



UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

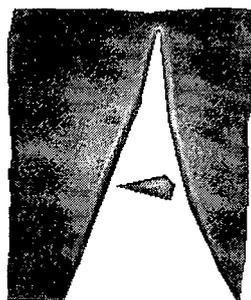
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIES

DESARROLLO E
IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA SUPERVISOR PARA
LA GESTIÓN Y CONTROL
DE EDAR

Memoria que para optar al grado de
doctor por la *Universitat Autònoma
de Barcelona* presenta

Juan Antonio Baeza Labat

13 de Julio de 1999



UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIES

DESARROLLO E
IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA SUPERVISOR PARA
LA GESTIÓN Y CONTROL
DE EDAR

Memoria que para optar al grado de
doctor por la *Universitat Autònoma
de Barcelona* presenta

Juan Antonio Baeza Labat

13 de Julio de 1999

FRANCISCO JAVIER LAFUENTE SANCHO,
Professor d'Enginyeria Química de la Universitat Autònoma de Barcelona.

CERTIFICA:

Que el llicenciat Juan Antonio Baeza Labat ha dut a terme, sota la seva direcció, el treball que, amb títol "desarrollo e implementación de un sistema supervisor para la gestión y control de EDAR", que presenta en aquesta memòria, la qual constitueix la seva Tesi per a optar al Grau de Doctor per la Universitat Autònoma de Barcelona.

I perquè en prengueu coneixement i tingui els efectes que correspongui, presentem davant la Escola Tècnica Superior d'Enginyeries de la Universitat Autònoma de Barcelona l'esmentada Tesi, signant aquesta certificació a

Bellaterra, 13 de Juliol de 1999



Fco. Javier Lafuente Sancho



ÍNDICE

1	Introducción.....	1
1.1	Legislación.....	2
1.2	Tratamientos biológicos de depuración.....	4
1.2.1	Eliminación de nitrógeno.....	5
1.2.1.1	El nitrógeno en el medio ambiente.....	5
1.2.1.2	El ciclo del nitrógeno.....	5
	El ciclo del nitrógeno en las aguas superficiales y sedimentos.....	7
1.2.1.3	Fuentes de nitrógeno.....	7
	Fuentes naturales.....	8
	Fuentes de origen humano.....	9
1.2.1.4	Efectos de los vertidos de nitrógeno de plantas depuradoras.....	9
	Bioestimulación del crecimiento de algas y plantas en aguas superficiales..	10
	Disminución del oxígeno disuelto por la nitrificación.....	10
	Toxicidad del amoníaco.....	10
	Salud pública.....	10
	Reutilización de aguas residuales.....	10
1.2.2	Nitrificación.....	10
1.2.3	Desnitrificación.....	12
1.2.4	Esquemas de eliminación de nitrógeno.....	13
1.2.5	Eliminación de fósforo.....	16
1.2.5.1	Ciclo del fósforo.....	16
1.2.5.2	Procesos implicados en la eliminación biológica de fósforo.....	16
	Metabolismo anaerobio.....	16
	Metabolismo aeróbico.....	17
	Parámetros que afectan a la eliminación biológica de fósforo.....	18
1.2.6	Microbiología de lodos activos.....	19
1.2.6.1	El flóculo.....	19
1.2.6.2	Las bacterias filamentosas.....	20
1.2.6.3	Los protozoos.....	20
1.2.6.4	La cadena trófica.....	22
1.3	Control de procesos.....	23
1.3.1	Objetivos del control.....	23
1.3.2	Técnicas de control.....	24
1.3.2.1	Control por retroalimentación.....	24
	Metodología de control por retroalimentación.....	24
	Elemento sensor.....	24
	Elemento acondicionador y transmisor.....	24
	Controlador.....	24
	Controlador ON/OFF.....	25
	Controladores PID.....	25
	Elemento final de control.....	26
1.3.2.2	Control anticipado.....	26
1.3.2.3	Control adaptativo.....	26
1.3.2.4	Técnicas avanzadas en el control de procesos.....	27
	Redes neuronales.....	28
	Lógica difusa (Fuzzy Logic).....	28
	Algoritmos genéticos.....	29
1.4	Sistemas expertos en control de bioprocesos.....	30
1.4.1	Arquitectura de Sistemas para Control Experto.....	30
1.4.2	Funciones del módulo basado en el conocimiento del sistema de control.....	31
1.4.3	Esquemas de implementación.....	32
1.4.4	Características requeridas a las herramientas de desarrollo de sistemas expertos.....	33
1.4.4.1	Características generales:.....	33
	Capacidades de tiempo real.....	33
	Razonamiento temporal.....	34
	Integración con módulos de software externos.....	34
	Mecanismos para estructurar el conocimiento.....	35
	Manejo de varias categorías y niveles de conocimiento.....	35
	Depuración e integración eficiente del conocimiento.....	36
	Respuesta a las preguntas del usuario.....	36

	Interfaz de usuario avanzada con capacidades gráficas.....	37
	Otras características.....	37
1.4.4.2	Características específicas para bioprocesos	37
	Campo limitado y profundidad aumentada	37
	Manejo de información incierta, incompleta y fuzzy	37
	Orientación hacia el procesado de variables continuas	37
	Capacidades de monitorización inteligente	38
	Disponibilidad de bases de conocimiento de bioprocesos comunes.....	38
	Tiempo corto de construcción de prototipos	38
	Bajo precio	38
1.5	Problemática del control en plantas depuradoras.....	40
1.5.1	Sistemas automáticos de toma de muestras.....	40
1.5.2	Analizadores.....	40
1.5.3	Técnicas de monitorización respirométricas	41
1.5.4	Estrategias de control en procesos de nitrificación / desnitrificación.....	43
2	Objetivos	45
3	Materiales y métodos.....	47
3.1	Planta piloto.....	47
3.2	Instrumentación	50
3.2.1	Depósitos y sistema de agitación	50
3.2.2	Sistemas de bombeo y trasvase de líquidos.....	50
3.2.3	Sistema de aireación.....	51
3.2.4	Sistema de entrada de agua	51
3.2.5	Elementos medidores	51
3.2.6	Elementos de control y supervisión	52
3.2.7	Accesorios.....	53
3.3	Métodos analíticos.....	54
3.3.1	Toma de muestra y pretratamiento.....	54
3.3.2	Medida de caudales.....	54
3.3.3	Demanda química de oxígeno.....	54
3.3.4	Fosfato.....	55
3.3.5	Nitrato y nitrito.....	56
3.3.6	Nitrógeno total (NT)	57
3.2.7	Sólidos en suspensión totales (SST).....	57
3.2.8	Sólidos en suspensión volátiles (SSV).....	57
3.2.9	Sedimentabilidad.....	58
3.4	Métodos analíticos automáticos.....	59
3.4.1	Nitrato y nitrito.....	59
3.4.2	Amonio	60
3.5	Microbiología	61
3.5.1	Toma de muestra y conservación.....	61
3.5.2	Observación general.....	61
3.5.2.1	Observación microscópica de las características del flóculo	61
3.5.2.2	Efecto de los filamentos sobre la estructura del flóculo	61
3.5.2.3	Recuento simplificado de los filamentos	61
3.5.2.4	Identificación de la microfauna	62
3.5.3	Cuantificación de la microfauna	62
3.5.4	Identificación de los organismos filamentosos	63
Tinción de Gram	63	
Tinción de Neisser.....	64	
Test de acumulación de sulfuro.....	64	
3.6	Composición alimento.....	65
Preparación concentrado de fuente de nitrógeno.....	65	
Preparación concentrado de fuente de carbono	65	
3.7	Comunicaciones	66
3.7.1	Transmisión analógica	66
3.7.2	Transmisión digital	66
3.7.2.1	RS-232-C.....	67

3.7.2.2	RS-422-A	69
3.7.2.3	RS-485	70
3.7.2.4	Conversión RS-232-C / RS-485	71
3.7.2.5	Red local. Ethernet	72
3.8	Lenguajes de programación	74
3.8.1	PLC (lenguaje CLIPCAT)	74
3.8.2	Lenguaje de programación C	75
3.8.3	G2	76
3.8.4	HTML	77
	PERL	78
3.9	Sistemas operativos	79
3.9.1	DOS	79
3.9.2	UNIX	79
4	Desarrollo e implementación del sistema supervisor	81
4.0	Introducción	81
4.1	Planta piloto	83
4.1.1	Características generales	83
4.1.2	Esquemas de operación implementables en la planta piloto	84
4.2	Sensores y actuadores	86
4.2.1	Sondas	86
4.2.2	Analizadores	87
4.2.3	Válvulas	87
4.2.4	Agitadores	88
4.2.5	Control de oxígeno	88
4.2.5.1	Adquisición medida oxígeno	89
4.2.5.2	Actuación del control de oxígeno	90
	Estimación de parámetros	90
4.2.6	OUR	92
4.2.7	PLC	95
	Control de nivel	96
4.2.8	Sistema de alimentación	98
4.2.9	Sistema de recirculación	99
4.3	Programas de gestión local	100
4.3.1	Programa de control de la planta piloto	100
4.3.2	Programa de control del sistema analítico	107
4.4	Gestión integrada de la información. servidor de datos y HTML	111
4.4.1	Transmisión de datos TCP/IP	111
4.4.1.1	Sockets	112
4.4.1.2	El proceso servidor	112
4.4.1.3	El proceso cliente	114
4.4.1.4	Memoria compartida	114
4.4.1.5	Semáforos	116
4.4.1.6	Aplicación	117
4.4.1.7	Comunicación SUN - G2	117
4.4.1.8	Configuración de la base de conocimiento de G2	119
4.4.2	Transmisión de datos HTML	120
4.5	Sistema supervisor	122
4.5.1	Arquitectura del sistema supervisor	122
4.5.1.1	Nivel de control local	123
4.5.1.2	Nivel de datos	123
	Ordenador de monitorización y control a SE:	123
	Ordenador de control del sistema analítico a SE:	123
	Servidor HTML a SE:	123
	Consignas enviadas desde el SE:	123
4.5.1.3	Nivel de conocimiento distribuido	124
4.5.1.4	Nivel de control supervisor	124
4.5.2	Sistema experto	125
4.5.2.1	Características generales	125
4.5.2.2	Monitorización gráfica	128

