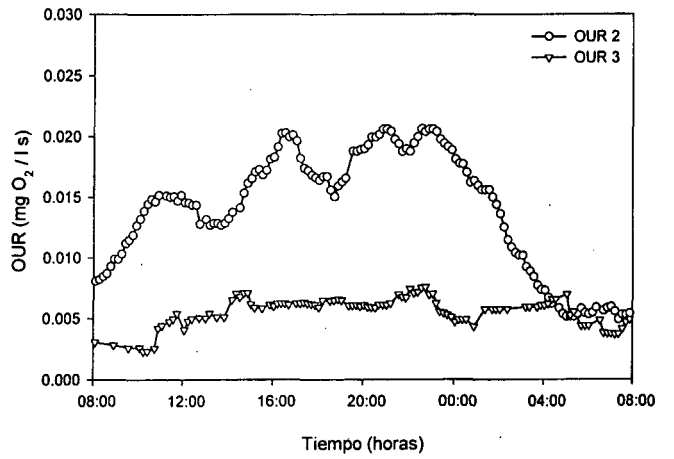
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



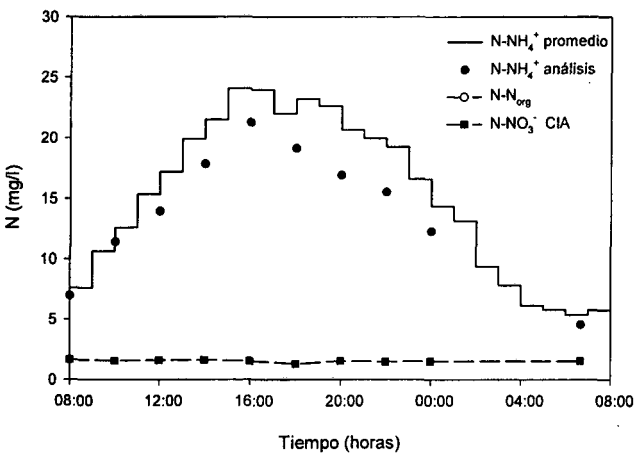
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



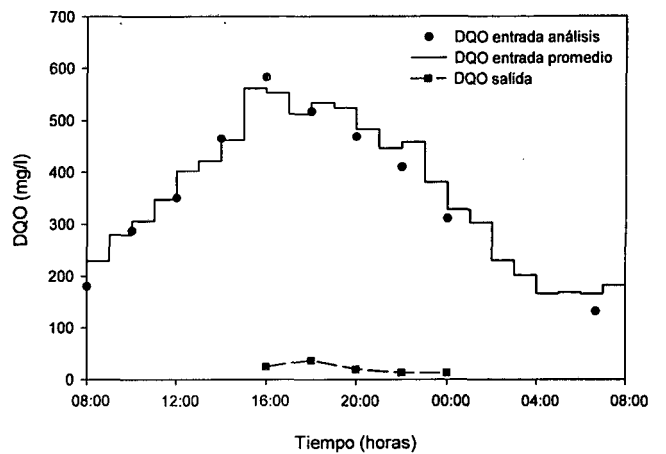
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

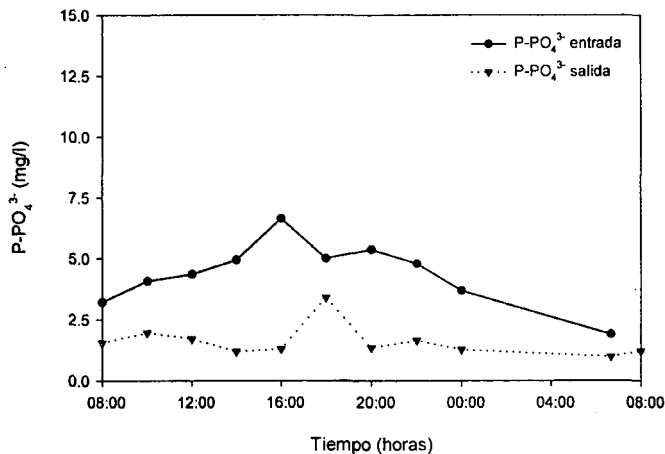


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.34. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 14



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.34. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 14

Resultados

En la tabla 5.36 se muestran los resultados del experimento 14: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.115
N-NO ₃ ⁻	0.564
N-NO ₂ ⁻	0.312
N total	1.991

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.031
% eliminación de N	84.7
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	56.0
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	28.3
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	15.7
mg N eliminado / g SSV d	20.80
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.10
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.06
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.59

Tabla 5.36. Resultados experimento 14

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La recirculación externa se mantiene correctamente en el valor de relación de recirculación definido. La interna varía en función del valor de N-NO_x en la salida. Se pueden apreciar periodos en que esta relación tiene un valor de 1, 2 y 4. La relación utilizada mayoritariamente es 4.

Temperatura. Se mantiene en valores de 20 a 23 °C.
pH. El control en el reactor presenta ligeras variaciones, aunque se consigue mantener unos

valores cercanos a la consigna. En el reactor 2 se mantiene alrededor de 7.25. En el reactor 1, los valores oscilan entre 7.00 y 7.30.

Redox. En el reactor 1 varía entre -200 y -300 mV.

En los reactores 2 y 3 se observan valores entre 100 y 200 mV, aunque ligeramente superiores en el tercer reactor.

Oxígeno. Se mantienen correctamente los valores consignados en los reactores 2 y 3. Aparece el ruido ya presente en otros experimentos, provocado por el procedimiento de estimación de OUR.

Aireación. Se observa un consumo de aire muy inferior a lo normal en los dos reactores.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 7.5 mg/l sobre las 18:00 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es de 3.3 mg/l a las 5:00 horas, aunque estos valores sólo se producen durante un corto periodo de tiempo. Estos valores podrían ser incorrectos, ya que se produce un aumento de más de 2 mg/l entre dos medidas consecutivas. Pueden estar relacionados con pérdida de biomasa por el sedimentador. Las medidas del analizador CIA tienen una tendencia similar, aunque se encuentran bastante desplazadas.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.4 mg/l) se presentan sobre las 17:00 horas, aunque la concentración de salida permanece bastante estable con valores similares entre 14:00 y 24:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen en general valores muy parecidos a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo normales. El consumo máximo aparece en varios periodos desde las 16:00 a las 23:00 horas en el reactor 2, con 0.020 mg O₂ / l s. En el reactor 3 se detectan valores bajos y constantes durante casi todo el experimento.

Entrada NH₄⁺. Los resultados son un poco inferiores a los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada permanece constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores cercanos a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 7 mg/l, valores similares a los esperados.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene alrededor de 2 mg/l, excepto un punto ligeramente elevado, producido por una pérdida puntual de biomasa por la salida.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es elevada, del 84.7 %. Por unidad de biomasa, la eliminación es de 20.80 mg N / g SSV d, por lo cual el rendimiento de eliminación es normal en estas condiciones con un nivel de biomasa medio.

EXPERIMENTO 15**Objetivos**

Para este experimento se repiten las condiciones de los experimentos 13 y 14. Permite disponer de una referencia actualizada de la dinámica del sistema para los experimentos posteriores.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.37 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
<i>Reactor</i>	<i>Estado</i>	<i>Consigna OD</i>
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:30 horas)	
<i>Reactor</i>	<i>SSV (mg/l)</i>
0	5710
1	5490
2	5450
3	5400
Total sistema	508.9 gramos
DSVI	190 ml

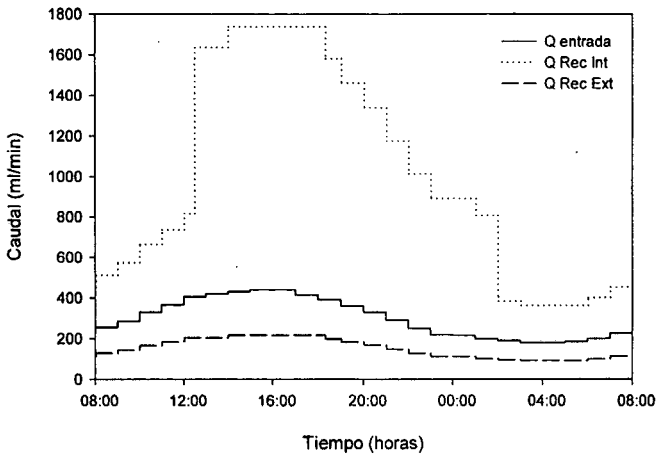
Tabla 5.37. Condiciones experimento 15

Incidencias de operación*Planta piloto*

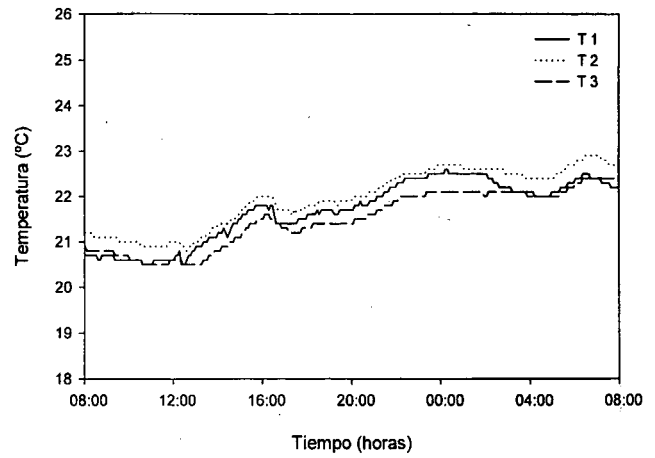
- No se produce ninguna parada.
- El control de pH funciona correctamente. Sólo aparece un pequeño problema sobre las 16:00 horas, provocado por el vaciado del depósito de bicarbonato. Al no ser posible el aporte, el pH baja más de 0.3 unidades en unas 3 horas. El resto de reactores también se ve ligeramente afectado, disminuyendo ligeramente el pH.

Analizadores

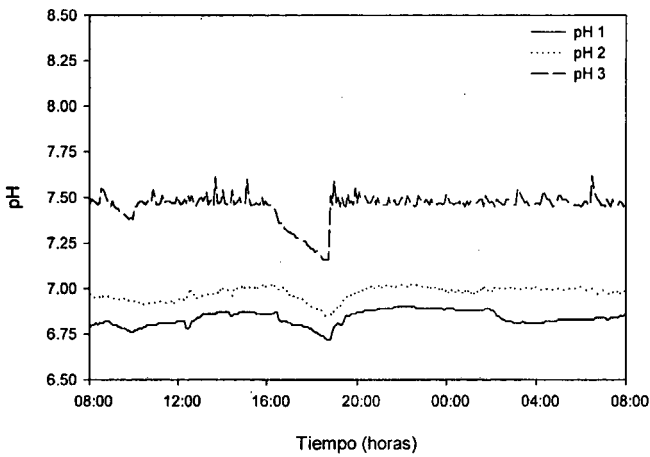
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:00 a 8:00 por recalibración de los analizadores.



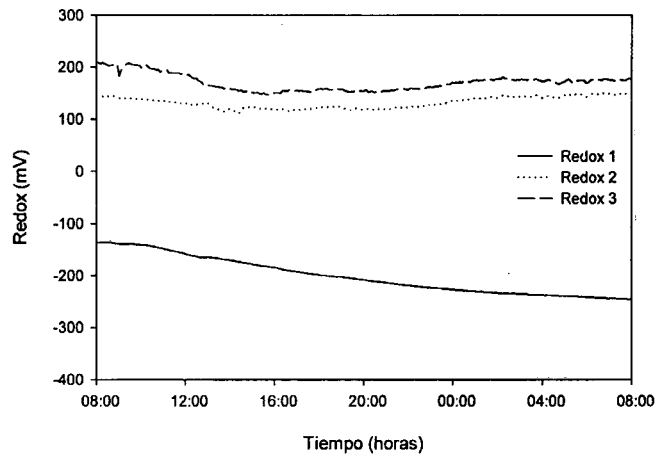
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



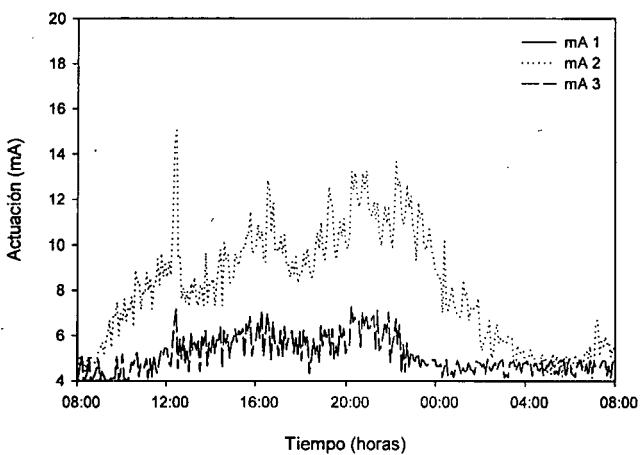
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



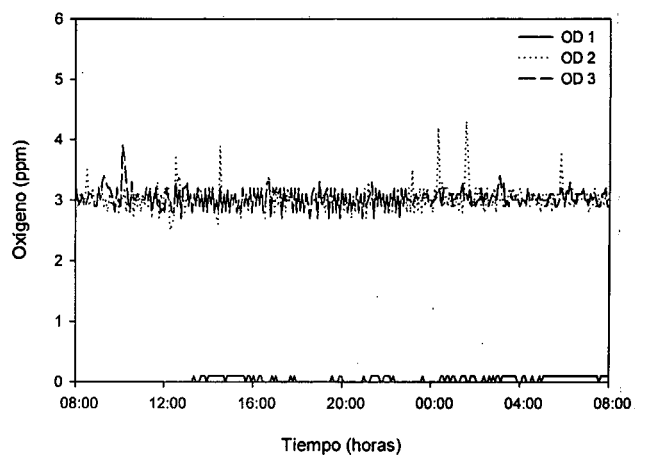
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

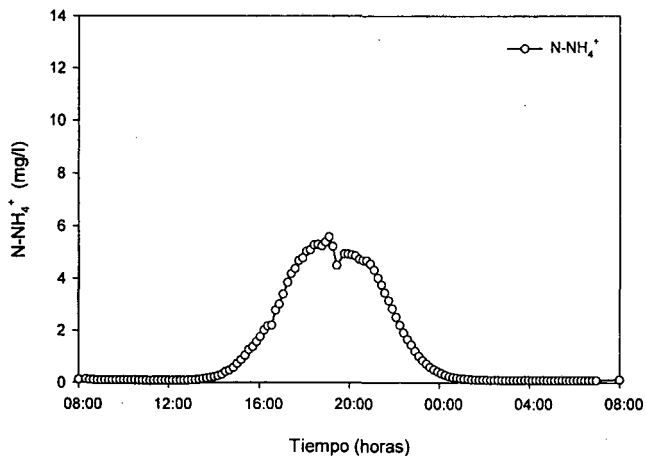


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

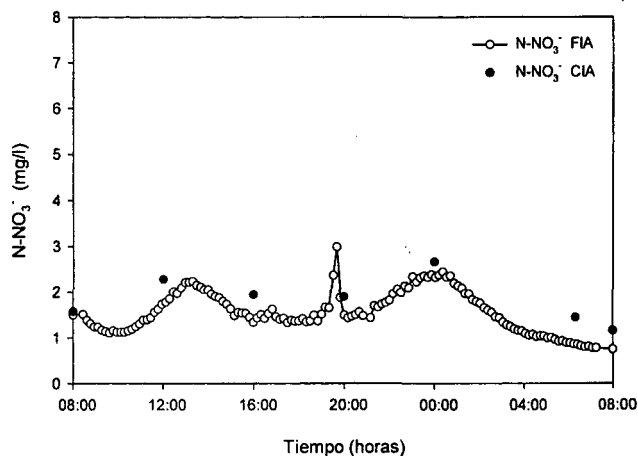


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

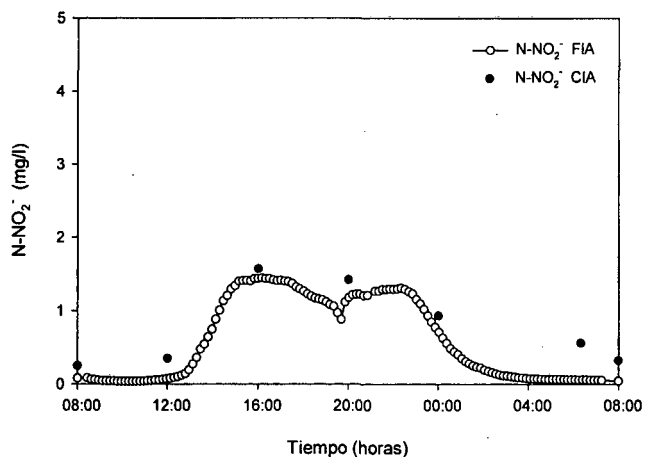
Fig. 5.35. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 15