4.5.2.3	Módulo supervisor	131
4.5.2.4	Módulo de los bioreactores.....	132
4.5.2.5	Módulo del Sistema de bombeo.....	133
4.5.2.6	Módulo del Sistema de alimentación.....	133
4.5.2.7	Módulo de Economía del proceso	134
4.5.2.8	Módulo de Eliminación de DQO	134
4.5.2.9	Módulo de Eliminación de nutrientes	135
4.5.2.10	Módulo de Microorganismos.....	139
4.5.2.11	Módulo de Tiempo de residencia celular.....	140
4.5.2.12	Módulo de Analizadores.....	141
4.5.2.13	Módulo de Base de Datos	141
4.5.2.14	Supervisión y control remoto.....	141
4.5.3	Conclusiones	143
5	Validación experimental en planta piloto	145
5.1	Análisis de la respuesta del proceso	145
5.1.1	Eliminación de nitrógeno	146
5.1.1.1	Diseño de experimentos.....	146
5.1.1.2	Resultados experimentales.....	147
	Evolución del nitrógeno en el reactor 3.....	147
	Estudio de las velocidades de nitrificación	149
	Eliminación de nitrógeno total	150
5.1.2	Desnitrificación.....	152
5.1.2.1	Diseño experimental	152
5.1.2.2	Resultados de eliminación	153
5.1.2.3	Potencial Redox	154
5.2	Análisis de diferentes estrategias de control.....	157
5.2.1	Diseño experimental	157
5.2.2	Estrategias de control	157
5.2.3	Perfil de alimentación	158
5.2.4	Monitorización.....	160
5.2.5	Informe de resultados.....	161
5.2.6	Experimentos	162
	Experimento 1.....	165
	Experimento 2.....	169
	Experimento 3.....	173
	Experimento 4.....	177
	Experimento 5.....	181
	Experimento 6.....	185
	Experimento 7.....	189
	Experimento 8.....	193
	Experimento 9.....	197
	Experimento 10.....	201
	Experimento 11.....	205
	Experimento 12.....	209
	Experimento 13.....	213
	Experimento 14.....	217
	Experimento 15.....	221
	Experimento 16.....	225
	Experimento 17.....	229
	Experimento 18.....	233
	Experimento 19.....	237
	Experimento 20.....	241
	Experimento 21.....	245
	Experimento 22.....	249
	Experimento 23.....	253
	Experimento 24.....	257
	Experimento 25.....	261

5.2.7	Análisis de resultados	265
5.2.7.1	Efecto de la relación de recirculación externa	266
5.2.7.2	Efecto de los ciclos anóxicos - aeróbicos en el reactor 1.....	267
	Variación de pH y redox	269
5.2.7.3	Reproducibilidad de la respuesta.....	271
5.2.7.4	Efecto de la consigna de oxígeno en los reactores 2 y 3.....	272
5.2.7.5	Efecto de la recirculación interna	273
5.2.7.6	Efecto de la relación de recirculación externa variable	275
5.2.7.7	Efecto simultáneo de todas las estrategias de control.....	277
5.2.7.8	Comportamiento del sistema ante diferentes entradas.....	278
5.2.7.9	Efecto del sedimentador	279
5.2.7.10	Mejora global obtenida mediante el sistema de control	281
5.2.7.11	Eliminación de fósforo	282
6	Implementación y validación en planta real. EDAR Granollers	283
6.1	Sistema de adquisición de datos	285
6.2	Sistema Experto	287
6.3	Aplicación	288

1 INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Todo ser vivo genera residuos durante su actividad. En condiciones naturales, estos residuos son transformados o dispersados por la naturaleza, que dispone de una determinada capacidad de autodepuración. Inicialmente, el hombre también vivía en un entorno y con unas necesidades que permitían mantener el estilo de vida natural. Pero la aparición de grandes áreas urbanas, unida a la agricultura y ganadería intensivas, ha provocado que la generación de residuos supere la capacidad de autodepuración del medio y, en consecuencia, se han creado problemas ambientales producidos por el exceso de residuos.

En el caso de las aguas residuales, se pensó que todo el problema se solucionaría diluyendo y dispersando los residuos, mediante vertidos a ríos y mares. La dilución, unida a la capacidad de autodepuración, se suponía que sería suficiente para solucionar el problema. Esto pudo mantenerse hasta la aparición de grandes vertidos provenientes de áreas urbanas o industriales que superaban la capacidad de depuración del medio. La naturaleza no es una fuente inagotable de recursos hídricos, por lo que actualmente es necesario el ahorro, la reducción de su contaminación y su limpieza una vez utilizada, para no romper el equilibrio natural.

La gestión incorrecta de las aguas residuales puede provocar diversos problemas ambientales, como la contaminación de aguas utilizadas para su potabilización y posterior consumo, o la presencia de sustancias que provocan graves perjuicios a la vida acuática. La aparición de estos problemas es consecuencia de modelos de desarrollo ambientalmente destructivos. La sensibilización pública sobre estos problemas ambientales ha provocado la voluntad política de minimización y eliminación de estos residuos.

Los problemas ambientales generados por estos residuos, impulsaron la necesidad de encontrar

métodos de tratamiento capaces de ayudar a la capacidad natural de depuración, con el objeto de restablecer las condiciones originales. El aumento de los vertidos, unido a las cada vez más importantes restricciones legales, han obligado a dedicar un gran esfuerzo en la mejora y desarrollo de procesos de tratamiento, así como a su control para optimizar los rendimientos de depuración.

La introducción de limitaciones en los vertidos de nitrógeno o fósforo, añadidos a las ya existentes de materia orgánica o sólidos en suspensión, ha aumentado la complejidad de los procesos de depuración. Esta complejidad ha provocado la necesidad de sistemas de control más desarrollados, que permitan la monitorización y el control de los nuevos procesos utilizados. Los nuevos requerimientos incrementan el número de posibles problemas que pueden aparecer durante el funcionamiento de una planta depuradora, por lo que se hace todavía más necesaria la disponibilidad de herramientas como la monitorización con analizadores automáticos y el control de procesos para tratar adecuadamente los residuos.

La presente tesis se enmarca dentro del desarrollo y utilización de herramientas de monitorización y control sobre procesos de depuración biológica. En ella se plantea la posible implementación de un sistema experto como el elemento superior de supervisión y control de un sistema de control distribuido de una planta depuradora de aguas residuales urbanas. Esta arquitectura puede producir un sistema de control autónomo y capaz de adaptarse a los diferentes problemas que pueden aparecer en una planta real, por lo que parece una buena alternativa respecto a los sistemas de control convencionales. Éstos tienen un comportamiento correcto en situaciones normales, pero son incapaces de manejar todas las situaciones problemáticas que aparecen durante la operación.

1.1 LEGISLACIÓN

La composición del agua residual urbana obliga a su depuración antes del vertido. Se han legislado diferentes limitaciones a cumplir dependiendo del núcleo de población que la origina y de la cuenca receptora del vertido.

El tipo y cantidad de agua residual del influente a una planta depuradora refleja la naturaleza del área que contribuye, el uso del agua y las condiciones del medio de conducción. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, el agua residual puede ser definida como una combinación de líquido arrastrando residuos eliminados de viviendas, instituciones, comercios, industrias; unido a aguas subterráneas, superficiales y posibles aguas procedentes de lluvia. En la Tabla 1.1 se muestra el margen de composiciones habitual en un agua residual urbana.

Componentes	Intervalo de concentraciones			
	mg/l	alto	medio	bajo
Materia sólida disuelta total	1200	720	350	
inorgánica	850	500	250	
orgánica	525	300	145	
en suspensión	325	200	105	
inorgánica	350	220	100	
orgánica	75	55	20	
Sólidos decantables	275	165	80	
DBO ₅	20	10	5	
COT	400	220	110	
DQO	290	160	80	
Nitrógeno (N total)	1000	500	250	
orgánico	85	40	20	
amoniaco	35	15	8	
nitrito	50	25	12	
nitrato	0	0	0	
Fósforo (P total)	0	0	0	
orgánico	15	8	4	
inorgánico	5	3	1	
Cloruro	10	5	3	
Alcalinidad	100	50	30	
Grasas	200	100	50	
CT (NMP/100 ml)	150	100	50	
CF (NMP/100 ml)	-	22·10 ⁶	-	
Virus (UFP/100 ml)	-	8·10 ⁶	-	
	-	5	-	

Tabla 1.1. Composición habitual del agua residual urbana.

La legislación es una herramienta fundamental para la regulación de la calidad de las aguas. Fija unos límites de contaminación y su incumplimiento comporta sanciones de tipo económico.

A partir de 1985, la situación de la depuración en España ha experimentado un importante avance con la implementación de nuevos sistemas de saneamiento. Para hacer esto posible, se han elaborado normativas y establecido directivas en el ámbito comunitario, estatal y autonómico que con el transcurso del tiempo se han ido mejorando e implementando.

La legislación española vigente es el Real Decreto 849/1986 (B.O.E., 1996). Define los límites de vertido de los parámetros característicos según tres tablas, que representan diferentes criterios de tolerancia (Tabla 1.2). La Tabla 1 es la más permisiva y la 3 la más restrictiva. La Administración debe fijar en cada caso que tabla se aplica, en función de las características del vertido y de la naturaleza del medio receptor.

Parámetro	Tabla 1	Tabla 2	Tabla 3
SST (mg/l)	300	150	80
DQO (mgO ₂ /l)	500	200	160
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	20	12	10
Cl ⁻ (mg/l)	2000	2000	2000
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2000	2000	2000
pH	5.5-9.5	5.5-9.5	5.5-9.5

Tabla 1.2. Parámetros característicos

Por otro lado, la legislación comunitaria exige unas características de vertido (Tabla 1.3), mediante la Directiva 91/271.

Parámetro	Concentración	Porcentaje de reducción mínimo ⁽²⁾
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ a 20 °C sin nitrificación) ⁽¹⁾	25 mg/l O ₂	70-90 %
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75 %
Sólidos en suspensión total	35 mg/l	90 %

⁽¹⁾ Este parámetro puede substituirse por otro: Carbono Orgánico Total (COT) o Demanda Total de Oxígeno (DTO) si puede encontrarse una correlación entre DBO₅ y el parámetro substitutivo.

⁽²⁾ Reducción relacionada con la carga de caudal a la entrada.

Tabla 1.3. Legislación europea respecto DBO, DQO y SST

Estos requisitos deben ser cumplidos por todos los núcleos de más de 2000 habitantes equivalentes que viertan a aguas continentales y, en general para todos los núcleos de más de 10000 habitantes equivalentes.

La Directiva de la Unión Europea también define un calendario y unos niveles de depuración en función de la sensibilidad del medio receptor (Tabla 1.4). Si el medio es calificado como zona sensible, es obligatorio eliminar materia orgánica y el exceso de nutrientes (en particular nitrógeno y fósforo). Como zona sensible se define lagos, masas de agua dulce, estuarios y aguas costeras con peligro de eutrofización.

La implementación de la Directiva europea se hará progresivamente. El plazo máximo de ejecución fijado (Tabla 1.5) varía dependiendo del tipo de zona y del número de habitantes equivalentes.

En la legislación actual se han marcado valores más restrictivos para la eliminación de materia orgánica, pero también se ha puesto énfasis en la eliminación de nitrógeno y fósforo. Estos nuevos requerimientos han obligado al rediseño de procesos de eliminación y a la creación de procesos totalmente nuevos que puedan cumplir con los límites legislados.

Parámetro	Concentración	Porcentaje de reducción mínimo
Fósforo total	2 mg/l P (de 10.000 a 100.00 hab-equ.)	80 %
	1 mg/l P (más de 100.000 hab-equ.)	
Nitrógeno total	15 mg/l N (de 10.000 a 100.000 hab-equ.)	70 - 80 %
	10 mg/l N (más de 100.000 hab-equ.)	

Tabla 1.4. Legislación europea respecto al nitrógeno y al fósforo.

Implementación de la directiva 91/271/1991	Habitantes equivalentes		
	2000-10000	10000-15000	15000-150000
Colectores zonas sensibles	31/12/2005	31/12/1998	31/12/1998
Colectores del resto de zonas	31/12/2005	31/12/2005	31/12/2000
Tratamiento secundario zona sensible	31/12/2005	31/12/1998	31/12/1998
Tratamiento secundario de vertido a aguas dulces o estuarios	31/12/2005	31/12/2005	31/12/2000
Tratamiento secundario zonas restantes		31/12/2005	31/12/2000

Tabla 1.5. Plazo de ejecución fijado por la normativa europea

En lo referente a Catalunya, hay que decir que la calidad de las aguas ha mejorado considerablemente desde la creación del 'Departament de Medi Ambient' en 1991 y del traspaso de la 'Junta de Saneament' a este departamento. Desde entonces se han destinado muchos recursos a la construcción de nuevas instalaciones y a la mejora de las ya existentes. A finales de 1998 se disponía de cerca de 300 depuradoras de aguas residuales urbanas, que permiten el saneamiento de las aguas de todas las poblaciones de más de 2000 habitantes equivalentes, de acuerdo con la Directiva Europea 91/271 (C.C.E., 1991).

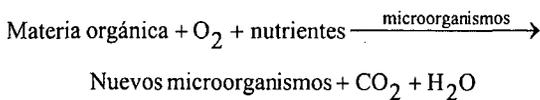
A pesar de los esfuerzos que se están realizando para mejorar la situación actual, debe continuarse trabajando para conseguir una mejor calidad y gestión de las aguas.

1.2 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE DEPURACIÓN

El proceso más utilizado para el tratamiento de las aguas residuales urbanas es el conocido como lodos activos. Se fundamenta en el cultivo de una población compleja de microorganismos (bacterias, protozoos, metazoos, hongos, etc.) que degradan la materia orgánica presente en el medio mediante el aporte de oxígeno. Los microorganismos del cultivo no tienen por qué ser una población introducida, sino los que naturalmente se presentan en los residuos. Las condiciones de agitación, aireación y alimentación son los factores fundamentales que determinan el crecimiento de unas especies u otras y, por tanto, la población final presente en los lodos activos.

Una buena depuración depende del buen desarrollo de la comunidad microbiana, y debe tender hacia una fauna capaz de asimilar la carga recibida y con propiedades floculantes para que pueda ser separada fácilmente por decantación.

Una representación de la reacción que tiene lugar en la eliminación de la materia orgánica biodegradable que llega a la planta puede ser la siguiente:



Esta simple ecuación incluye una serie de complejas reacciones bioquímicas que se pueden simplificar en tres actividades fundamentales:

- Oxidación: obtención de energía mediante la conversión de la materia orgánica en productos como CO_2 y H_2O .
- Síntesis: conversión de una parte de la materia orgánica en nueva biomasa con la ayuda de la energía obtenida con la oxidación.
- Autooxidación: obtención de energía mediante la conversión de algunos constituyentes celulares

en productos energéticamente inferiores.

Los diferentes tratamientos aplicables en los procesos de depuración de aguas residuales urbanas se clasifican de un modo muy general como pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. En la práctica ninguno de ellos se da sólo en una planta depuradora, siendo la combinación más habitual la de un tratamiento primario y un secundario.

Pretratamiento. Se sitúa en la cabecera de la planta, y tiene la finalidad básica de eliminar cualquier material que pueda estropear la maquinaria presente en la planta, o que desestabilice el proceso. Usualmente se eliminan sustancias como maderas, ramas, plásticos, piedras, grasas, espumas, sulfhídrico, tóxicos y otros parecidos. Los métodos y maquinaria habituales para eliminar estos materiales pueden incluir: adiciones químicas, preaeraciones, rejillas, desarenadores y recogedores de flotantes. El pretratamiento puede consistir en una sola operación unitaria o en una combinación de diversas operaciones.

Tratamiento primario. En este proceso se elimina el material en suspensión y los flotantes. Si está bien diseñado y funciona correctamente, puede tener unos rendimientos de eliminación de hasta el 60-75 % de los sólidos en suspensión del influente y entre el 20-35 % de DBO_5 . Este tratamiento se basa generalmente en diferentes operaciones de separación física.

Tratamiento secundario. Supone un grado de depuración superior respecto a los anteriores. En esta etapa se elimina la materia orgánica biodegradable restante. Generalmente se trata de un proceso biológico, bien en un cultivo libre (proceso de lodos activos) o con microorganismos inmovilizados (filtros percoladores, lechos fijos, biodiscos...). El sistema se basa en el mantenimiento de una población mixta que en presencia de oxígeno que consume la materia orgánica biodegradable disuelta en el agua, con el objetivo de mantener su

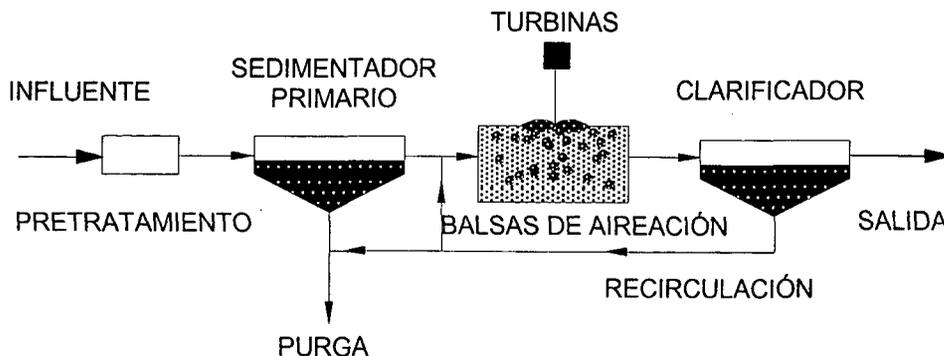


Fig. 1.1. Proceso de lodos activos.

ciclo vital y para producir nuevos microorganismos. Además de la capacidad para asimilar la carga orgánica recibida, la población debe ser capaz de formar flóculos para que pueda ser separada fácilmente en un sedimentador posterior.

Tratamiento terciario. También se le conoce como tratamiento avanzado. Es utilizado para reducir el contenido en nutrientes del agua (nitrógeno y fósforo), así como para disminuir el contenido de materia orgánica en el agua. Con la aparición de las nuevas leyes, muchas plantas depuradoras diseñadas para la eliminación de compuestos orgánicos deberán adaptarse para poder hacer frente a los nuevos niveles exigidos. En este tratamiento también puede incluirse una desinfección para eliminar microorganismos patógenos del agua.

1.2.1 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

La aplicación de procesos para controlar las descargas de aguas residuales al medioambiente acuático ha estado generalmente dirigida a la eliminación de materia orgánica oxidable. La eliminación de otros constituyentes del agua residual ha comenzado a recibir atención los últimos años. El control de nitrógeno ha sido identificado como una importante actividad medioambiental, demostrado por los adversos fenómenos provocados en los sistemas acuáticos por los niveles excesivos de sus diferentes especies.

Los primeros procesos de oxidación de amonio fueron aplicados en Inglaterra a mediados de este siglo. Desde entonces, la tendencia en la aplicación del control de nitrógeno ha sido en favor de los procesos de eliminación biológica. Los procesos biológicos de eliminación de materia orgánica son adaptables a los procesos de eliminación de nitrógeno. Estos procesos también minimizan el uso de compuestos químicos incompatibles con el medioambiente, además de obtener generalmente mejores rendimientos de eliminación que los procesos químicos.