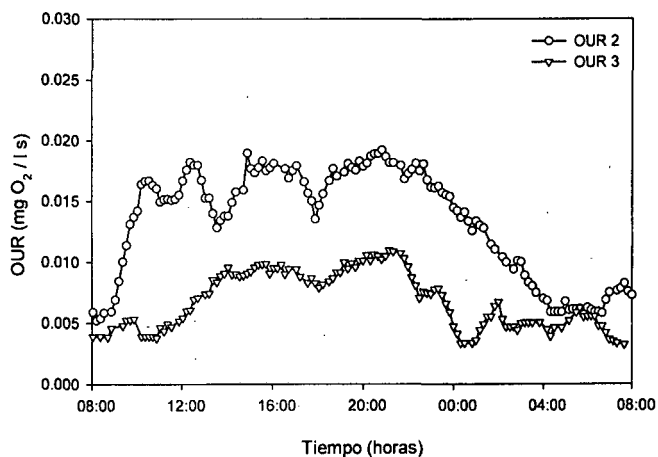
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



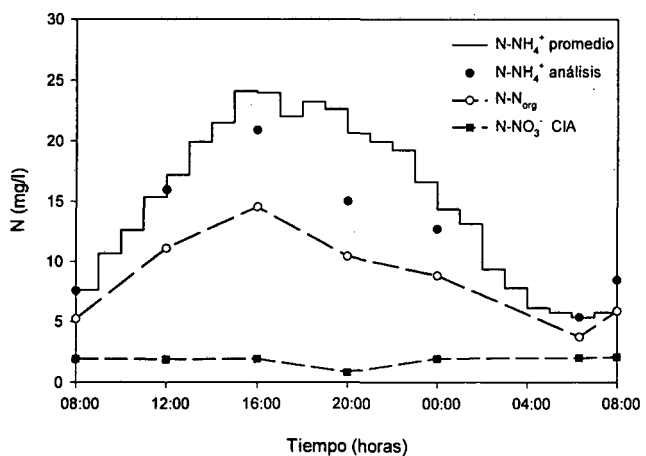
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



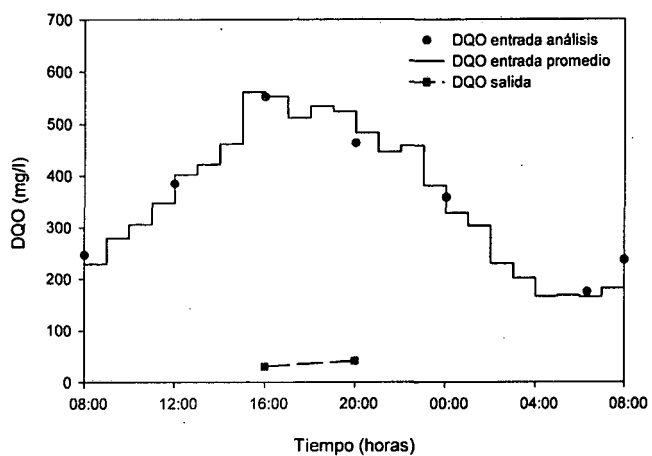
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

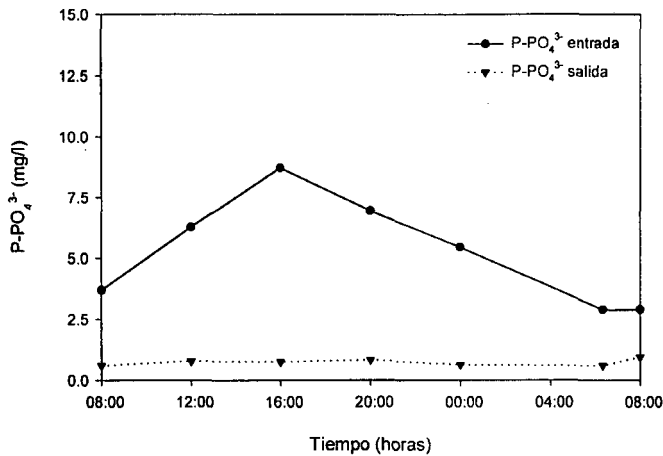


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.35. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 15



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.35. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 15

Resultados

En la tabla 5.38 se muestran los resultados del experimento 15: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.652
N-NO ₃ ⁻	0.681
N-NO ₂ ⁻	0.298
N total	1.631

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.391
% eliminación de N	87.5
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	40.0
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	41.8
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	18.2
mg N eliminado / g SSV d	22.38
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.28
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.34
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.59

Tabla 5.38. Resultados experimento 15

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa se mantiene correctamente en el valor definido. La recirculación interna varía en función del valor de N-NO_x en la salida. Se pueden apreciar periodos en que esta relación tiene un valor de 2 y 4. La relación utilizada mayoritariamente es 4.

Temperatura. Se mantienen valores de 20.5 a 23 °C.

pH. El control actúa correctamente excepto en el periodo comentado en incidencias. En el reactor 2 se mantiene estable alrededor de 7.00. En el primero, varía en valores cercanos a 6.75.

Redox. En el reactor 1 varía entre -150 y -250 mV. En el reactor 2 varía alrededor de 150 mV, mientras en el 3 se obtienen valores más cercanos a 200 mV.

Oxígeno. Se mantienen correctamente los valores consignados en los reactores 2 y 3. Aparece el ruido provocado por el procedimiento de estimación de OUR.

Aireación. Se observa un consumo de aire inferior a lo normal en los dos reactores.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.6 mg/l sobre las 19:00 horas. Se observa una ligera perturbación durante este periodo, provocada posiblemente por pequeñas pérdidas de biomasa del sedimentador.

NO₃⁻ salida. Exceptuando los valores producidos durante la perturbación comentada en el apartado anterior, el máximo es de 2.4 mg/l a las 00:30 horas. Las medidas del analizador CIA tienen la misma tendencia, aunque se encuentran ligeramente desplazadas.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.44 mg/l) se presentan sobre las 16:00 horas, aunque la concentración de salida permanece bastante estable con valores similares entre 14:00 y 23:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores muy parecidos a los del FIA.

OUR. Se observan valores de consumo normales. El consumo máximo aparece sobre las 20:30 horas en el reactor 2, con 0.019 mg O₂ / l s.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen algunos resultados inferiores a los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada de nitrato permanece aproximadamente constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores cercanos a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 9 mg/l, con algún valor superior a lo esperado.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene alrededor de 1 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es muy elevada, del 87.5 %. Por unidad de biomasa, la eliminación es de 22.4 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación elevado. Los resultados de estos experimentos demuestran la variabilidad del comportamiento de la planta piloto ante una misma perturbación. Estas variaciones están provocadas en mayor medida por la variabilidad de concentración de biomasa en el sistema, provocada por la no-idealidad del sedimentador.

EXPERIMENTO 16

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones del anterior, pero se incluye un aumento de la recirculación externa en determinados periodos para hacer frente al aumento de carga en la planta. Este incremento se determina en función de los valores de OUR en el reactor 2.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.39 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5 / 1

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264*
N-N _{org}	5.049*
N-NO ₃ ⁻	0.709*
N total	13.022*

*La entrada es realmente inferior por una parada de dos horas.

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5710
1	5820
2	5650
3	5700
Total sistema	532.2 gramos
DSVI	185 ml

Tabla 5.39. Condiciones experimento 16

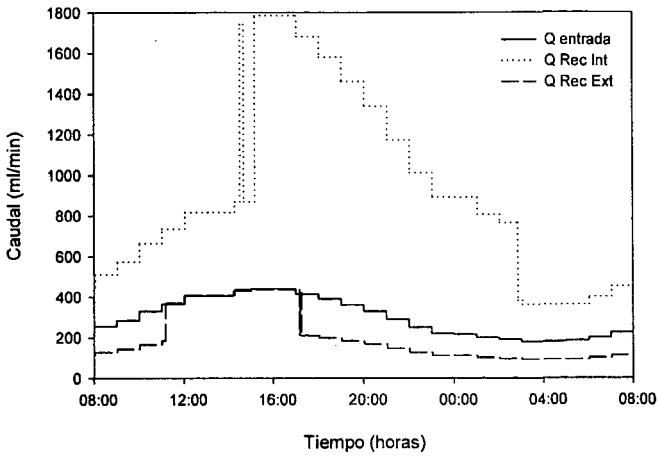
Incidencias de operación

Planta piloto

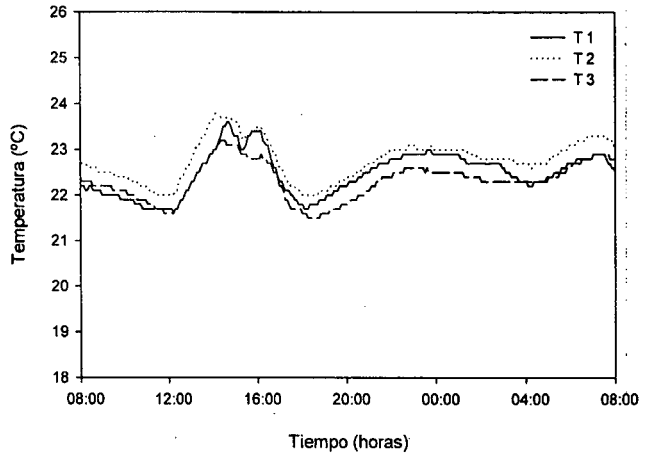
- Parada por escape de agua de 12:07 a 14:18. Esta parada, en horario de alta carga en la planta, provoca unos resultados no comparables al resto de experimentos.
- A las dos horas de la parada, el sistema experto cambia el punto de consigna del reactor 1 de 0 a 1 mg/l, para evitar la situación de falta de oxígeno de los microorganismos durante mucho tiempo. Esta situación, con 1 mg/l de oxígeno, tiene una duración de 10 minutos, pero es suficiente para producir cambios en algunas variables, como redox y pH.
- Parada por alarma de funcionamiento de las bombas de 15:20 a 15:25.
- El control de oxígeno mantiene el valor de consigna de 3 mg/l, con el comportamiento oscilante ya aparecido en los anteriores experimentos.
- El control de pH ha funcionado en general correctamente. Los cambios que se observan en los tres reactores son producidos por la parada de la planta.

Analizadores

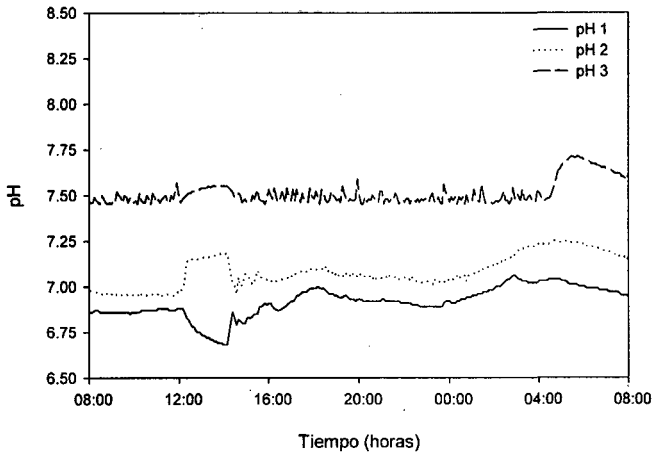
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 7:15 a 8:00 por recalibración de los analizadores.



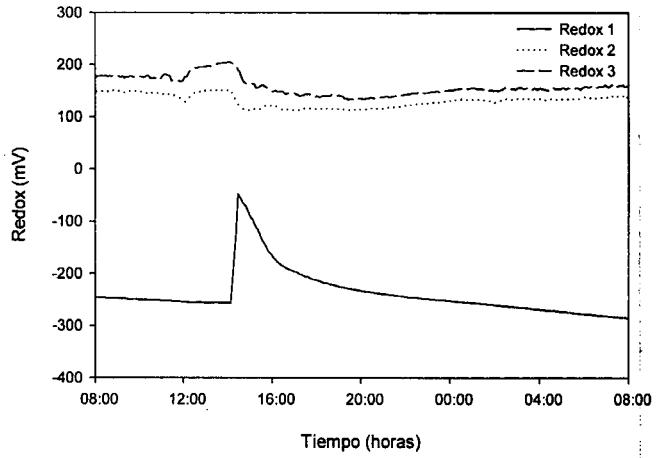
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



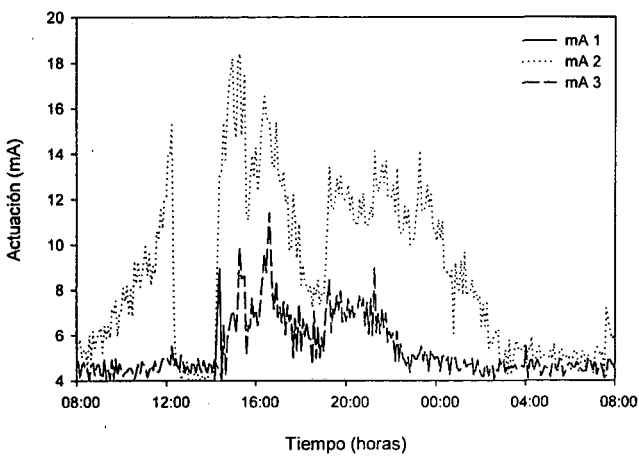
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



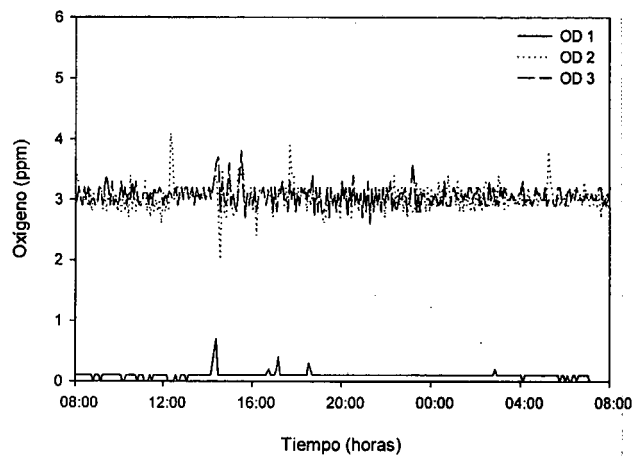
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

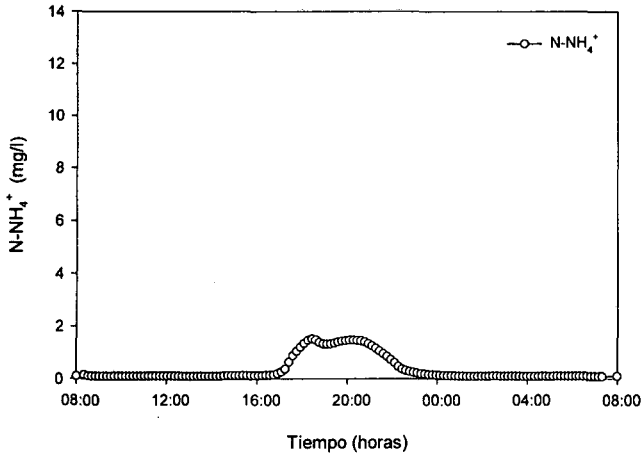


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

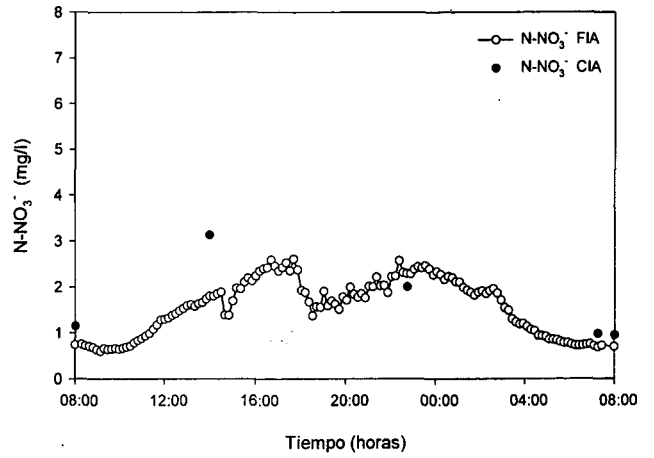


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

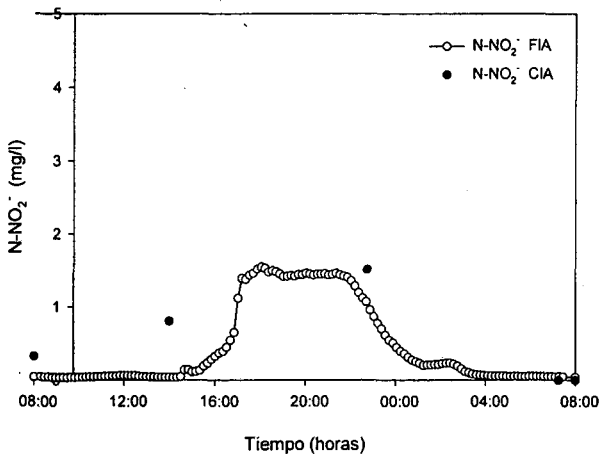
Fig. 5.36. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 16



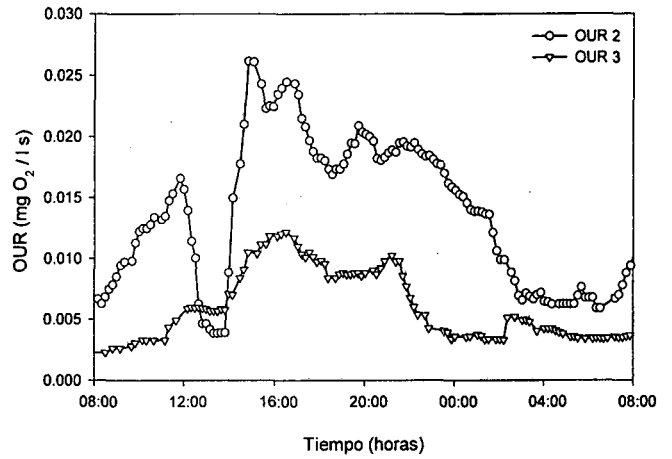
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



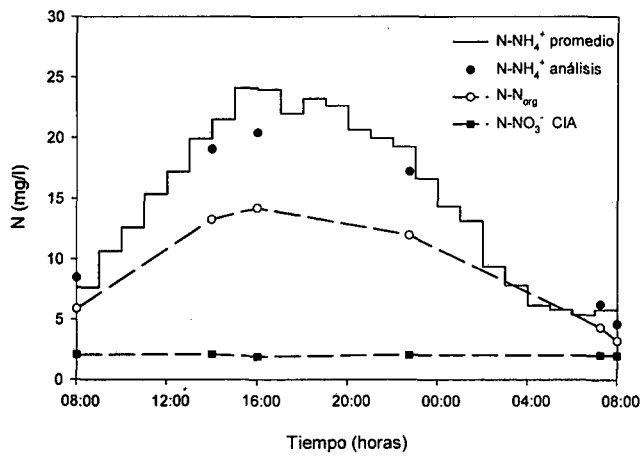
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



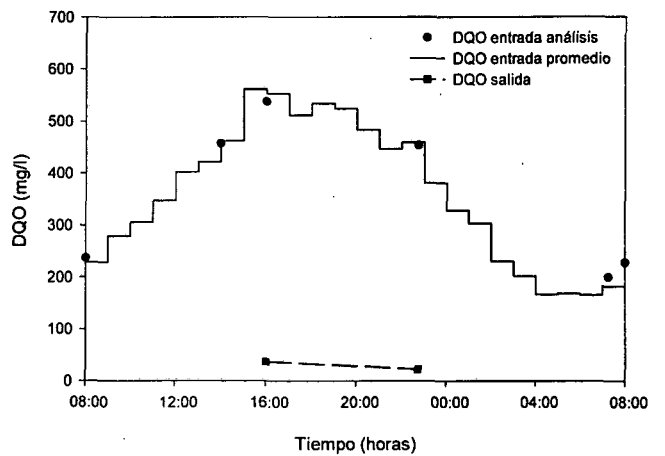
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

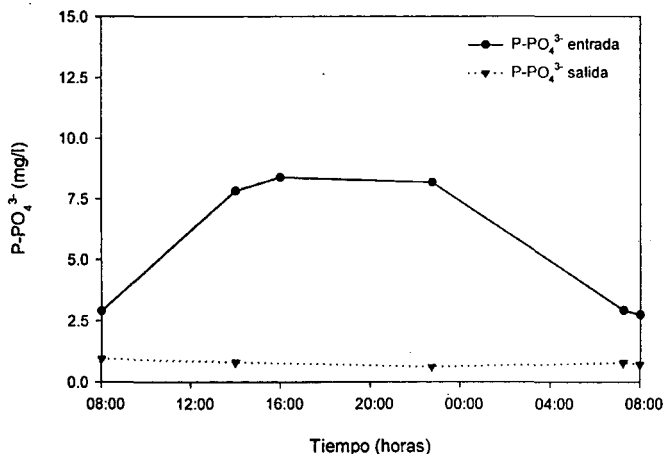


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.36. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 16



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.36. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 16

Resultados

En la tabla 5.40 se muestran los resultados del experimento 16: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.164
N-NO ₃ ⁻	0.697
N-NO ₂ ⁻	0.217
N total	1.078

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.944
% eliminación de N	91.7
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	15.2
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	64.6
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	20.2
mg N eliminado / g SSV d	22.45
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	0.31
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	1.31
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.41

Tabla 5.40. Resultados experimento 16

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa varía correctamente entre valores de 0.5 y 1. La recirculación interna varía en función del valor de N-NO_x en la salida. Se pueden apreciar periodos en que esta relación tiene un valor de 2 y 4.

Temperatura. Se mantienen valores de 21.5 a 24 °C.
pH. El control actúa correctamente. Puede observarse la perturbación producida por la

parada de la planta en los tres reactores. Los reactores aeróbicos aumenta su pH en ese periodo, mientras que el anóxico lo disminuye. En el reactor 2, el pH se mantiene entre 7.00 y 7.25. En el reactor 1, el rango va de 6.75 a 7.00.

Redox. En el reactor 1 varía entre -200 y -300 mV, excepto después del periodo en que es aireado. En los reactores 2 y 3 varía entre 100 y 200 mV, con valores superiores en el reactor 3.

Oxígeno. Se mantienen correctamente los valores consignados en los reactores 2 y 3. Aparece el ruido provocado por el procedimiento de estimación de OUR.

Aireación. Se observa un consumo de aire normal, aunque con una bajada de utilización sobre las 18:00 horas.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 1.5 mg/l sobre las 20:00 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es de 2.6 mg/l a las 16:44 horas. Las medidas del analizador CIA son aproximadamente iguales, excepto una que se desvía.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.5 mg/l) se presentan sobre las 18:00 horas. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores parecidos a los del FIA, excepto un punto que coincide con el resultado también erróneo de nitrato.

OUR. Se observan valores de consumo normales, excepto algunos elevados, después de reiniciar la planta piloto. El consumo máximo aparece sobre las 15:00 horas en el reactor 2, con 0.026 mg O₂ / l s. También pueden observarse los valores reducidos cuando la planta se encuentra parada.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen unos resultados similares a los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada permanece constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores cercanos a los previstos.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 8 mg/l, valores como los esperados.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene alrededor de 1 mg/l.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es muy elevada, del 91.7 %. Por unidad de biomasa, la eliminación es de 22.45 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación elevado. Estos resultados han sido calculados considerando la misma entrada que el resto de experimentos, aunque no ha habido entrada a la planta mientras estaba parada, por lo que no han de ser tenidos muy en cuenta para comparaciones. Puede observarse la eliminación casi total de amonio, pero no así de nitrato ni nitrito. Esto puede deberse a la falta de DQO para que los microorganismos heterótrofos puedan desnitrificar.

EXPERIMENTO 17

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del anterior, modificando únicamente la consigna de oxígeno disuelto en el segundo reactor aeróbico cuando la relación de recirculación interna es 4. De este modo se evita el aporte excesivo de oxígeno al reactor anóxico, ya que este es un factor inhibitorio de la desnitrificación.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.41 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l / 3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5 / 1

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (08:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4970
1	5250
2	5170
3	5140
Total sistema	480.4 gramos
DSVI	220 ml

Tabla 5.41. Condiciones experimento 17

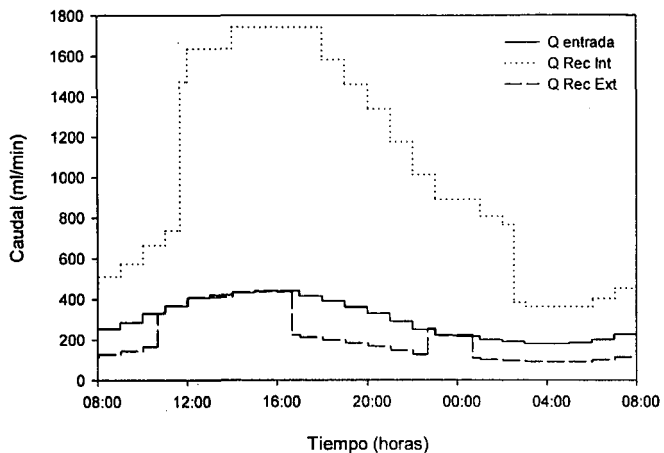
Incidencias de operación

Planta piloto

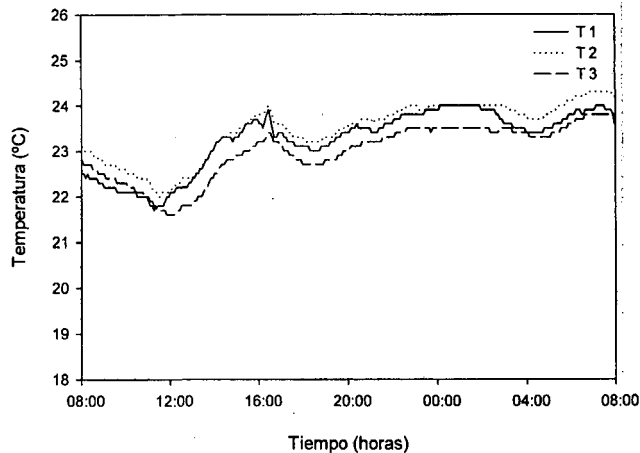
- Parada por alarma de funcionamiento de las bombas de 16:08 a 16:16.
- El control de oxígeno mantiene los valores de consigna de 1 y 3 mg/l adecuadamente. Aparece también el comportamiento ruidoso provocado por la estimación de la OUR.
- El control de pH ha funcionado en general correctamente.
- La bomba dosificadora de carbono ha estado descebada, probablemente de 8:00 a 14:50 horas. Esto ha provocado la ausencia de desnitrificación, y, por tanto, la salida excesiva de nitrato. Una vez purgada la bomba, se recuperan valores normales de salida de nitrato.

Analizadores

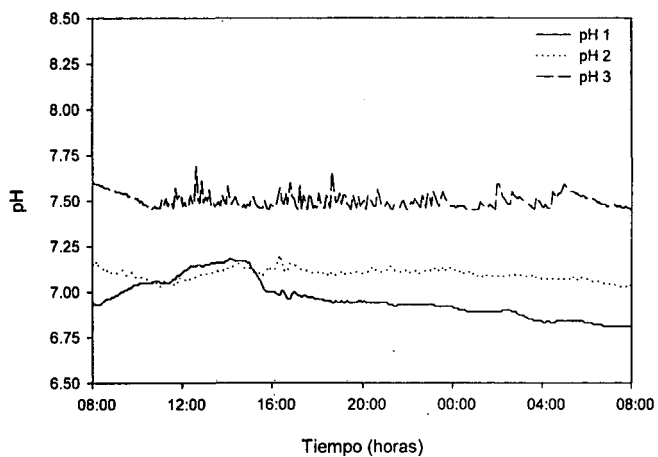
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 8:00 a 9:00 por recalibración de los analizadores.