1.2.1.1 EL NITRÓGENO EN EL MEDIO AMBIENTE.

La masa total de nitrógeno en la biosfera circula entre cuatro zonas principales: la atmósfera, la hidrosfera, la corteza terrestre y los tejidos de los animales vivos y muertos. Cada zona contiene nitrógeno en diversas formas. Aunque el total no cambia, existen flujos de materia continuos entre las diferentes zonas. En el mundo natural, en contraste con uno influido por las actividades humanas, se puede considerar que estos flujos se encuentran en estado estacionario. Dos actividades principales desplazan el balance de nitrógeno del estado

estacionario: 1) la extracción minera y la utilización de minerales e hidrocarburos que han estado fuera de la circulación de nitrógeno y 2) la fijación de nitrógeno gas debido a la industria química y al cultivo de leguminosas, plantas capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Desgraciadamente, la hidrosfera se ha convertido en la zona donde se acumula el exceso de nitrógeno utilizado en la actividad humana. En consecuencia, han aparecido algunos efectos indeseables de la acumulación de nitrógeno en el medio ambiente acuático. La calidad del agua puede ser afectada y los beneficios potenciales del uso de los sistemas acuáticos naturales pueden disminuir. El nitrógeno, en sus diferentes formas, puede disminuir el nivel de oxígeno de los lechos receptores, estimular el crecimiento de determinadas especies, producir toxicidad en la vida acuática, ocasionar daños en la salud pública y afectar a la posibilidad de reutilización del agua.

1.2.1.2 EL CICLO DEL NITRÓGENO.

El nitrógeno en el medio ambiente puede existir en diversas formas. El movimiento y transformación de estos compuestos de nitrógeno en la biosfera está caracterizado por el ciclo del nitrógeno (figura 1.2). La atmósfera sirve como una reserva de nitrógeno en forma gas. Aunque es virtualmente inagotable (la atmósfera es nitrógeno en un 79%), el nitrógeno debe combinarse con hidrógeno o oxígeno antes de poder ser asimilado por las plantas superiores. Las plantas, a su vez, son consumidas por los animales. La intervención humana, a través de los procesos industriales de fijación de nitrógeno y mediante el cultivo intensivo de plantas leguminosas fijadoras de nitrógeno, ha jugado un importante papel en alterar el ciclo del nitrógeno. La cantidad de nitrógeno fijada anualmente por estos dos mecanismos excede en más de un 10% la cantidad de nitrógeno fijada por el ecosistema terrestre antes de la aparición de la agricultura (Delwiche, 1970).

El nitrógeno puede formar una variedad de compuestos por sus diferentes estados de oxidación.

En el medio ambiente, la mayor parte de los cambios de un estado de oxidación a otro se producen biológicamente. Las formas del nitrógeno de mayor interés en el medio ambiente de suelo y agua se presentan en la tabla 1.6.

Compuesto de nitrógeno	Fórmula	Estado de oxidación
Amoníaco	NH_3	-3
Ion amonio	NH_4^+	-3
Nitrógeno	N_2	0
Ion nitrito	NO_2^-	+3
Ion nitrato	NO_3^-	+5

Tabla 1.6. Formas de nitrógeno principales

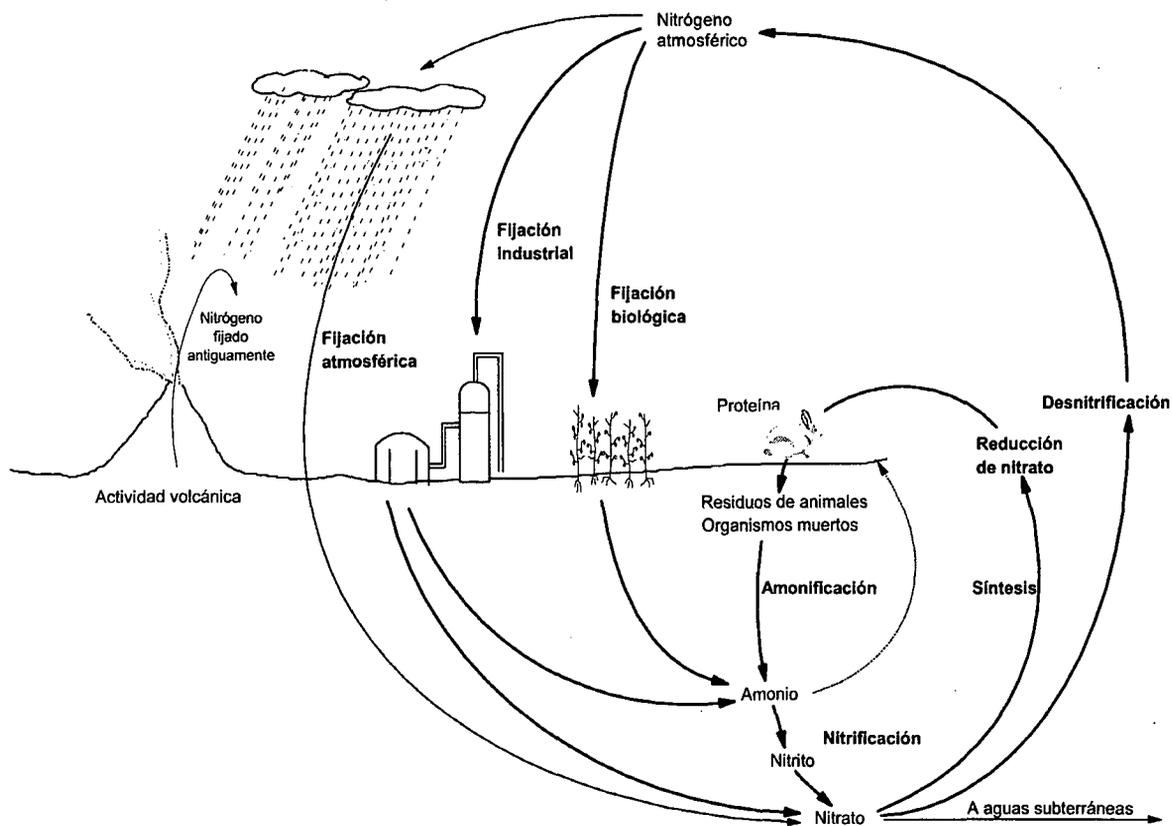


Fig. 1.2. El ciclo del nitrógeno

El amoniaco existe en equilibrio con el ion amonio, la distribución del cuál depende del pH y la temperatura. De hecho, existe muy poco amoniaco a pH inferior al neutro.

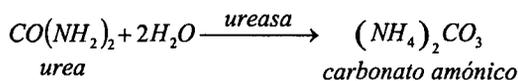
La transformación de estos compuestos nitrogenados puede producirse a través de diferentes mecanismos. Los mecanismos de importancia incluyen fijación, amonificación, síntesis, nitrificación y desnitrificación. Cada mecanismo puede ser efectuado por microorganismos determinados, con ganancia o pérdida de energía. Las consideraciones energéticas juegan un importante papel en determinar que reacción tiene lugar.

- La fijación del nitrógeno es la incorporación de nitrógeno gaseoso inerte en un compuesto químico utilizable por plantas y animales. La fijación del nitrógeno de N₂ gas a nitrógeno orgánico está producida principalmente por microorganismos especializados, en asociación con plantas. La fijación atmosférica por relámpagos y procesos industriales de fijación (fertilizantes y otros compuestos químicos) juega un papel pequeño, pero importante, como método de fijación. Los diferentes procesos de fijación producen los compuestos mostrados en la tabla 1.7.

	Proceso de fijación	Producto
N ₂ gas ⇒	Biológico	Compuestos orgánicos nitrogenados
	Relámpagos	Nitrato
	Industrial	Amonio, nitrato

Tabla 1.7. Productos de los procesos de fijación

- La amonificación es la transformación de nitrógeno orgánico a la forma de amonio. Una importante reacción de hidrólisis tiene lugar a partir de urea, un compuesto nitrogenado presente en la orina:



En general, la amonificación ocurre durante la descomposición de tejidos de plantas y animales y de materia fecal animal:



- La síntesis o asimilación es un mecanismo bioquímico que usa los compuestos de amonio y

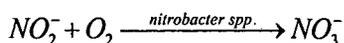
nitrito para formar proteínas vegetales y otros compuestos nitrogenados:



Los animales requieren proteínas de las plantas y de otros animales. Con algunas excepciones, no son capaces de transformar nitrógeno inorgánico en una forma orgánica.



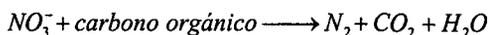
- La nitrificación es la oxidación biológica de amonio. Esta se realiza en dos etapas, primero a la forma de nitrito y después a la forma de nitrito. Dos géneros de bacterias quimioautotróficas realizan estas etapas, utilizando carbono inorgánico como fuente de carbono celular:



Los géneros de bacterias a los que se atribuyen estos procesos son *nitrosomonas spp.* y *nitrobacter spp.*, aunque recientemente se han efectuado estudios (Burrell, 1998) que demuestran que estas no son las especies más comunes en los procesos de lodos activos.

Las dos reacciones están generalmente acopladas, procediendo rápidamente a la forma de nitrito. Los niveles de nitrito suelen ser relativamente bajos. El nitrito formado puede ser utilizado en el crecimiento de plantas superiores, o puede ser reducido posteriormente mediante la desnitrificación.

- Desnitrificación es la reducción biológica de nitrito a nitrógeno gas. Este proceso se produce en varias etapas intermedias que conducen a la producción de nitrógeno gas. Un amplio conjunto de bacterias heterotróficas puede realizar el proceso. Estas bacterias requieren de carbono orgánico como fuente de energía.



Si hay oxígeno y nitrito presentes, la bacteria utilizará generalmente el oxígeno para la oxidación de la materia orgánica porque produce un mayor rendimiento energético. De este modo, para que la desnitrificación tenga lugar, deben existir condiciones anóxicas, aunque este no sea estrictamente el caso para todas las especies de bacterias.

Los procesos de amonificación, síntesis, nitrificación y desnitrificación son los mecanismos utilizados para la eliminación de nitrógeno en el tratamiento de aguas residuales.

El ciclo del nitrógeno en las aguas superficiales y sedimentos

Una representación del ciclo del nitrógeno aplicable a las aguas superficiales se muestra en la figura 1.3. Tal como se puede observar, el nitrógeno puede introducirse en las aguas superficiales mediante precipitaciones y partículas depositadas desde la atmósfera, a través de la escorrentía superficial, por la entrada de agua proveniente del subsuelo, o por descarga directa de aguas residuales. El nitrógeno gas también puede ser fijado por algunas algas azules-verdes fotosintéticas, así como por algunas especies de bacterias.

Dentro del ambiente acuático pueden producirse procesos de amonificación, nitrificación, síntesis y desnitrificación. La amonificación de la materia orgánica es realizada por microorganismos. El amonio formado, junto al nitrito, puede ser asimilado por algas y plantas acuáticas para síntesis. Si el crecimiento es excesivo, se pueden crear problemas de calidad del agua.

También es posible la nitrificación biológica, ocasionando el consumo del oxígeno presente en el agua, lo que puede provocar problemas a las especies aeróbicas del sistema. Si existe presencia de nitrito y ausencia de oxígeno se puede producir la desnitrificación, que genera nitrógeno gas liberado a la atmósfera. Estas condiciones son habituales en las capas inferiores de agua y en los sedimentos.

1.2.1.3 FUENTES DE NITRÓGENO

La comprensión de las diferentes fuentes de materia nitrogenada ofrece una perspectiva de la contribución de las EDAR a los efectos acumulativos del nitrógeno en el ambiente. El estudio de estas fuentes puede influenciar en las decisiones referentes al tipo y nivel de tratamiento más adecuado para cada localización particular. Al analizar el problema del nitrógeno, debe ponerse atención en asegurar que todas las posibles fuentes de polución son investigadas y que la cantidad de cada una de ellas es estimada con precisión. Una vez realizadas las estimaciones y utilizadas en relación con los estudios de calidad del agua, las medidas para el control de nitrógeno pueden ser orientadas a las más significativas fuentes y, específicamente, al tipo de impacto particular de cada fuente. El estudio de las diversas fuentes puede utilizarse también para replantear el grado de depuración necesario en algunos sistemas en particular. Por ejemplo, en los lagos Okanagan Valley de Canadá, se está

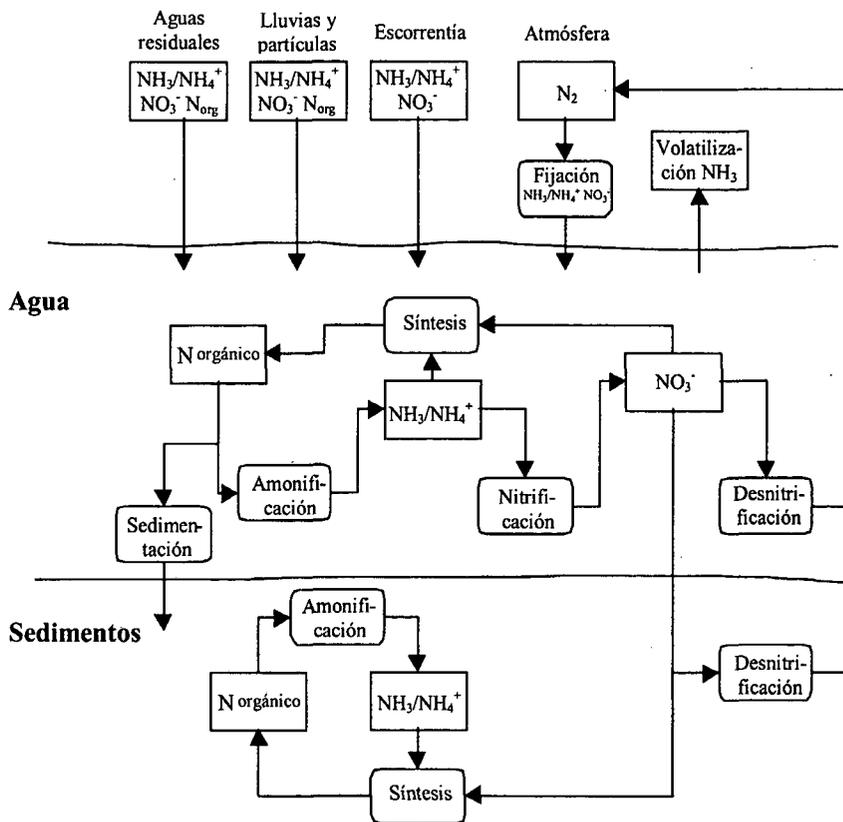


Fig. 1.3. El ciclo del nitrógeno en las aguas superficiales

empezando a plantear la disminución del grado de depuración de nutrientes para incrementar la población de peces (Forty, 1998). En otros sistemas sin exceso de nitrógeno en el medio, se puede replantear la eliminación de nitrógeno a únicamente nitrificar, para evitar el aporte concentrado de amonio, sin variar el aporte total de nitrógeno al medio pero evitando los problemas ocasionados por la concentración excesiva de amonio en una determinada zona.

Las fuentes de nitrógeno pueden clasificarse en dos grandes grupos, en función de su origen: naturales y originadas por la actividad humana.

Fuentes naturales

Los mecanismos naturales de transporte de nitrógeno incluyen las precipitaciones, la deposición de partículas, la escorrentía no urbana ni agrícola y la fijación biológica.

El nitrógeno medido en las precipitaciones es el resultado de la solubilización o el arrastre de partículas presentes en la atmósfera. Estos

componentes naturales incluyen óxidos de nitrógeno fijados por relámpagos o emitidos en erupciones volcánicas, partículas arrastradas por el viento de áreas naturales y amonio liberado por materia orgánica en descomposición.

Las cantidades de nitrógeno en la escorrentía no urbana ni agrícola tiene una gran variación, dependiendo de las características erosivas del suelo y de la migración de partículas de áreas urbanas o industriales cercanas.

La fijación biológica puede añadir nitrógeno a las aguas superficiales directamente o a través de las aguas subterráneas mediante lixiviados del suelo. Es especialmente importante el papel de esta fijación en la eutrofización de los lagos, pues el nitrógeno introducido mediante este proceso es considerable. Las algas azules-verdes fotosintéticas de las especies *Nostic*, *Anabaena*, *Gleotrichia* y *Calathrix* son las fijadoras de nitrógeno más comunes.

Por último, la fijación de nitrógeno mediante relámpagos puede ser no despreciable respecto al total fijado naturalmente.

Fuentes de origen humano

Las fuentes de nitrógeno relacionadas con la actividad humana incluyen aguas residuales urbanas (tratadas y no tratadas), residuos industriales, lixiviados, deposición atmosférica y escorrentía superficial.

Aguas residuales urbanas. Las aguas residuales urbanas sin tratar pueden contener valores de nitrógeno total entre 20 y 85 mg/l. Este nitrógeno se divide principalmente en un 60% de nitrógeno amoniacal y un 40% de nitrógeno orgánico, unido a pequeñas cantidades de nitrato. En sistemas combinados de alcantarillado, donde las aguas de lluvia se mezclan con las aguas residuales, la concentración puede variar radicalmente. Puede producirse un pico de carga provocado por el lavado del área de transporte con el agua de lluvia, así como concentraciones muy reducidas si las lluvias persisten.

Aguas residuales urbanas tratadas. Pueden mostrar una amplia variedad de concentraciones de nitrógeno, dependiendo del tratamiento aplicado. Un sistema de lodos activos convencional reduce el total de nitrógeno mediante la síntesis celular y la eliminación de sólidos. En estos sistemas, el amonio no es eliminado si no existe un tratamiento de nitrificación. Para obtener reducciones mayores del 20-30 % se requiere también un proceso de desnitrificación. Con sistemas convencionales de lodos activos se obtienen concentraciones en los efluentes de 15 a 35 mg/l de nitrógeno total. Los tratamientos avanzados de nitrificación-desnitrificación pueden obtener concentraciones del efluente de 2 a 10 mg/l.

Aguas residuales industriales. Las industrias utilizan importantes cantidades de nitrógeno en diversas formas. Algunas de las industrias que generan más residuos con nitrógeno son industrias químicas (fertilizantes y fabricación de compuestos de nitrógeno), papel y pulpa, minería y producción de alimentos.

Lixiviados de vertederos. Los lixiviados de los vertederos de sólidos urbanos se caracterizan por su poco volumen y alta concentración en amonio.

Deposición atmosférica. El nitrógeno atmosférico entra generalmente en el ambiente acuático en dos formas: nitrógeno inorgánico solubilizado en agua de lluvia o partículas orgánicas y nitrógeno mineralizado que sedimenta o es arrastrado por la lluvia. En este término se suelen agrupar únicamente las partículas que caen directamente sobre la superficie del agua, sin incluir la escorrentía superficial. Estas partículas provienen principalmente de la combustión de petróleo y

derivados, que contienen nitrógeno que es oxidado a NO que posteriormente se transforma en NO₂. Otras fuentes de partículas son residuos animales, aplicación de fertilizantes líquidos con amoníaco, compostaje de lodos de depuradora o procesos industriales. Estas partículas son arrastradas normalmente por el viento, aunque la minería, agricultura, construcción y otras actividades también contribuyen al proceso.

Escorrentía superficial. La escorrentía de áreas urbanas puede contener cantidades significativas de nitrógeno. El drenado de humedales elimina un método natural de eliminación de nitrógeno, a través de la sedimentación de sólidos orgánicos y la desnitrificación en sus sedimentos. La impermeabilización de las superficies provoca la rápida conducción del nitrógeno a las aguas receptoras, evitando la asimilación natural. La construcción y otras perturbaciones incrementan la cantidad de sólidos con importante contenido en nitrógeno en estas aguas superficiales.