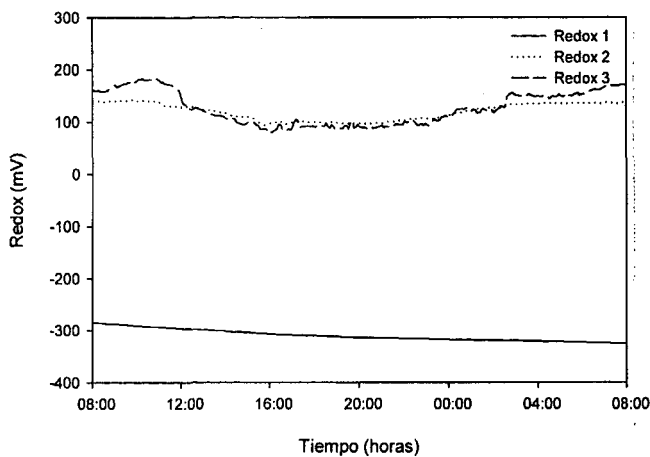
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



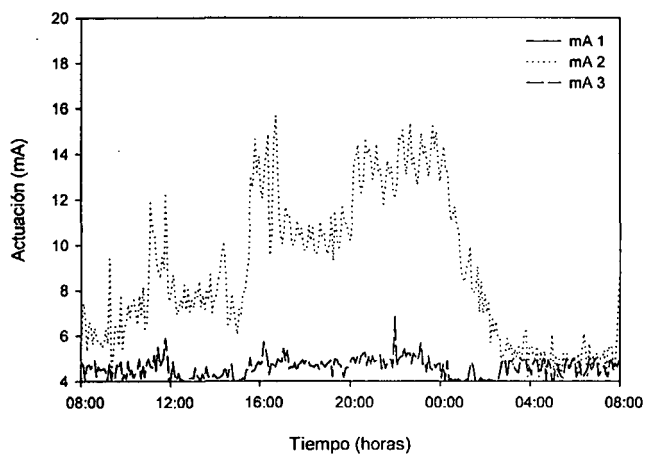
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



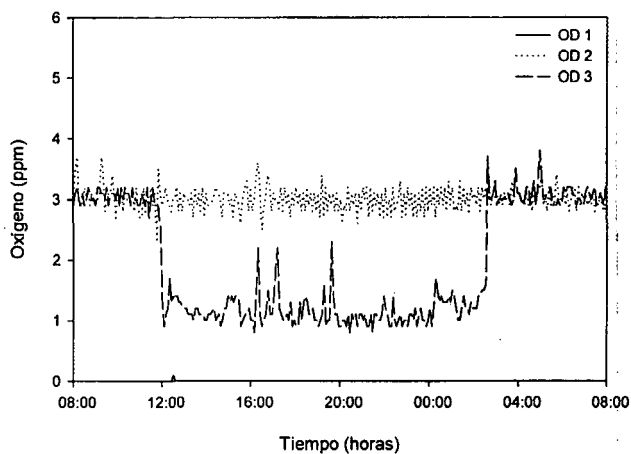
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

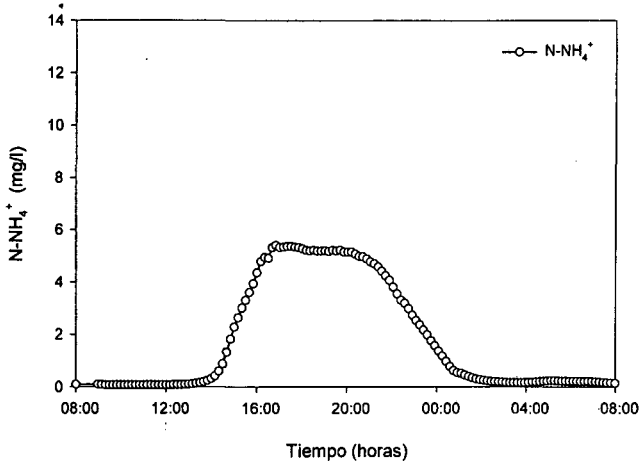


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

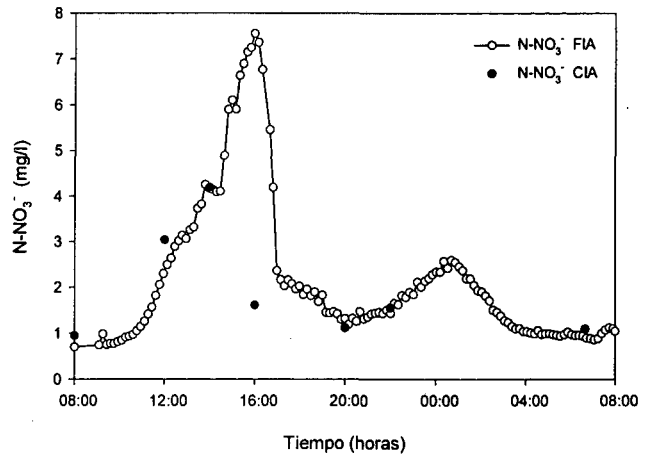


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

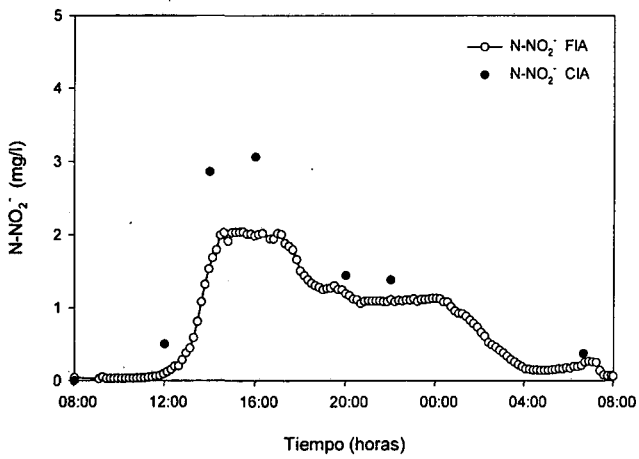
Fig. 5.37. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 17



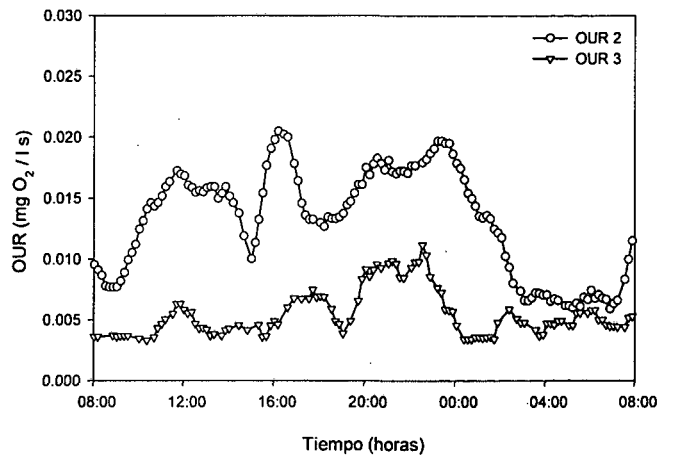
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



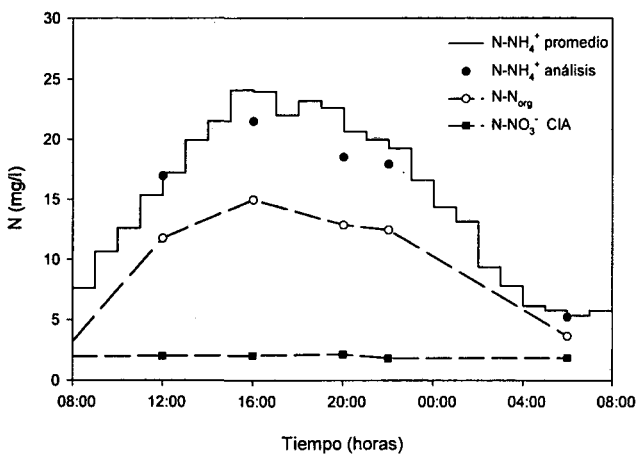
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



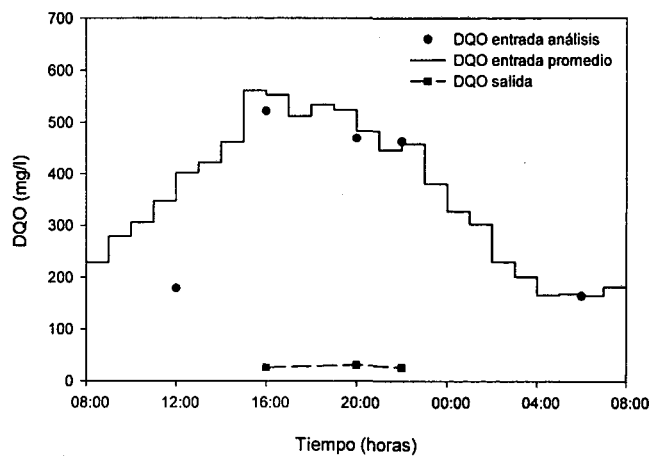
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

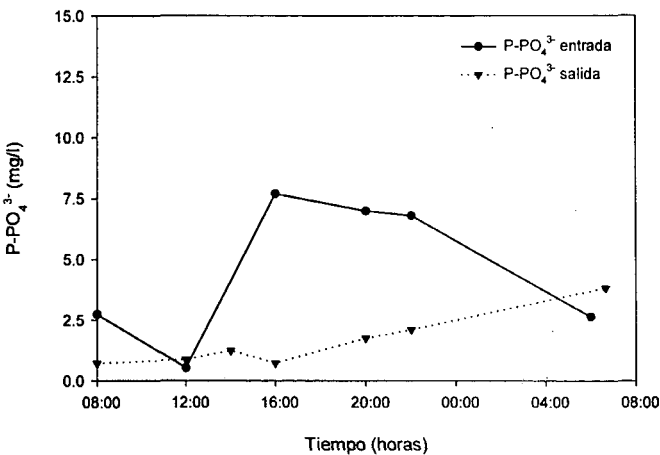


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.37. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 17



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.37. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 17

Resultados

En la tabla 5.42 se muestran los resultados del experimento 17: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.902
N-NO ₃ ⁻	1.065
N-NO ₂ ⁻	0.401
N total	2.368

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	10.654
% eliminación de N	81.8
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	38.1
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	45.0
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	16.9
mg N eliminado / g SSV d	22.18
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.88
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	2.22
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.84

Tabla 5.42. Resultados experimento 17

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa es 0.5 o 1. La relación de recirculación interna tiene valores de 2 y 4.

Temperatura. Se mantienen valores de 21.5 a 24 °C.
pH. El control actúa correctamente. En el reactor 2, el pH se mantiene entre 7.00 y 7.25. En el 1, el rango va de 6.80 a 7.20.

Redox. En el reactor 1 se mueve alrededor de -300 mV. En los reactores 2 y 3 varía alrededor de 100 mV. Puede observarse la disminución de redox en el reactor 3 coincidente con la disminución de la consigna de oxígeno disuelto.

Oxígeno. Se mantienen correctamente los valores consignados en los reactores 2 y 3. Aparece ruido provocado por la estimación de OUR, aunque afecta más al tercer reactor cuando se intentan mantener niveles de oxígeno de 1 mg/l.

Aireación. Se observa un consumo de aire normal en el reactor 2. En el 3 el consumo es muy reducido. La consigna de oxígeno se reduce a 1 mg/l, lo que disminuye los requerimientos de aireación.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.4 mg/l sobre las 17:00 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es de 7.55 mg/l a las 16:00 horas. Estos valores tan elevados se producen por la falta de materia orgánica para poder desnitrificar. Cuando la entrada se restablece, se observa la muy rápida bajada de nitrato en la salida de la planta. Las medidas del analizador CIA son casi iguales, excepto una que se desvía.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (2.0 mg/l) se presentan en un periodo desde las 14:30 a las 17:15 horas. También son valores altos, producidos por la deficiente desnitrificación. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores parecidos a los del FIA, excepto algunos puntos de máxima concentración.

OUR. Se observan valores de consumo normales. El consumo máximo aparece sobre las 16:00 horas en el reactor 2, con 0.020 mg O₂ / l s. También pueden observarse valores reducidos a partir de las 14:00 horas, provocados posiblemente por la escasa entrada de DQO.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen unos resultados similares a los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada permanece constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores cercanos a los previstos, excepto el primer punto, lo que confirma la escasa entrada de fuente de carbono durante el periodo inicial.

Salida DQO. La eliminación es prácticamente total.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 8 mg/l. Sólo el valor de las 12 horas es menor del habitual. Teniendo en cuenta que el fosfato se introduce mediante la disolución de carbono, este dato confirmaría que durante ese periodo la bomba de DQO no estaría dosificando adecuadamente.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene alrededor de 1 mg/l, aunque en el último punto se incrementa hasta casi 4 mg/l, posiblemente por pérdida de lodos en el sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es normal, del 81.8 %. Por unidad de biomasa, la eliminación es de 22.18 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación elevado. Considerando el problema inicial con la desnitrificación, los resultados han sido correctos.

EXPERIMENTO 18

Objetivos

En este experimento se repiten las condiciones del anterior, excepto que no se utilizan diferentes relaciones de recirculación externa. De este modo se estudia el rendimiento de eliminación del proceso con diferentes consignas de oxígeno en el reactor 3 sin la influencia de la relación de recirculación externa variable.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.43 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l
2	Aeróbico	3 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l / 3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (09:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	7860
1	5400
2	5160
3	5080
Total sistema	508.7 gramos
DSVI	275 ml

Tabla 5.43. Condiciones experimento 18

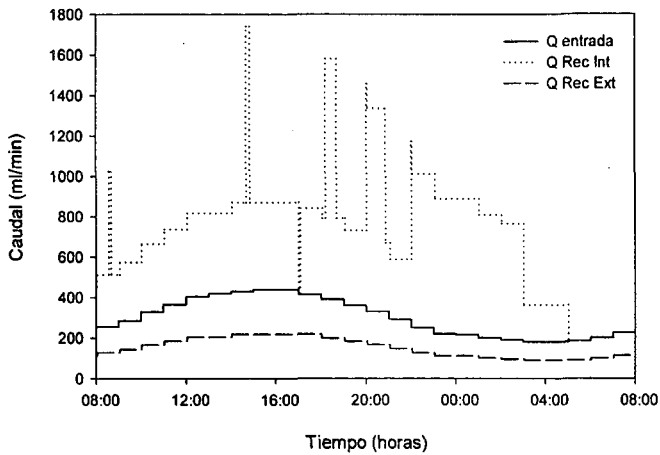
Incidencias de operación

Planta piloto

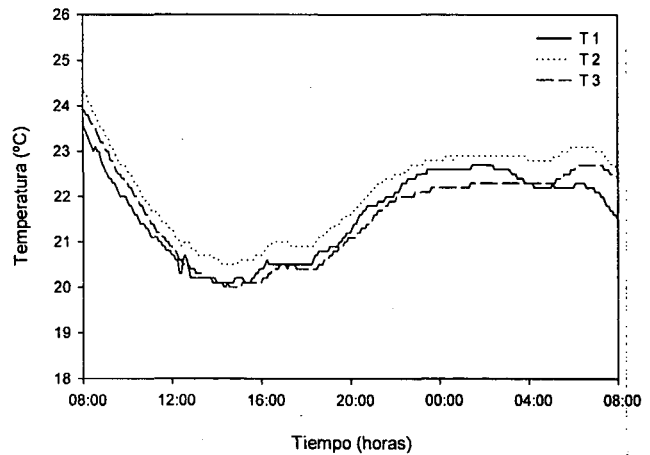
- No se produce ninguna parada durante el experimento.
- El control de oxígeno mantiene los valores de consigna de 1 y 3 mg/l adecuadamente. Se observa el comportamiento ruidoso provocado por la estimación de la velocidad de consumo de oxígeno.
- El control de pH ha funcionado correctamente.

Analizadores

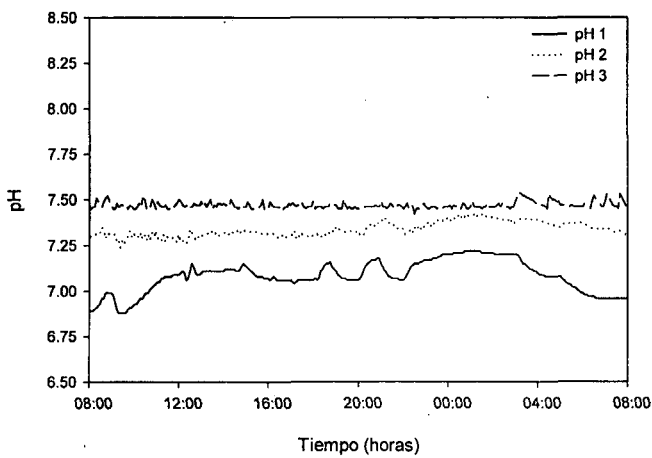
- De 17:00 a 18:00 horas no se dispone de datos de nitrato ni nitrito, por problemas con la columna de reducción de nitrato.
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 6:30 a 7:30 por recalibración de los analizadores.