La aplicación de fertilizantes crea importantes cargas a las aguas superficiales y subterráneas. Los factores a controlar en su aplicación deben incluir la velocidad de aplicación, el tipo de fertilizante, la velocidad de riego, el drenaje del suelo, el tipo de planta, su velocidad de consumo de nitrógeno y el grado de cultivo.

Otra fuente proviene de las granjas de gran producción, que generan un residuo altamente concentrado en cantidades importantes.

Las fosas sépticas también deben considerarse como fuentes importantes de nitrógeno, ya que en muchas zonas es un sistema habitual de tratamiento de aguas residuales.

La contribución de cada una de estas categorías varía principalmente de acuerdo con la localización geográfica, el tipo e intensidad del desarrollo en la región, la densidad de población y el tipo de hábitat natural original.

1.2.1.4 EFECTOS DE LOS VERTIDOS DE NITRÓGENO DE PLANTAS DEPURADORAS.

La acumulación excesiva de las diferentes formas de nitrógeno en aguas superficiales o subterráneas puede llevar a adversos efectos ecológicos y en la salud humana. Los mayores efectos son el consumo de oxígeno provocado por la nitrificación, el crecimiento excesivo de plantas acuáticas, la toxicidad del amoníaco a la vida acuática, los efectos adversos para la salud pública y la reducción de posibilidad de reutilización del agua residual.

Bioestimulación del crecimiento de algas y plantas en aguas superficiales

Un importante problema en el campo de la polución del agua es la eutrofización, que está definida como un crecimiento excesivo de plantas y/o algas, producido por la sobrefertilización de ríos, lagos y estuarios. La eutrofización puede provocar un deterioro en la apariencia de aguas, problemas de olores por la descomposición de plantas y disminución del oxígeno disuelto, que puede afectar adversamente a la respiración de los peces, animales acuáticos y al crecimiento de plantas.

Las condiciones principales requeridas para el crecimiento de algas y plantas son la presencia de macronutrientes (nitrógeno y fósforo), dióxido de carbono y energía solar. La ausencia de cualquiera de estas condiciones limita su crecimiento. En condiciones normales, el nitrógeno y el fósforo son los dos factores limitantes para el crecimiento, por lo que son típicamente los factores clave para el control de la eutrofización. Si la cantidad y concentración de los vertidos genera problemas de este tipo, es necesaria la reducción de su concentración mediante la depuración.

Disminución del oxígeno disuelto por la nitrificación

Así como la descomposición bacteriana de los componentes orgánicos de las aguas residuales consume oxígeno en las aguas receptoras, la nitrificación del nitrógeno amoniacal crea una demanda adicional de oxígeno. Si el sistema de depuración se diseña para obtener una determinada reducción de DBO, pero sin oxidación de nitrógeno amoniacal, el efluente contendrá todavía una importante demanda de oxígeno. Esta demanda puede provocar la disminución del oxígeno disuelto en las aguas receptoras si no existe suficiente dilución y las condiciones ambientales conducen a la nitrificación (población nitrificante suficiente, temperatura, pH y capacidad tampón del medio).

Toxicidad del amoníaco

El nitrógeno amoniacal es el compuesto de nitrógeno más responsable de los efectos tóxicos en los peces y otros animales acuáticos. El amoníaco disuelto en agua existe como un equilibrio entre amoníaco molecular (NH_3) y amonio ionizado (NH_4^+), y su toxicidad es atribuible mayoritariamente a la forma no ionizada (NH_3). Las condiciones más importantes que controlan el equilibrio entre las dos formas, y por tanto el porcentaje de amonio libre, son el pH y la temperatura, aunque también puede ser significativo el efecto de la fuerza iónica.

La Environmental Protection Agency (EPA) ha realizado estudios (EPA, 1985,1989) que muestran efectos tóxicos para diferentes especies de peces para valores de amoníaco libre entre 0.1 y 10 mg/l.

Salud pública

El nitrato y el nitrito constituyen un problema de salud pública, relacionado principalmente con la cianosis infantil y la carcinogénesis.

La toxicidad del nitrato aparece después de su transformación en nitrito, un proceso que puede producirse en la saliva o en el estómago. El nitrito formado es capaz de oxidar el hierro de la hemoglobina de Fe^{2+} a Fe^{3+} , lo que afecta a su capacidad de transporte de oxígeno. La mayor parte de casos asociados al consumo de agua con nitrato ha aparecido para concentraciones mayores de 10 mg/l de N-NO_3^- .

La carcinogénesis (cáncer de estómago en particular) ha sido asociada a la ingestión de compuestos con nitrógeno en forma de nitrito. Estos compuestos son formados al reaccionar el nitrito (proveniente del nitrato) con aminas y amidas para formar nitrosaminas y nitrosamidas. Las evidencias epidemiológicas sugieren que un consumo alto de nitrato puede ser un factor que contribuya al cáncer de estómago.

Reutilización de aguas residuales

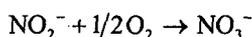
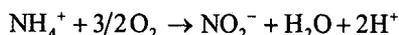
La recuperación de las aguas residuales se realiza generalmente para reducir la contaminación, aunque también se pueden obtener recursos de agua para otras aplicaciones como reutilización agrícola, riego en zonas verdes urbanas o potabilización. El principal problema con este agua es la eliminación de microorganismos patógenos. La eliminación de nitrógeno es importante cuando se quiere potabilizar el agua, para lo que se requiere, además de la eliminación biológica, un tratamiento terciario fisicoquímico para eliminar los restos de nitrógeno. Para la reutilización en agricultura puede ser incluso beneficioso un contenido no excesivo en amonio y nitrato, aunque debe estudiarse cada caso particularmente.

1.2.2 NITRIFICACIÓN

Los procesos de nitrificación los realizan poblaciones de bacterias que oxidan secuencialmente el amonio a nitrato con la formación intermedia de nitrito. Los dos géneros principales que realizan este proceso son *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Estos dos grupos están clasificados como microorganismos autótrofos, porque derivan la energía para crecimiento de la

oxidación del nitrógeno inorgánico. En contraste, las bacterias heterotróficas derivan la energía de la oxidación de materia orgánica. Otra característica de estos microorganismos es que usan carbono inorgánico (CO₂) para la síntesis, en vez de carbono orgánico. Los dos grupos se distinguen por su habilidad para oxidar sólo compuestos de nitrógeno específicos. *Nitrosomonas* puede oxidar amonio a nitrito, pero no puede completar la oxidación a nitrato. *Nitrobacter* se limita a la oxidación de nitrito a nitrato. Dado que la nitrificación es una reacción secuencial, los procesos de tratamiento deben diseñarse para ofrecer un ambiente adecuado a los dos grupos de bacterias.

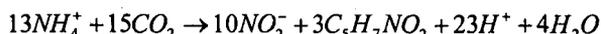
La estequiometría para las dos reacciones es la siguiente:



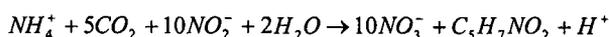
Y la reacción global es:



Unas posibles ecuaciones para la síntesis de *Nitrobacter* y *Nitrosomonas* asumiendo que la fórmula empírica de las bacterias es C₅H₇NO₂, se muestran a continuación:

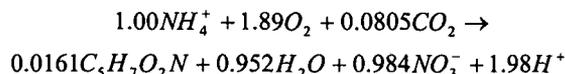


Nitrosomonas



Nitrobacter

En el Manual de Control de Nitrógeno [EPA, 1993] se muestra la siguiente ecuación para la descripción global del proceso:



La citada ecuación se puede calcular considerando un rendimiento de 0.08 g SSV/g N-NH₄⁺ para *Nitrosomonas* y 0.05 g SSV/g N-NO₂⁻ para *Nitrobacter*. Las implicaciones de esta ecuación para el diseño de procesos de nitrificación son significantes. Los coeficientes estequiométricos implican que por cada mol de amonio eliminado mediante nitrificación se requiere una importante cantidad de oxígeno, se produce poca biomasa y se pierde una alcalinidad considerable. Según la ecuación, por cada gramo de nitrógeno amoniacal eliminado se consumen 4.32 g de oxígeno, se

producen 0.13 g de microorganismos nitrificantes y se destruyen 7.07 g de alcalinidad (como CaCO₃).

Generalmente, los valores tomados para el diseño se basan en la ecuación de oxidación de nitrato, sin considerar el nitrógeno utilizado en la formación de microorganismos. En ese caso se obtienen los valores expresados en la tabla 1.8.

Parámetro	Valor
Utilización de oxígeno	4.6 g O ₂ / g N-NH ₄ ⁺
Rendimiento de biomasa	0.1 g SSV producidos / g N-NH ₄ ⁺
Alcalinidad destruida	7.1 g CaCO ₃ / g N-NH ₄ ⁺

Tabla 1.8. Valores aceptados para el diseño de sistemas de nitrificación

La nitrificación biológica en una planta depuradora se encuentra afectada por algunos parámetros:

- **Edad de los lodos (SRT).** Las bacterias nitrificantes presentan una cinética de crecimiento más lenta, la edad de los lodos debe ser suficiente para evitar su lavado de los bioreactores. En verano puede ser suficiente con una SRT entre 8 y 10 días, pero puede aumentar hasta 12 - 21 días cuando la temperatura es baja.
- **Nivel de oxígeno disuelto (OD).** La nitrificación es un proceso aeróbico, y la concentración de oxígeno disuelto en los reactores debe mantenerse entre 2 y 3 ppm para permitir la total oxidación del amonio. Niveles inferiores son perjudiciales para las bacterias nitrificantes por la competencia que mantienen con el resto de fauna.
- **pH.** El efecto que el pH ejerce sobre el proceso biológico de nitrificación es triple: activación y desactivación de las bacterias nitrificantes; nutricional, ligado a la alcalinidad del medio; inhibición por sustancias cuya concentración es función del pH (amoníaco libre, ácido nitroso libre y metales pesados).