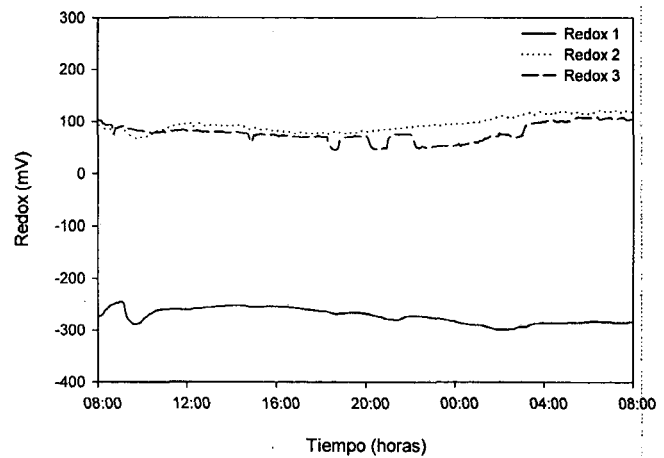
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



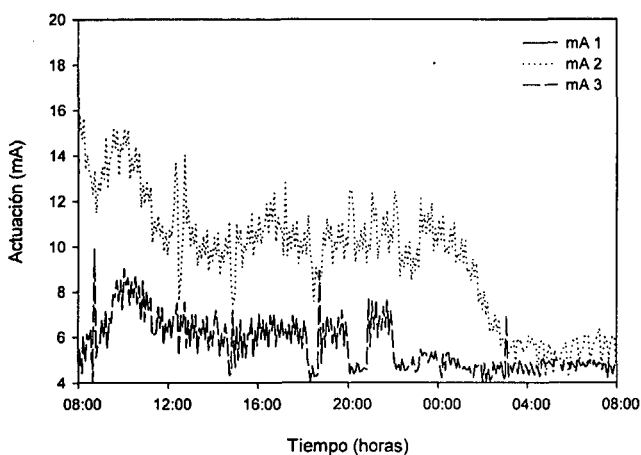
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



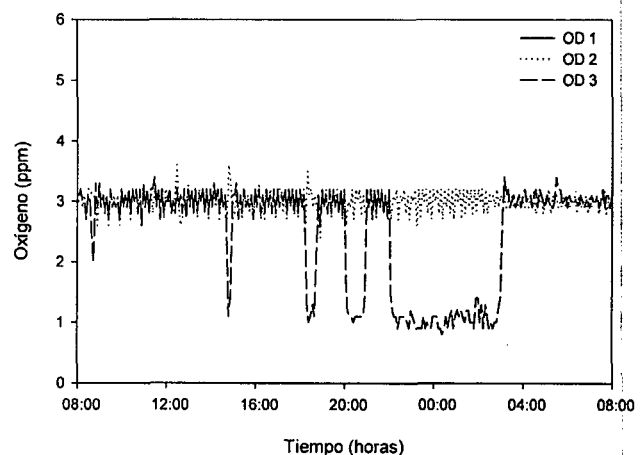
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

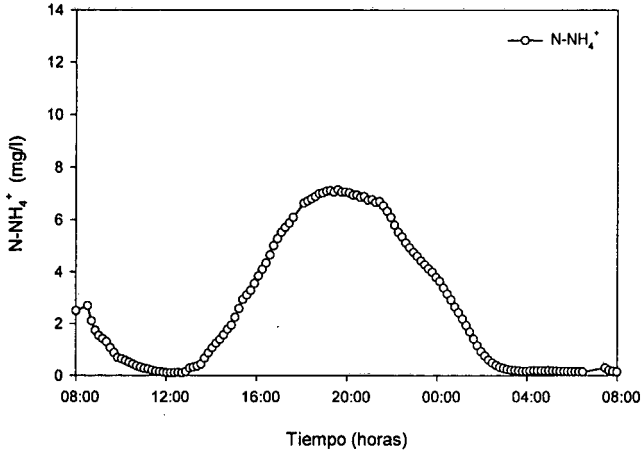


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

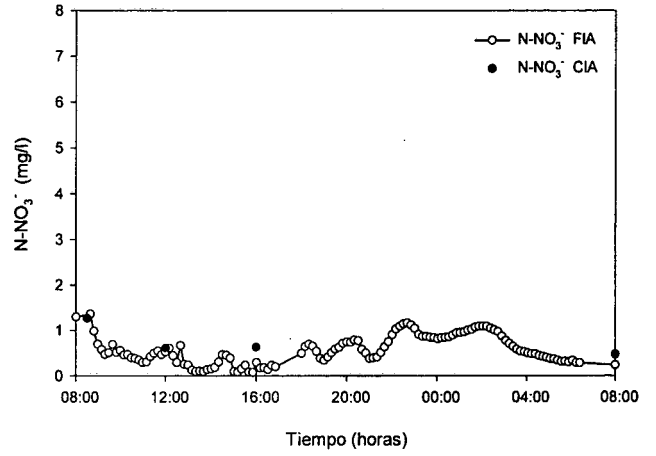


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

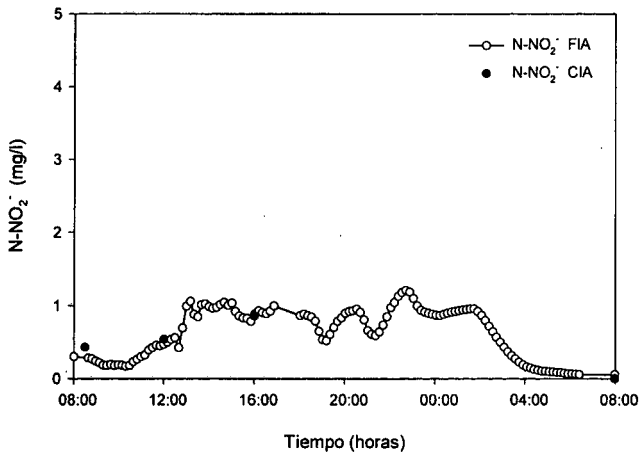
Fig. 5.38. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 18



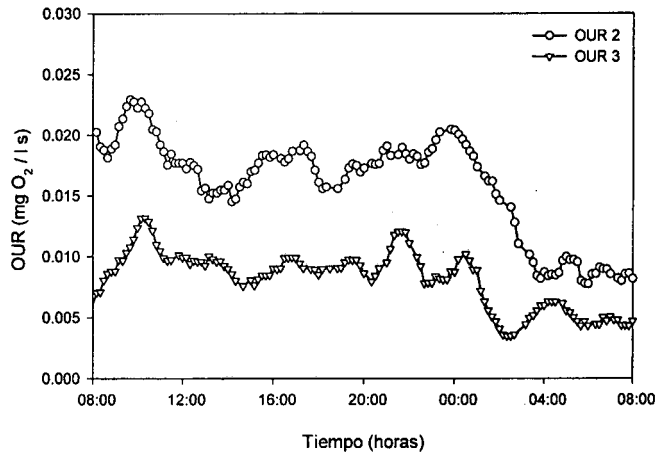
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



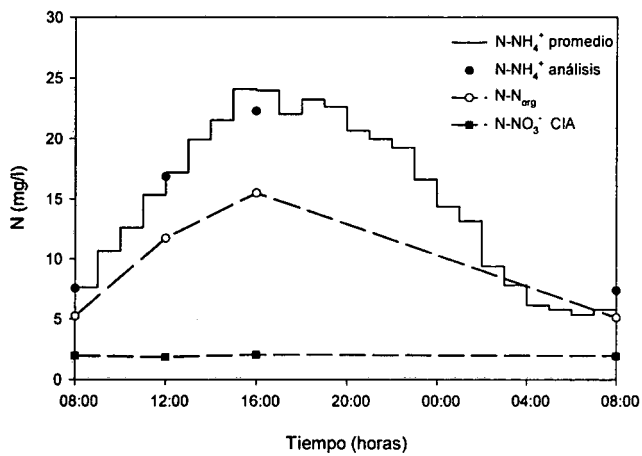
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



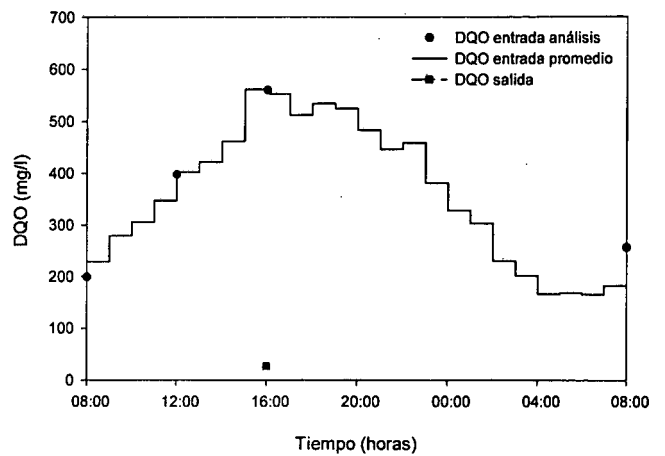
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

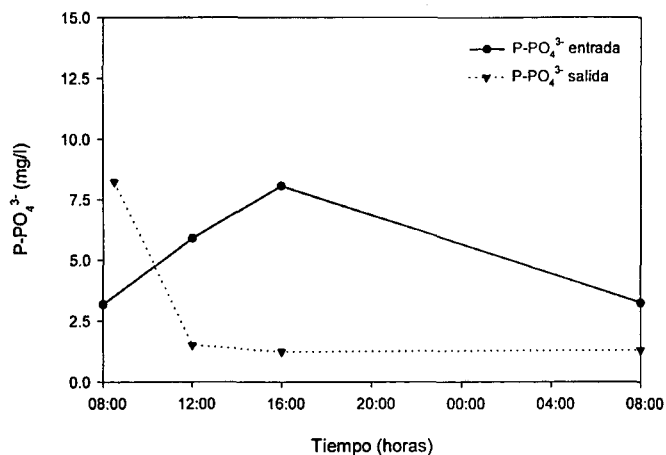


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.38. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 18



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.38. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 18

Resultados

En la tabla 5.44 se muestran los resultados del experimento 18: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	1.239
N-NO ₃ ⁻	0.218
N-NO ₂ ⁻	0.284
N total	1.741

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.281
% eliminación de N	86.6
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	71.2
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	12.5
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	16.3
mg N eliminado / g SSV d	22.18
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.44
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.43
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.56

Tabla 5.44. Resultados experimento 18

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa se mantiene constante. La relación de recirculación interna tiene valores de 1, 2 y 4.

Temperatura. Se mantienen valores de 20 a 24 °C. La temperatura es ligeramente baja durante parte del experimento.

pH. El control de pH del tercer reactor actúa correctamente. En el reactor 2, el pH se mantiene en valores cercanos a 7.25. En el 1, el rango va de 6.80 a 7.20.

Redox. En el reactor 1 varía entre valores de -250 a -300 mV. En los reactores 2 y 3 varía alrededor de 100 mV. Pueden observarse las variaciones de redox de unos 30 mV en el reactor 3, coincidentes con la disminución de la consigna de oxígeno disuelto.

Oxígeno. Se mantienen correctamente los valores consignados en los reactores 2 y 3.

Aireación. Se observa un consumo de aire bajo en el reactor 2. En el 3 el consumo es muy reducido, sobre todo cuando la consigna de oxígeno se reduce a 1 mg/l, lo que disminuye los requerimientos de aireación.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 7.1 mg/l sobre las 19:30 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es muy reducido, 1.2 mg/l a las 22:30 horas. Las medidas del analizador CIA son prácticamente iguales.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.2 mg/l) se presentan sobre las 22:30, al igual que los de nitrato. Los análisis con el equipo CIA ofrecen valores muy parecidos a los del FIA.

OUR. El consumo es normal. El máximo, 0.023 mg O₂ / l s, aparece sobre las 10:00 horas en el reactor 2.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen unos resultados similares a los previstos.

Entrada NO₃⁻. La entrada permanece constante.

Entrada DQO. Se obtienen valores como los previstos.

Salida DQO. La eliminación es casi total en el punto analizado.

Entrada PO₄³⁻. La concentración de entrada varía entre 2 y 8 mg/l.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene por debajo de 2 mg/l, excepto en el primer punto. Este valor elevado está provocado por la agitación antes del inicio del experimento de los lodos del sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es de 86.6 %, valor elevado. La eliminación por unidad de biomasa es de 22.18 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación igual al del anterior experimento.

EXPERIMENTO 19

Objetivos

En este experimento se incorporan respecto al anterior tres estrategias de control. En primer lugar, la ya utilizada de aumento de recirculación externa en función de la carga. En segundo lugar, se cambia el estado del segundo reactor de aeróbico a anóxico cuando se detecta baja concentración de nitrógeno amoniacal en la salida (menos de 0.3 mg/l). Esto disminuye el consumo de aire en el sistema y favorece la desnitrificación. Por último, se establece una secuencia aeróbica / anóxica (30 y 60 minutos respectivamente) en el reactor 1, para favorecer la nitrificación en condiciones de alta carga de amonio (más de 1.0 mg/l de nitrógeno amoniacal a la salida).

Condiciones experimentales

En la tabla 5.45 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l / 3 mg/l
2	Aeróbico	0 mg/l / 3 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l / 3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5 / 1

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	5170
1	4880
2	4840
3	4860
Total sistema	454.8 gramos
DSVI	220 ml

Tabla 5.45. Condiciones experimento 19

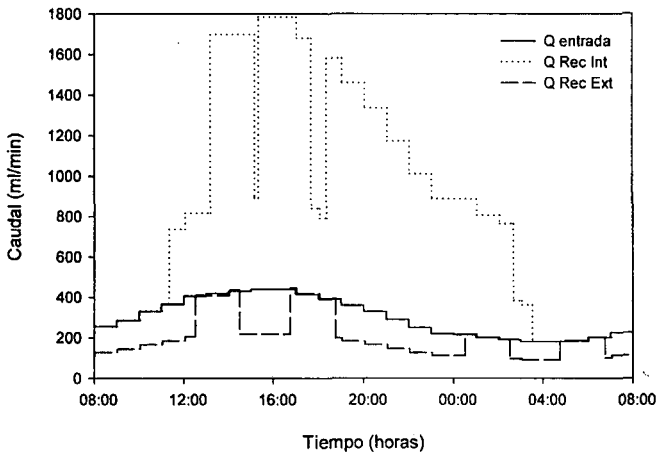
Incidencias de operación

Planta piloto

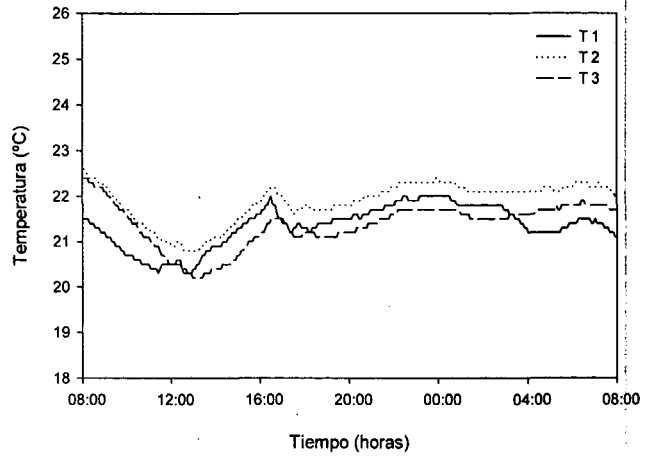
- No se produce ninguna parada durante el experimento.
- El control de oxígeno mantiene los valores de consigna de 0, 1 y 3 mg/l adecuadamente.
- El control de pH ha funcionado correctamente, excepto alguna perturbación al final del periodo experimental.

Analizadores

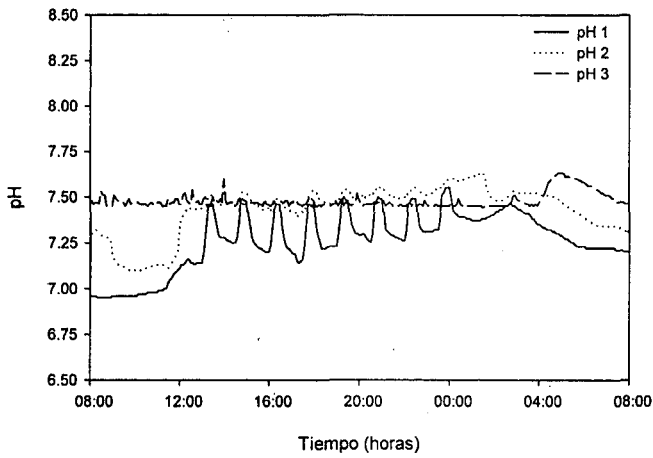
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 6:30 a 7:30 por calibración de los analizadores.



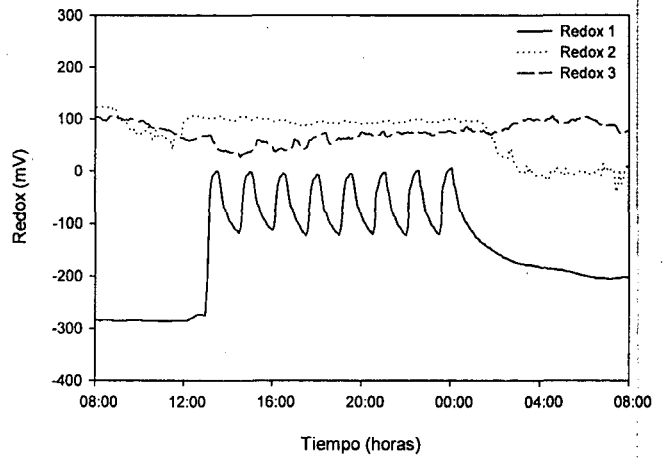
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



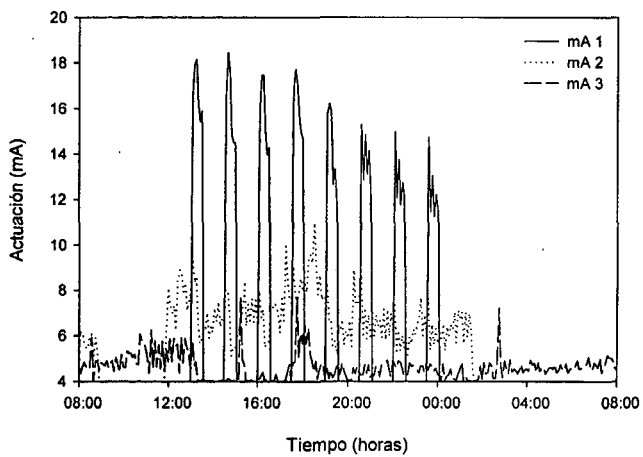
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



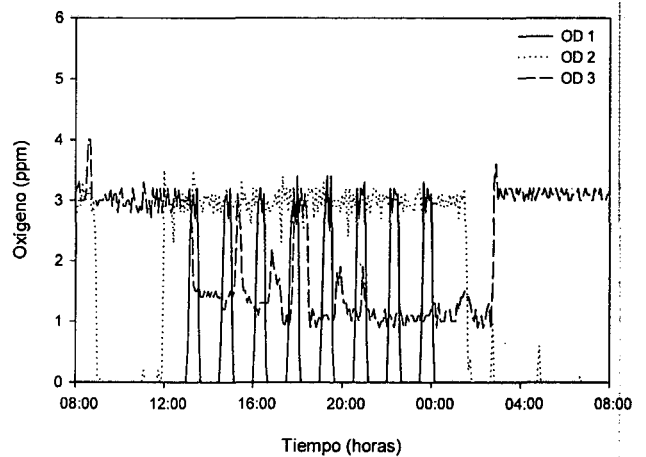
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

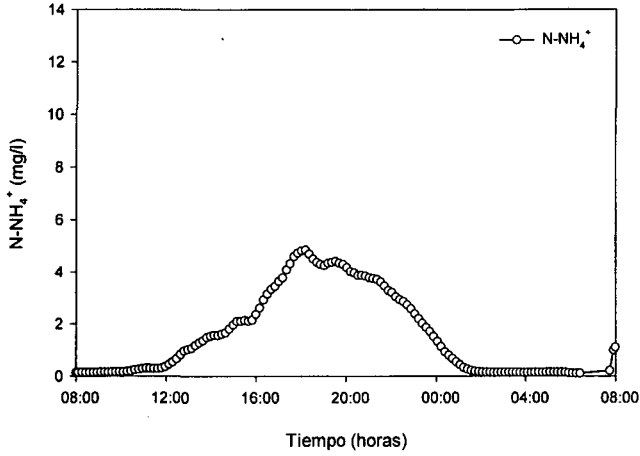


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

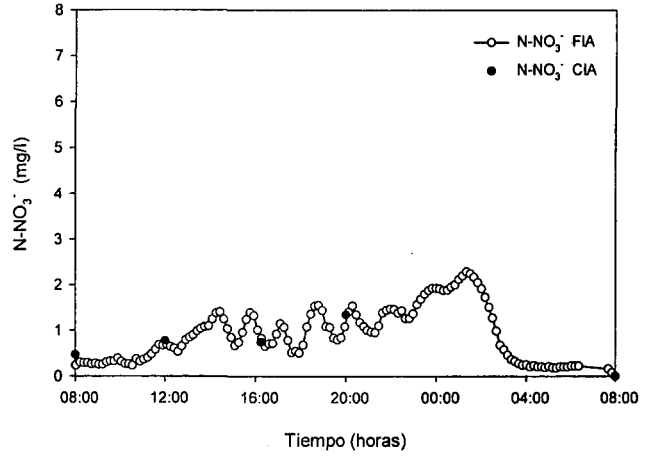


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

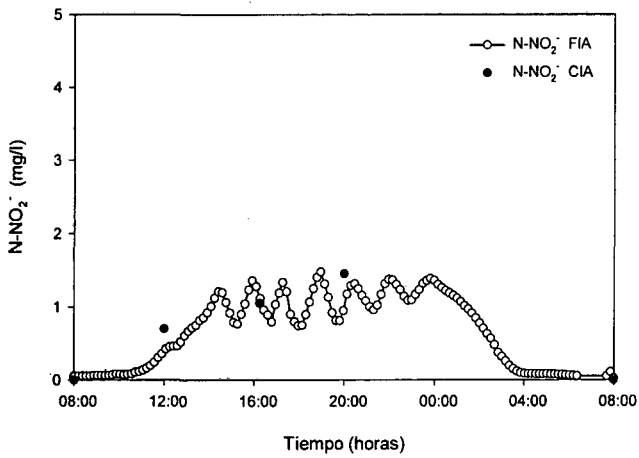
Fig. 5.39. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 19



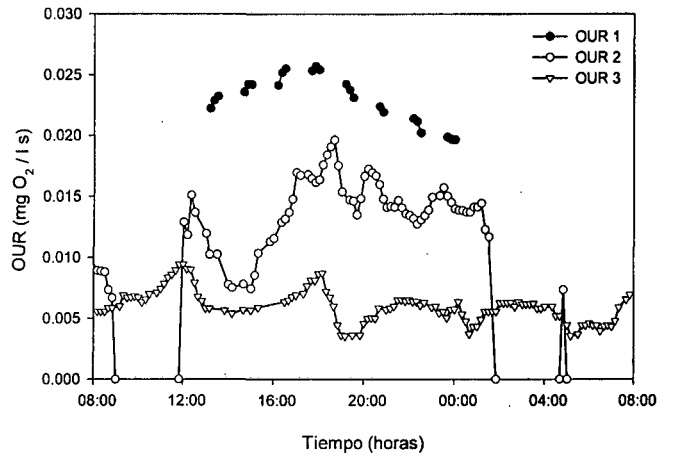
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



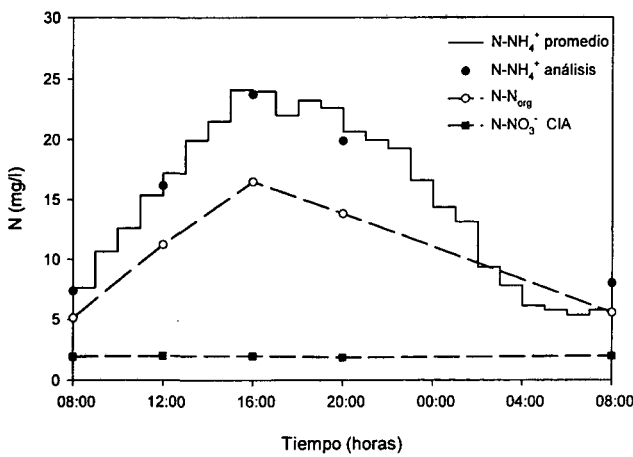
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



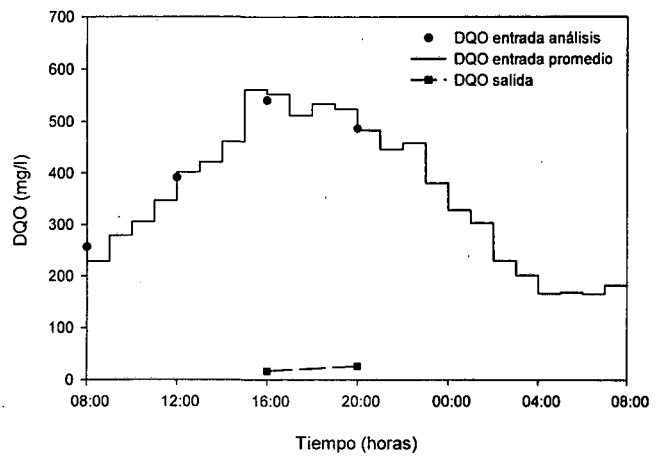
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

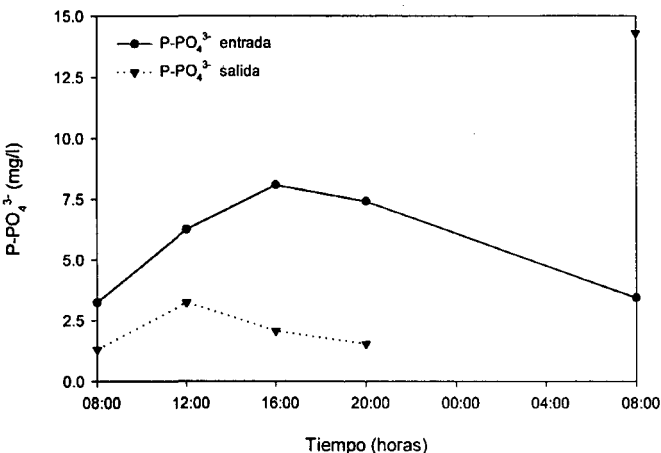


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.39. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 19



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.39. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 19

Resultados

En la tabla 5.46 se muestran los resultados del experimento 19: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.785
N-NO ₃ ⁻	0.386
N-NO ₂ ⁻	0.313
N total	1.484

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.538
% eliminación de N	88.6
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	52.9
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	26.0
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	21.1
mg N eliminado / g SSV d	25.37
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	1.73
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.85
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.69

Tabla 5.46. Resultados experimento 19

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa utilizada es 0.5 en condiciones normales y 1 en condiciones de alta carga. La relación de recirculación interna tiene valores de 1, 2 y 4.

Temperatura. Se mantienen valores de 20 a 22.5 °C.

pH. El control de pH del tercer reactor actúa correctamente y mantiene el valor de consigna excepto en el último periodo. En el reactor 2, el pH se mantiene en valores cercanos a 7.50. Inicialmente el pH en ese reactor baja hasta 7.10, debido a las condiciones anóxicas. En el reactor

1, el pH tiene una mayor variabilidad, producida por el cambio de condiciones óxicas. En condiciones aeróbicas, el pH se encuentra alrededor de 7.50, mientras que en condiciones anóxicas aparecen valores de 7.25.

Redox. En el reactor 1 existe una gran variación provocada por las diferentes condiciones óxicas. Se parte del valor inicial de -300 mV, que oscila después entre 0 y -100 mV en condiciones alternantes de oxígeno. Finalmente se obtienen valores cercanos a -200 mV en condiciones anóxicas. En el 2, también aparecen cambios. En condiciones aeróbicas se encuentra alrededor de 100 mV, mientras que en condiciones anóxicas baja a valores alrededor de 0 mV. En el 3, la variación de la consigna de oxígeno hace modificar sus valores entre 50 y 100 mV.

Oxígeno. En el reactor 1 se consigue mantener la consigna de 1 mg/l en periodos aeróbicos. En el reactor 2, se varía correctamente entre 0 y 3 mg/l. Por último, en el reactor 3 las consignas de 1 y 3 mg/l son mantenidas correctamente. En los tres casos se observa cierta oscilación provocada por las estimaciones de la OUR.

Aireación. Se observa un consumo de aire bajo en los reactores 2 y 3, mientras que en el reactor 1 el consumo es elevado durante los periodos aeróbicos.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 4.8 mg/l sobre las 18:00 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es reducido, 2.3 mg/l a las 1:30 horas. Puede observarse un comportamiento oscilatorio de las medidas, provocado por los ciclos de anóxicos/aeróbicos del primer reactor. Las medidas CIA son prácticamente iguales.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.5 mg/l) se presentan sobre las 19:00. También se observa el mismo comportamiento oscilante que el nitrato. Los análisis CIA ofrecen valores iguales al FIA.

OUR. El consumo es alto en el reactor 1, ligeramente bajo en el 2 y muy bajo en el 3. El máximo, 0.026 mg O₂ / l s, aparece sobre las 18:00 horas en el reactor 1.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen los resultados previstos.

DQO. Valores correctos de entrada y eliminación.

Entrada PO₄³⁻. Varía entre 2.5 y 8 mg/l.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene por debajo de 3 mg/l, excepto en el último punto. Este valor tan elevado está provocado por la ligera agitación de lodos en la superficie del sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es de 88.6 %, valor elevado. La eliminación por unidad de biomasa es de 25.37 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación bastante elevado y con concentraciones a la salida bastante ajustadas.

EXPERIMENTO 20

Objetivos

Para este experimento se repiten las condiciones del anterior, para observar la reproducibilidad de la respuesta del sistema ante una misma entrada.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.47 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l / 3 mg/l
2	Aeróbico	0 mg/l / 3 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l / 3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5 / 1

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (07:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4020
1	4700
2	4780
3	4750
Total sistema	434.6 gramos
DSVI	300 ml

Tabla 5.47. Condiciones experimento 20

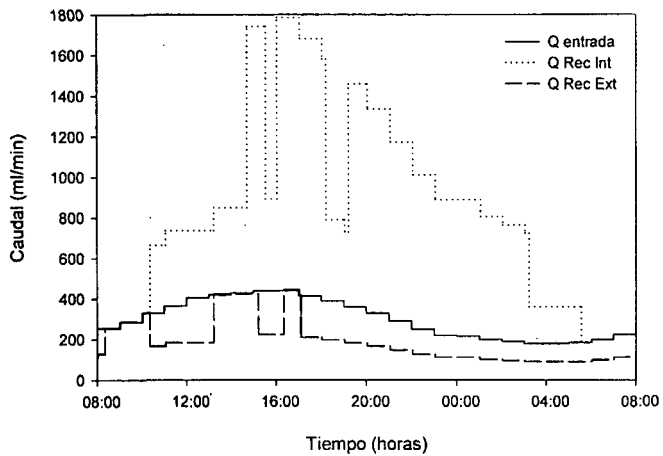
Incidencias de operación

Planta piloto

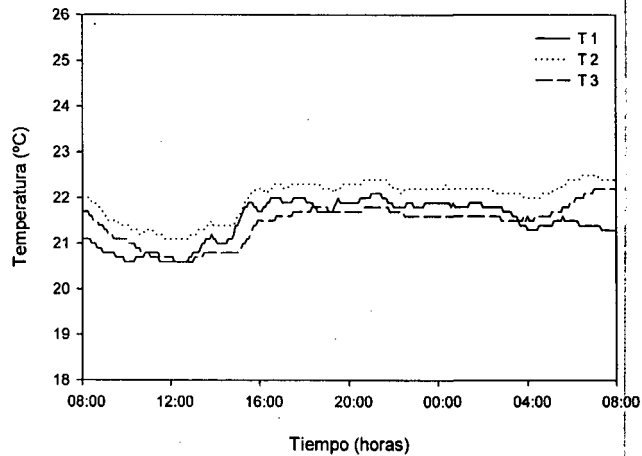
- Parada por alarma de funcionamiento de las bombas, de 17:09 a 17:10 horas.
- El control de oxígeno en el reactor 1 mantiene correctamente los valores de 0 y 3 mg/l. En el reactor 2 se mantienen bien los valores de 3 y 1 mg/l, aunque este último no se puede mantener de 2:00 a 4:00 horas, a pesar de cerrar la válvula, debido al escaso consumo. Para el reactor 3, la consigna de 3 mg/l se mantiene adecuadamente. Al modificar la consigna a 0 mg/l, y en consecuencia cerrar la válvula de aireación, no se consigue reducir la concentración de oxígeno a los valores consignados. Esto se traduce en falta de condiciones anóxicas durante el periodo final del experimento.
- El control de pH ha funcionado correctamente hasta las 22 horas. A partir de ese momento, el agotamiento de la disolución de bicarbonato provoca la bajada del pH en el tercer reactor a valores alrededor de 7.00.