El efecto de activación - desactivación se debe a la unión de los iones H⁺ y OH⁻ a los grupos ácidos o básicos débiles de los enzimas responsables del proceso, bloqueando reversiblemente los puntos activos. Existe un pH óptimo para el proceso de nitrificación en el intervalo 8.0-9.0. Parece ser que el efecto del pH es mayor cuanto menor es la temperatura, Antoniou et al., [1990] encontraron que, a 25 °C, a velocidad de nitrificación a pH 6.9 era igual al 84 % de la velocidad a pH 7.9, mientras que a 15 °C era tan sólo igual al 42 %.

El efecto nutricional se debe por una parte a la forma en que se puede encontrar el carbono mineral, substrato básico de los microorganismos autótrofos nitrificantes, pues el equilibrio químico ($\text{CO}_3^{2-} \longleftrightarrow \text{HCO}_3^- \longleftrightarrow \text{CO}_2$) es función del pH. De esta forma, para valores bajos del pH será preponderante la forma CO_2 que es fácil de eliminar por desorción, por lo que puede dar lugar a situaciones de escasez de substrato. Para valores elevados del pH, el carbono mineral se encontrará principalmente en forma de carbonatos en su mayoría insolubles y difícilmente asimilables.

El efecto de inhibición, ligado al desplazamiento que, en función del pH, experimenta el equilibrio químico de las especies inhibidoras, se explica en un apartado aparte.

- **Temperatura.** El crecimiento óptimo de las bacterias nitrificantes se sitúa alrededor del los 28 - 36 °C, y su actividad se reduce mucho a temperaturas inferiores. Muchas plantas sólo tienen capacidad N/D en verano, pues la temperatura es suficientemente elevada para obtener rendimientos aceptables, aunque nunca se alcancen las temperaturas óptimas.
- **Relación DBO/NKT.** En la mayor parte de los sistemas de tratamiento aeróbico se hallan presentes los microorganismos nitrificantes, aunque su número suele ser limitado. Se ha observado una correlación entre la capacidad nitrificadora de diferentes procesos de fangos activos y la relación DBO_5/NKT en el afluente, de forma que al aumentar esta relación, disminuye la fracción de bacterias nitrificantes del medio y el proceso de nitrificación pierde eficacia.

DBO/NKT	Fracción de nitrificantes
0.5	0.35
1	0.21
2	0.12
4	0.064
6	0.043
8	0.033

Tabla 1.2. Relación entre organismos nitrificantes y DBO_5/NKT [Metcalf, 1995]

Inhibición

Nitrosomonas y *Nitrobacter* son inhibidas por sus propios substratos cuando se presentan en concentraciones excesivas. Esta inhibición depende de los equilibrios $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ y $\text{NO}_2^-/\text{HNO}_2$, y de la concentración de NH_3 y HNO_2 . Los equilibrios dependen tanto de la temperatura como del pH del medio, así para el amonio:

$$[\text{NH}_3] = \frac{[N - \text{NH}_4^+] \cdot 10^{\text{pH}}}{\left(\frac{K_b}{K_w}\right) + 10^{\text{pH}}}$$

donde:

$[\text{NH}_3]$ concentración de amoniaco en solución (mg/l)

$[N - \text{NH}_4^+]$ concentración de nitrógeno amoniacal en el reactor, en mg/l

K_b constante de ionización para el amonio

K_w constante de ionización para el agua

$$\frac{K_b}{K_w} = \exp\left(\frac{6334}{273 + T}\right)$$

T temperatura de la solución

Mientras que para el nitrito:

$$[\text{HNO}_2] = \frac{[N - \text{NO}_2^-]}{K_a \cdot 10^{\text{pH}}}$$

donde:

$[\text{HNO}_2]$ concentración de ácido nitroso en solución, en mg/l

$[N - \text{NO}_2^-]$ concentración de nitrógeno en forma de nitrito en el reactor (mg/l)

K_a constante de ionización para el nitrito

$$K_a = \exp\left(\frac{-2300}{273 + T}\right)$$

T temperatura de la solución

El pH influirá directamente sobre el equilibrio amonio/amoniaco, mientras que la temperatura lo hará con su influencia sobre la constante de ionización del amonio (K_b) y el producto iónico del agua (K_w). Para concentraciones superiores a 1 mg/l de NH_3 se produce inhibición de *Nitrobacter*, mientras que para concentraciones superiores a 150 mg/l de NH_3 se produce también la inhibición total de *Nitrosomonas*. Además para concentraciones de ácido nitroso superiores a 2.8 mg/l se produce la inhibición total de *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* [Anthonisen *et al.*, 1976].

1.2.3 DESNITRIFICACIÓN

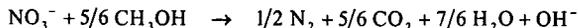
Como ya se ha comentado anteriormente, la conversión de amonio a nitrato no es el único paso necesario para la eliminación de nitrógeno del agua. Es necesario un segundo paso, la desnitrificación, producida por la respiración de algunos microorganismos heterótrofos que en condiciones anóxicas sustituyen al oxígeno por nitrato como

aceptor de electrones para la oxidación de la materia orgánica.

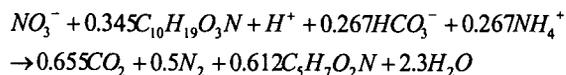
La reducción del nitrato a nitrógeno molecular se efectúa mediante diferentes pasos intermedios:



La reacción global de la desnitrificación, considerando al metanol como fuente de carbono, puede ser descrita del siguiente modo:



La misma reacción, pero incluyendo la síntesis, y con la fuente de carbono de agua residual y de nitrógeno amoniacal, podría ser descrita como [WEF, 1992]:



De aquí se puede deducir que cada gramo de N-NO₃⁻ reducido a nitrógeno gas supone recuperar el equivalente a 2.86 gramos de oxígeno y 3.0 gramos de CaCO₃ (alcalinidad). Además, por cada gramo de DQO eliminado son producidos 0.4 gramos de SSV (biomasa heterótrofa).

La desnitrificación biológica está influenciada por determinados parámetros:

- **Oxígeno.** Al ser un proceso anóxico, la concentración de oxígeno disuelto debe ser siempre inferior a 0.5 ppm, ya que el oxígeno inhibe la formación de nitrato-reductasas, responsables del paso de nitrato a nitrito.
- **Carbono.** La actividad de las bacterias desnitrificantes, viene controlada por la presencia de compuestos carbonados que puedan ser oxidados. Trabajando en condiciones anaerobias estrictas y con una fuente abundante de carbono, el ciclo tenderá principalmente hacia el amonio, en lugar de ir a productos gaseosos menos reducidos que el amonio. Es necesario disponer de una relación C/N adecuada, además de una fuente de carbono fácilmente degradable.
- **Temperatura.** Debe considerarse la temperatura óptima para la actividad de los microorganismos, además de su efecto sobre la solubilidad del oxígeno en el agua.
- **pH.** El pH óptimo para el proceso de desnitrificación se encuentra en el intervalo 7.0-9.0, aunque el proceso puede realizarse a pH cercano a 11. A pH bajo el producto final de degradación es N₂O en lugar de N₂. La etapa de

reducción del NO₂⁻ a N₂ es más sensible al pH que la reducción de NO₃⁻ a NO₂⁻.

1.2.4 ESQUEMAS DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

Los procesos de eliminación biológica de nitrógeno en plantas depuradoras de aguas residuales urbanas pueden agruparse en tres categorías, dependiendo del número de etapas de lodos activos que tenemos (simple, doble o triple lodo).

A continuación se enumeran algunas configuraciones, destacando las que son factibles de implementación en plantas convencionales que deseen incorporar eliminación de nitrógeno del influente [WEF, 1992]. Puede observarse una evolución constante por lo que respecta al principal problema que debe hacerse frente, el intento de aprovechar la fuente carbonosa de la propia agua residual para la desnitrificación, evitando de este modo la adición de metanol, etanol, etc., lo que encarece el proceso.

Una etapa

WUHRMANN. La nitrificación se realiza en una primera etapa aeróbica y la desnitrificación en la segunda etapa, anóxica. No hay adición de un donante de electrones exógeno, el diseño se basa en la materia orgánica residual que pasa de la primera etapa o en la respiración endógena de la biomasa para obtener energía para la desnitrificación. Existen variaciones del diseño original, en las que se utiliza DBO suplementaria proveniente de metanol o de parte del influente bypassado para suplir la carencia de DBO en la zona anóxica.

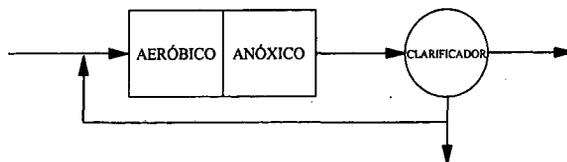


Fig. 1.4. Wuhrmann

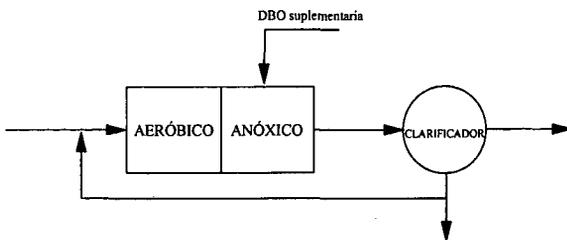


Fig. 1.5. Wuhrmann modificado

LUDZACK-ETTINGER. Es parecido al anterior, pero intercambiando el orden de las dos fases. La ventaja estriba en el hecho de que suministramos DBO fácilmente biodegradable en la zona anóxica como donante de electrones. Una mejora de este proceso es la recirculación interna del licor mezcla de la fase aeróbica a la anóxica, que permite la recirculación de nitratos a la zona anóxica, donde son consumidos. Con este esquema no es posible la eliminación total de nitratos en el efluente.