Analizadores

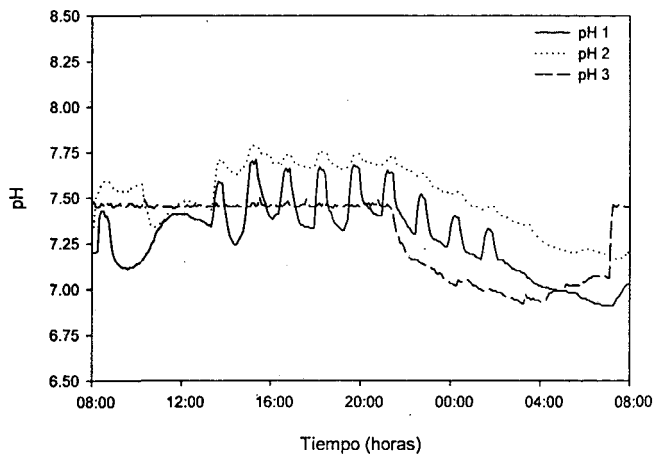
- No aparecen problemas con los analizadores durante el experimento.



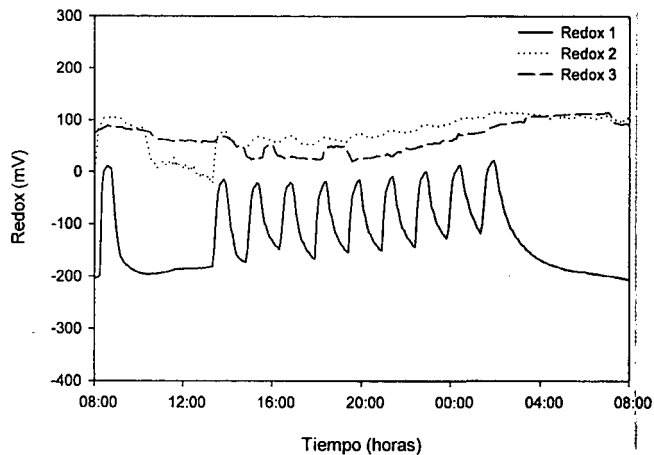
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



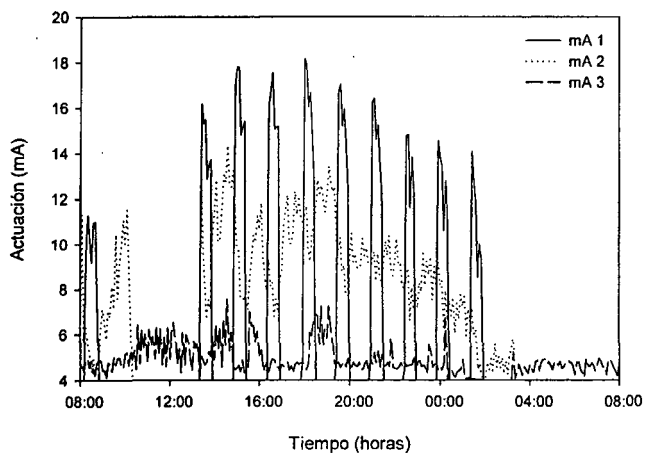
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



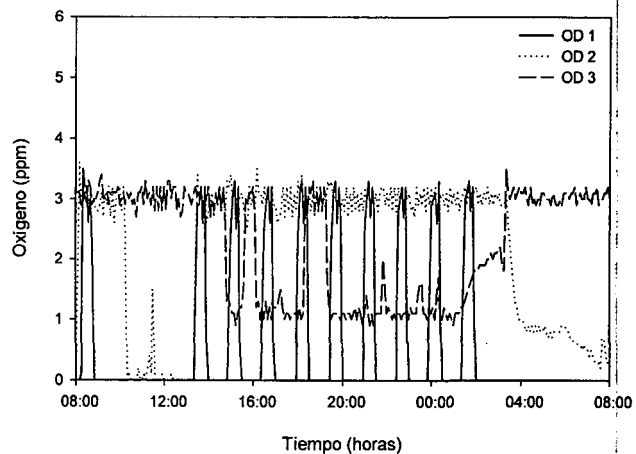
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1, 2 y 3

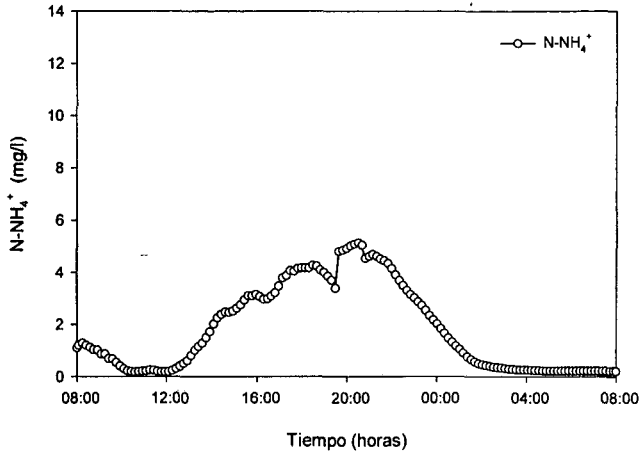


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

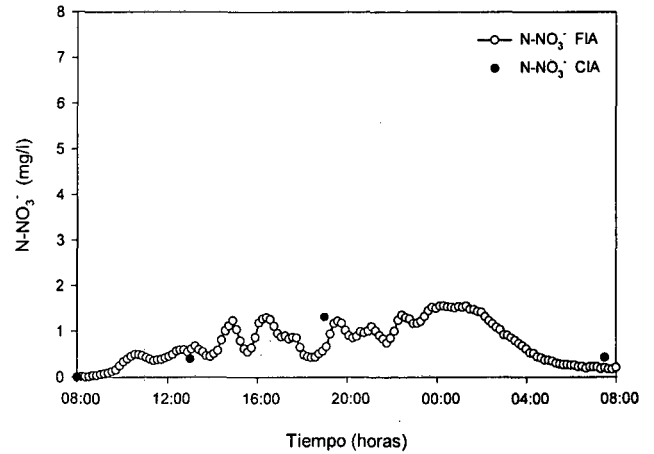


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

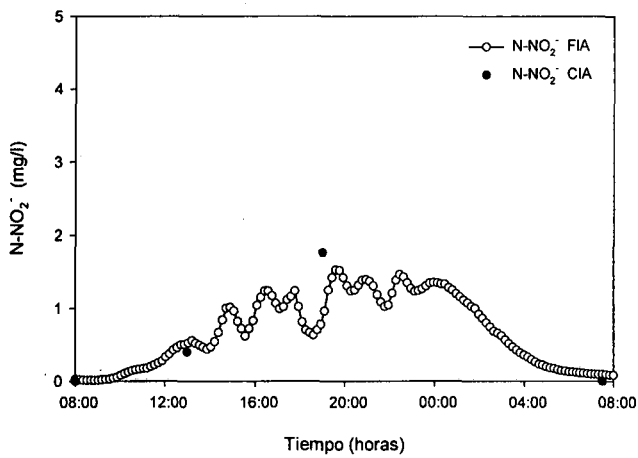
Fig. 5.40. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 20



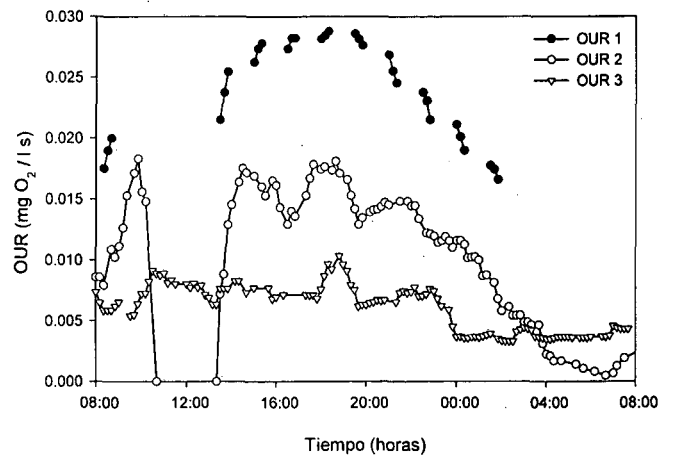
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



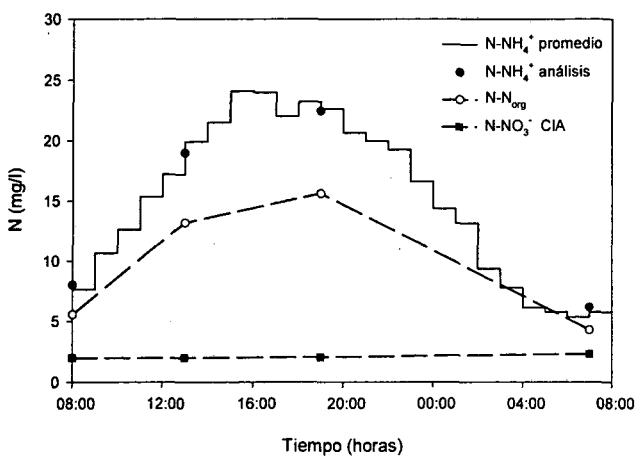
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



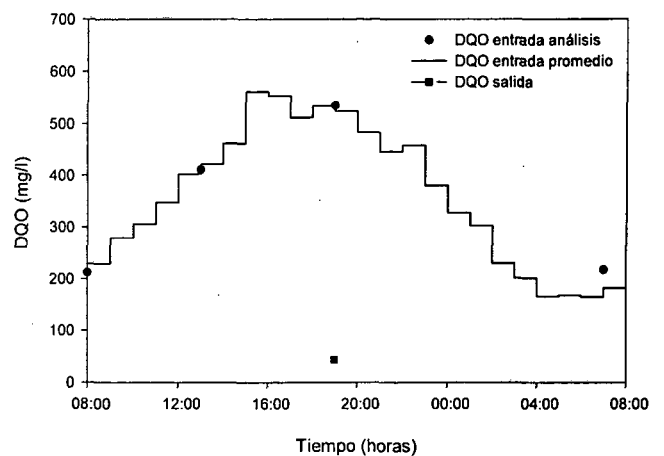
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) y "off-line" (CIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos

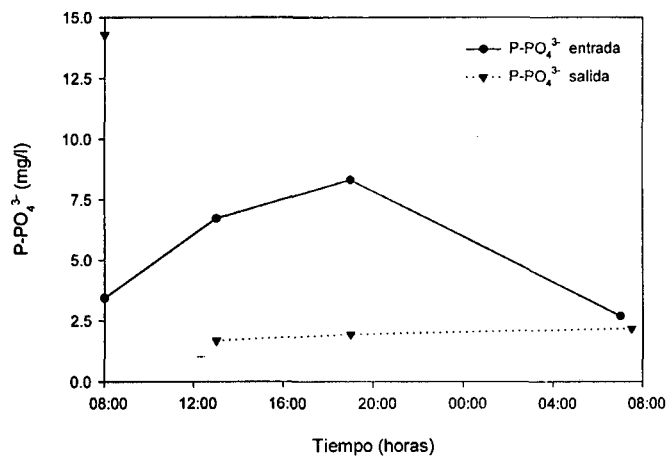


(k) Evolución de las diferentes formas de nitrógeno en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada y salida de la planta

Fig. 5.40. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 20



(m) Análisis de fosfato "off-line" (CIA) en la entrada y salida de la planta.

Fig. 5.40. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 20

Resultados

En la tabla 5.48 se muestran los resultados del experimento 20: nitrógeno no eliminado y porcentajes de eliminación en diferentes unidades.

Suma integrada de nitrógeno en la salida (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	0.893
N-NO ₃ ⁻	0.321
N-NO ₂ ⁻	0.310
N total	1.524

Eliminación de nitrógeno	
Eliminación de N (g/d)	11.499
% eliminación de N	88.3
% N-NH ₄ ⁺ del N total salida	58.6
% N-NO ₃ ⁻ del N total salida	21.1
% N-NO ₂ ⁻ del N total salida	20.3
mg N eliminado / g SSV d	26.46
mg N-NH ₄ ⁺ salida / g SSV d	2.05
mg N-NO ₃ ⁻ salida / g SSV d	0.74
mg N-NO ₂ ⁻ salida / g SSV d	0.71

Tabla 5.48. Resultados experimento 20

Comentarios

Variables "in-line"

Caudales de recirculación. La relación de recirculación externa utilizada es 0.5 en condiciones normales y 1 en condiciones de alta carga. La relación de recirculación interna tiene valores de 1, 2 y 4.

Temperatura. Se obtienen valores de 20.5 a 22.5 °C.

pH. Hay variación de pH en el reactor 3 debido al problema comentado en incidencias. En el reactor 2 aparecen valores en el margen entre 7.25 y 7.75. En el primer reactor, se observan las variaciones provocadas por el control, así como las resultantes de la modificación de las condiciones óxicas. Así se obtienen valores entre 7.00 y 7.75.

Redox. En el reactor 1 existe una gran variación provocada por las diferentes condiciones óxicas. Las oscilaciones que se producen varían entre 0 y -200 mV. En el reactor 2 aparecen los cambios provocados por las diferentes consignas de oxígeno, que hacen variar los valores de redox entre 0 y 100 mV. En el reactor 3 también se aprecia una cierta variabilidad, provocado por los cambios de consigna de 1 a 3 mg/l. En este caso el rango observado es de 50 a 100 mV.

Oxígeno. Se pueden apreciar en general el adecuado control, excepto en algún periodo comentado en incidencias. En los tres casos se observa cierta oscilación por las estimaciones de OUR.

Aireación. Se observa un consumo de aire bajo en el reactor 2 y muy bajo en el 3, mientras que en el reactor 1 el consumo es elevado durante los periodos aeróbicos.

Variables analíticas

NH₄⁺ salida. Se obtienen valores máximos de 5.1 mg/l sobre las 20:30 horas.

NO₃⁻ salida. El máximo es reducido, 1.6 mg/l a las 24:00 horas. Puede observarse la oscilación de las medidas, provocada por los ciclos de anóxicos/aeróbicos del primer reactor. Las medidas CIA son prácticamente iguales.

NO₂⁻ salida. Los valores máximos (1.2 mg/l) se presentan sobre las 19:30. También se observa el mismo comportamiento oscilante que el nitrato. Los análisis CIA ofrecen valores iguales al FIA.

OUR. El consumo es muy elevado en el reactor 1, ligeramente bajo en el 2 y muy bajo en el 3. El máximo es 0.029 mg O₂ / l s y aparece sobre las 18:20 horas en el reactor 1.

Entrada NH₄⁺. Se obtienen los resultados previstos.

DQO. Valores correctos de entrada y eliminación.

Entrada PO₄³⁻. Varía entre 2 y 8 mg/l.

Salida PO₄³⁻. Se mantiene por debajo de 3 mg/l, excepto en el primer punto. Este valor tan elevado está provocado por la ligera agitación de lodos en la superficie del sedimentador.

Valoración global

La eliminación de nitrógeno es de 88.3 %, valor elevado. La eliminación por unidad de biomasa es de 26.46 mg N / g SSV d, rendimiento de eliminación muy elevado. También se obtienen concentraciones de nitrógeno a la salida bastante pequeñas.

EXPERIMENTO 21

Objetivos

De nuevos se repiten las condiciones de máximo control en el sistema, tal como en los experimentos 19 y 20.

Condiciones experimentales

En la tabla 5.49 se muestran las condiciones experimentales de oxígeno, recirculación y entrada total de la planta piloto.

Estado óxico		
Reactor	Estado	Consigna OD
0	Anaeróbico	0 mg/l
1	Anóxico	0 mg/l / 3 mg/l
2	Aeróbico	0 mg/l / 3 mg/l
3	Aeróbico	1 mg/l / 3 mg/l

Recirculación	
R. Interna	Caudal RI / Caudal Entrada = 1 / 2 / 4
R. Externa	Caudal RE / Caudal Entrada = 0.5 / 1

Suma integrada de nitrógeno en la entrada (g/d)	
N-NH ₄ ⁺	7.264
N-N _{org}	5.049
N-NO ₃ ⁻	0.709
N total	13.022

Sólidos en suspensión (09:00 horas)	
Reactor	SSV (mg/l)
0	4560
1	4660
2	4710
3	4670
Total sistema	434.2 gramos
DSVI	275 ml

Tabla 5.49. Condiciones experimento 21

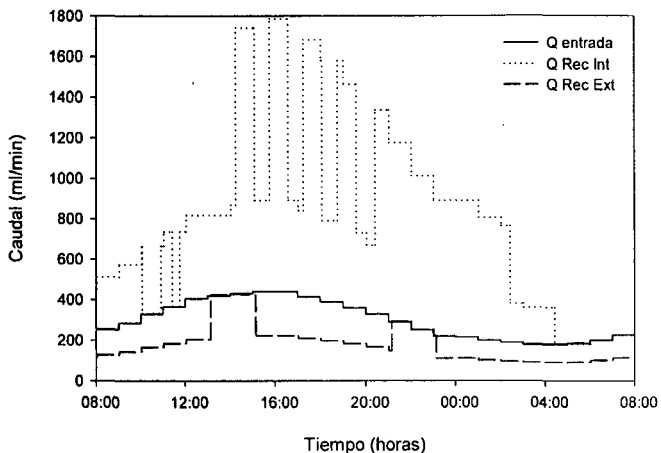
Incidencias de operación

Planta piloto

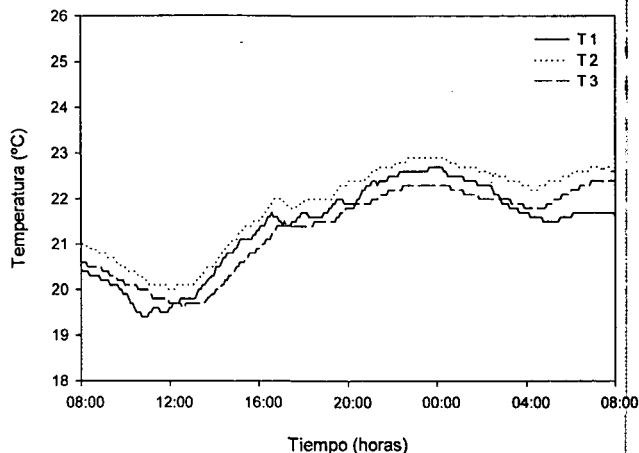
- Parada por alarma nivel en el reactor 1 de 13:46 a 13:50 horas.
- El control de oxígeno en los tres reactores funciona adecuadamente. Se mantienen correctamente las consignas fijadas en cada reactor. Únicamente en el tercer reactor puede observarse como de 2:00 a 8:00 horas, a pesar de que la señal de salida de controlador es mantener la válvula totalmente cerrada, no se consigue reducir la concentración de oxígeno a 0 mg/l. El motivo es la falta de materia orgánica que degradar, unido al pequeño aporte de oxígeno del sistema de aireación.
- No se disponen de medida de redox del reactor 3, por mal funcionamiento del electrodo.
- El electrodo de pH del tercer reactor no ha funcionado correctamente. Al principio del experimento medía por debajo del punto de consigna, por lo que ha adicionado un exceso de bicarbonato. Una vez recalibrado, la medida de pH se ha incrementado hasta 8.00. El mal funcionamiento del control puede detectarse por el incremento de pH de los reactores 1 y 2 por encima de la consigna del tercero, lo que empieza a detectarse sobre las 11:00 horas. Durante el resto del experimento, puede observarse que el pH va disminuyendo por el consumo de alcalinidad durante la nitrificación.

Analizadores

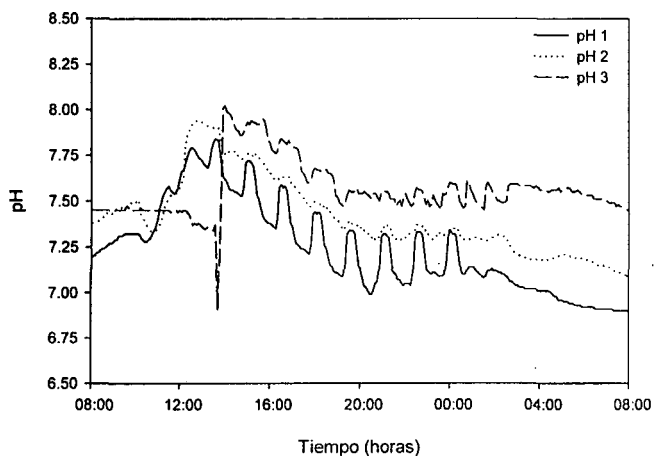
- No se disponen datos de nitrato, nitrito ni amonio de 8:00 a 10:00 por recalibración de los analizadores.



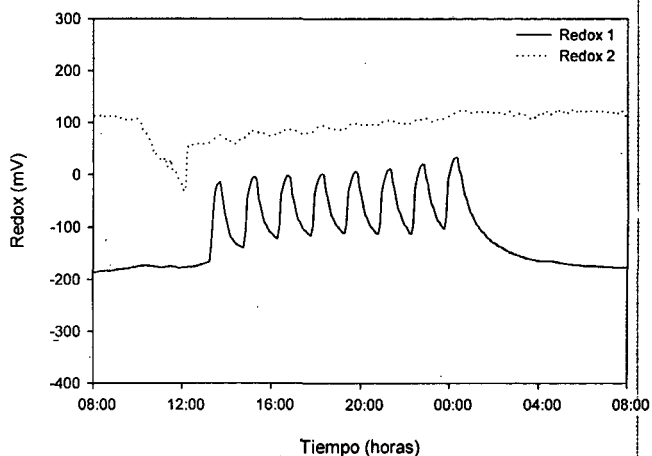
(a) Caudales de entrada, recirculación interna y recirculación externa



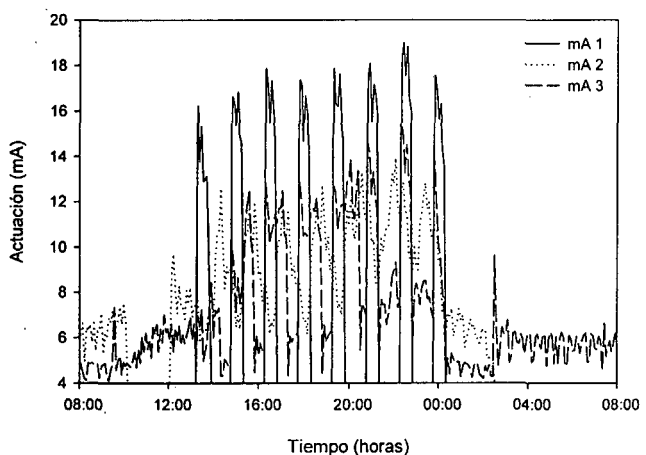
(b) Temperatura en los reactores 1, 2 y 3



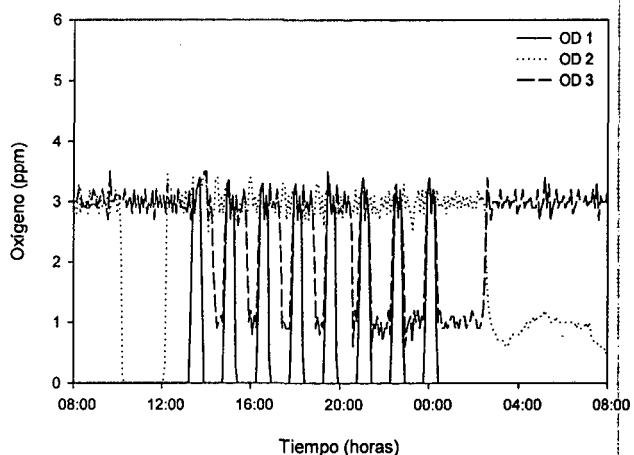
(c) Evolución del pH en los reactores 1, 2 y 3



(d) Evolución del potencial redox en los reactores 1 y 2

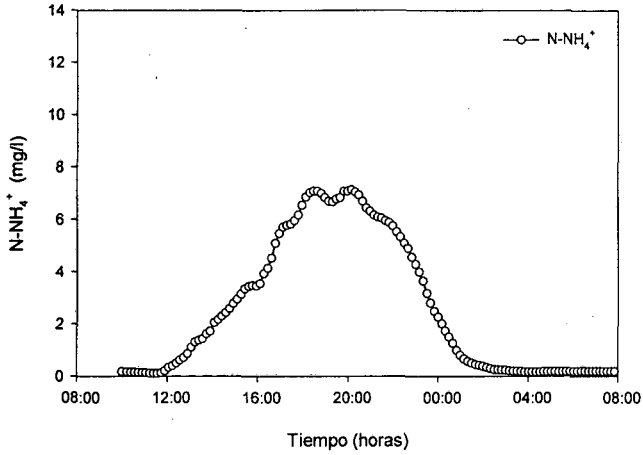


(e) Actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores 1, 2 y 3

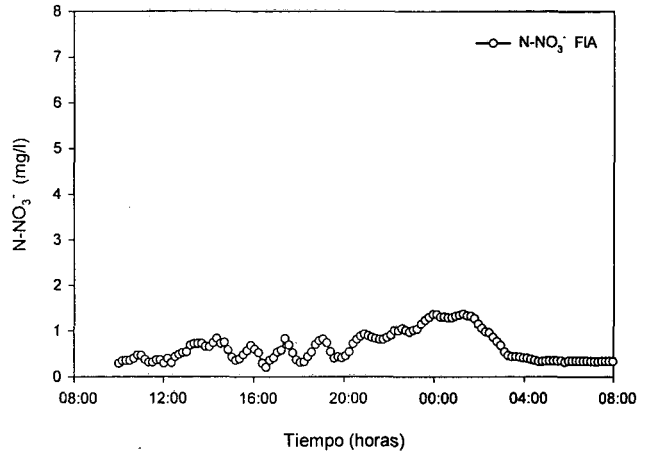


(f) Evolución del oxígeno disuelto en los reactores 1, 2 y 3

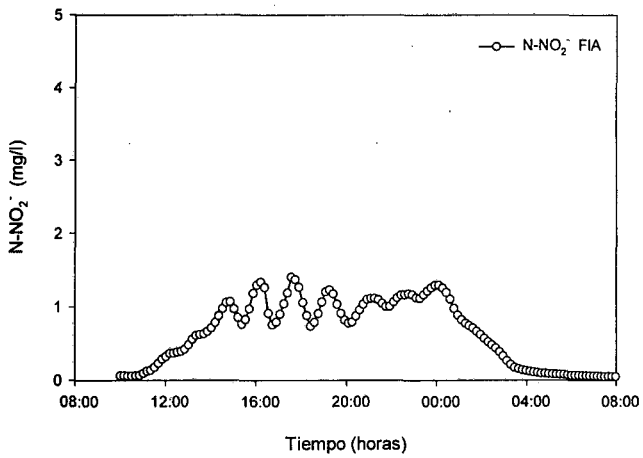
Fig. 5.41. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 21



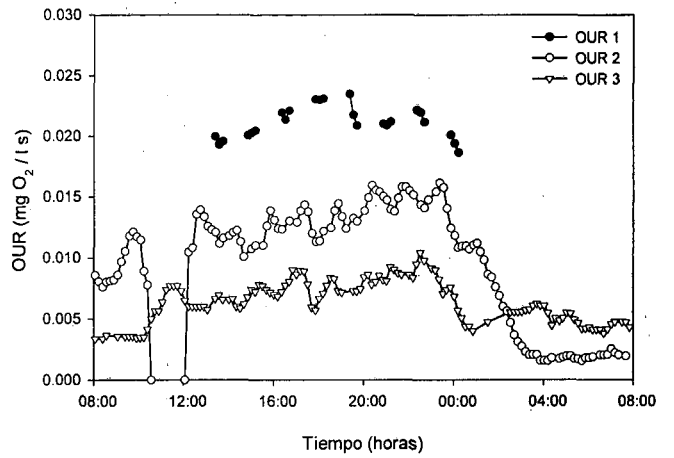
(g) Análisis del nitrógeno amoniacal "on-line" (CFA) de la salida



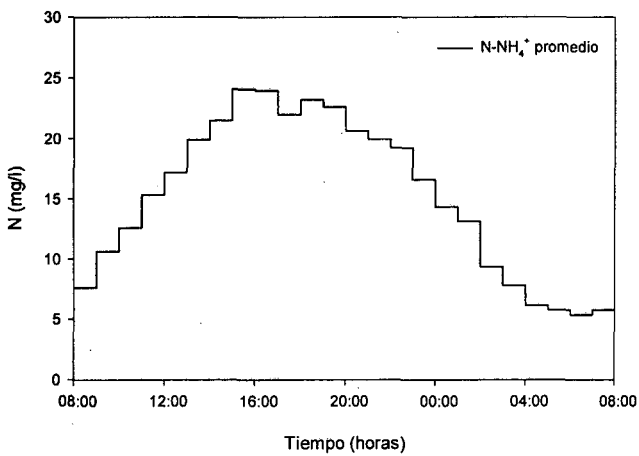
(h) Análisis de nitrato "on-line" (FIA) de la salida



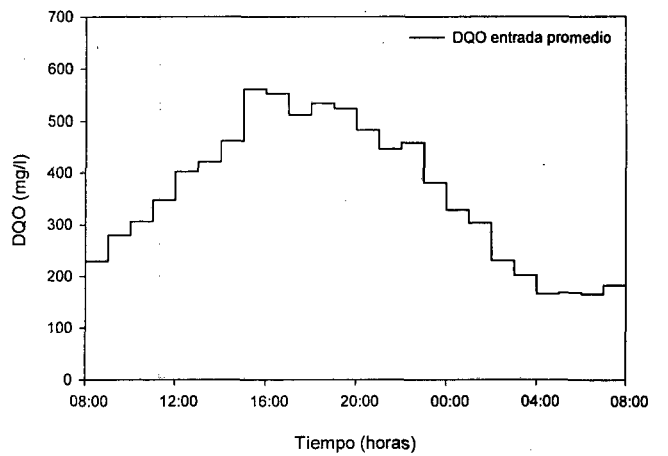
(i) Análisis de nitrito "on-line" (FIA) de la salida



(j) Velocidad de consumo de oxígeno (OUR) en los reactores aeróbicos



(k) Evolución del nitrógeno amoniacal en la entrada



(l) Evolución de la DQO de entrada de la planta

Fig. 5.41. Evolución de los parámetros del proceso. Experimento 21