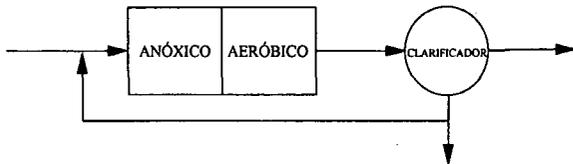


Fig. 1.6. Ludzack-Ettinger

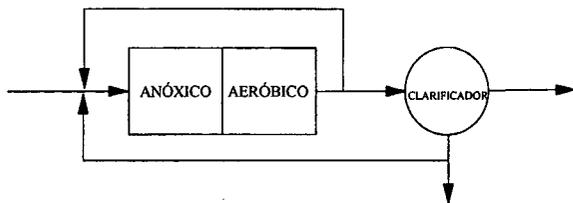


Fig. 1.7. Ludzack-Ettinger modificado

BARDENPHO. En este esquema de operación existen 4 zonas (2 aeróbicas y 2 anóxicas), con recirculación del licor de mezcla de la primera zona aeróbica a la primera anóxica, con unos caudales de 4-6 veces el caudal de entrada. Con esta configuración se intenta la eliminación completa de nitrógeno, cosa que no puede conseguirse con las anteriores.

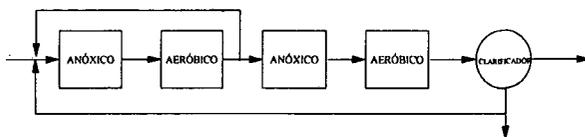


Fig. 1.8. Bardenpho

La segunda zona anóxica utiliza los nitratos como aceptor de electrones. El paso final aireado elimina el N_2 de la solución y minimiza el contenido en fósforo.

SECUENCIA DE REACTORES DISCONTINUOS (SBR). Consiste en crear en un sólo reactor la combinación secuencial adecuada de condiciones aerobias/anóxicas. Es necesario considerar el tiempo de reacción, el nivel de agua en el tanque y la concentración de oxígeno. SBR es apropiado para sistemas relativamente pequeños con caudal variable. El inconveniente principal es el hecho de trabajar en discontinuo.

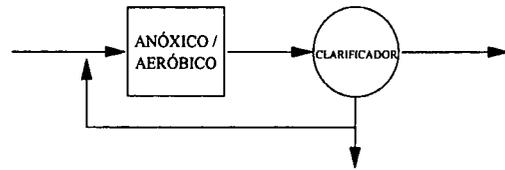


Fig. 1.9. SBR

CANALES DE OXIDACIÓN. Estos son procesos fácilmente adaptables para realizar la oxidación de carbono, la nitrificación y la desnitrificación. El reactor en forma de carrusel permite el aporte de oxígeno en varios puntos, mediante rotores horizontales, aireadores mecánicos de baja velocidad o difusores de aire. La concentración de oxígeno será alta en los puntos de aireación e irá disminuyendo progresivamente debido al consumo biológico a medida que el líquido mezcla circule por el reactor. Si los puntos de inyección están distantes pueden crearse zonas anóxicas. La localización y tamaño de estas zonas varía con el tiempo, pues depende del tipo y cantidad de influente. En caso de querer hacer N/D es necesario un muy estricto seguimiento del nivel de oxígeno en el canal.

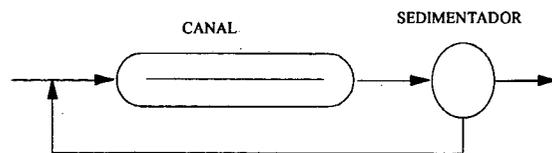


Fig. 1.10. Canal de oxidación

El sistema debe ser flexible para poder operar correctamente, cosa que implica tener compuertas regulables o aireadores de dos velocidades para poder variar la cantidad de oxígeno aportada, de acuerdo con los diferentes picos diarios o estacionales (de otro modo es imposible desarrollar zonas anóxicas en periodos de baja carga). Los niveles de eliminación de nitrógeno no son muy elevados debido al largo tiempo de residencia celular requerido, así como la baja concentración de DQO fácilmente biodegradable y las concentraciones marginales de oxígeno. Para paliar estas dificultades es necesario tener una gran cantidad de líquido mezcla en suspensión.

CANALES DE OXIDACIÓN EN FASES ALTERNAS. Este proceso desarrollado en Dinamarca, consta de dos canales operando en condiciones que recuerdan al SBR. Se crean secuencialmente condiciones aeróbicas, anóxicas y anaerobias, pero en este caso se utiliza una entrada y salida constante de caudal. Esta tecnología permite evitar las recirculaciones de caudal, ya que los nitratos formados en la fase aeróbica nitrificante son consumidos en la siguiente fase anóxica, desnitrificante.

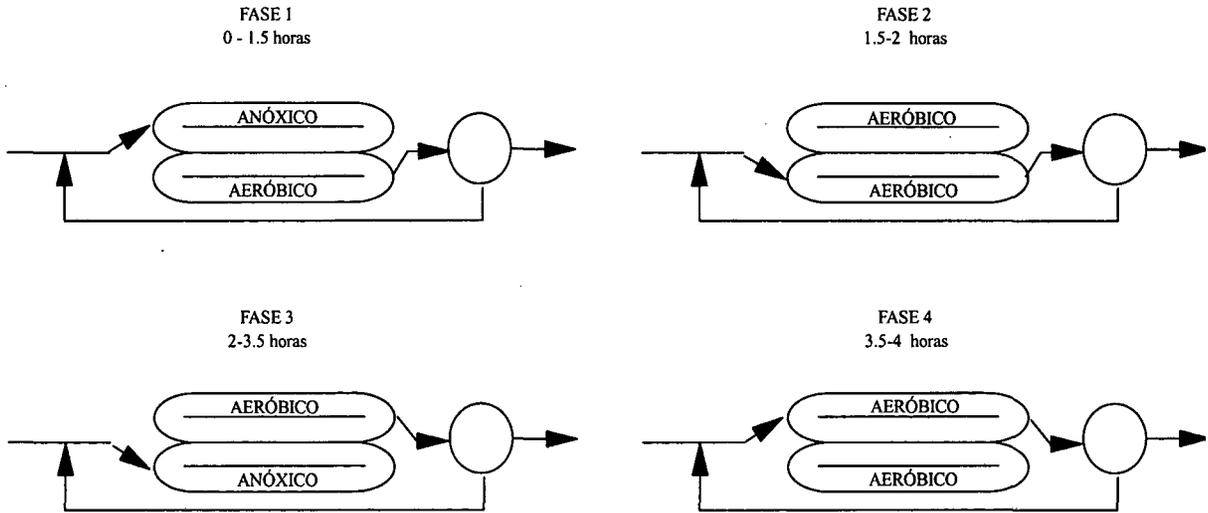


Fig. 1.11. Proceso Bionitrógeno

El diseño más habitual es el Bionitrógeno, que opera con cuatro fases diferenciadas. La alimentación se alterna entre los dos canales (mitad de tiempo cada uno). Este hecho asegura que los microorganismos siempre tienen una fuente rica de DQO fácilmente degradable.

Dos etapas

En este tipo de esquemas se intenta mantener separados los dos procesos, cada uno con su propio clarificador y su recirculación independiente, lo cual facilita mantener las dos poblaciones por separado, evitando parte de los problemas creados por la interrelación de los procesos. Las tres disposiciones más habituales se comentan a continuación:

PROCESO A. En el proceso aeróbico se oxida el carbono y se nitrifica el amonio existente. En el anaerobio se produce la desnitrificación, gracias a un aporte de DQO suplementario (fuente de carbono). El agua tratada pasa a un fase de aireación rápida antes del segundo clarificador, para evitar la desnitrificación en el clarificador.

PROCESO B. La configuración es muy parecida, pero se bypasa una fracción del influente hacia la fase

anáxica para suprimir la fuente externa de carbono. Como inconveniente hay que remarcar que parte del nitrógeno de entrada no será tratado, y por tanto, la eliminación no será completa.

PROCESO C. Aquí se cambia la configuración, pasando la fase desnitrificante al primer término, lo que evita la adición de DQO suplementaria. Además se puede reducir la aireación necesaria, ya que parte de la materia orgánica se elimina con la desnitrificación. Como inconvenientes tiene la necesidad de añadir una recirculación del agua nitrificada hacia la primera fase, además de no ser posible la eliminación total de nitratos.

Tres etapas

En este proceso se propone la separación total de poblaciones bacterianas responsables de la oxidación del carbono, de la nitrificación y de la desnitrificación. Como desventaja es necesario añadir una fuente externa suplementaria de carbono. La ventaja principal es que la separación de las poblaciones permite un mayor control del proceso y la optimización por separado de cada uno.

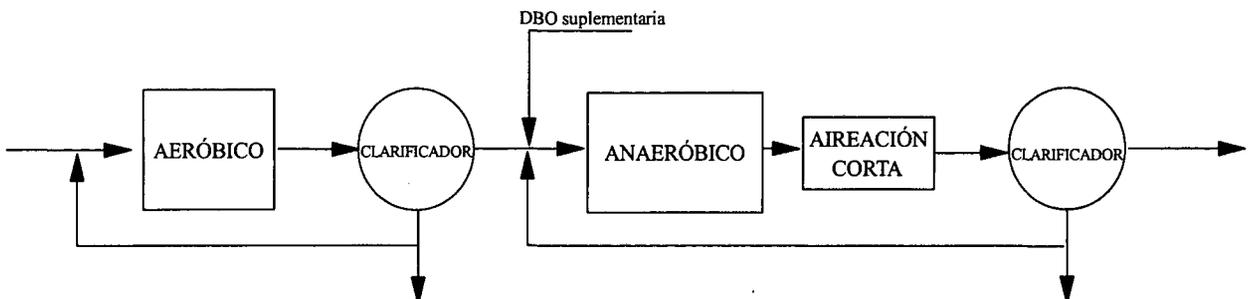


Fig. 1.12. Esquema de un proceso de doble etapa A

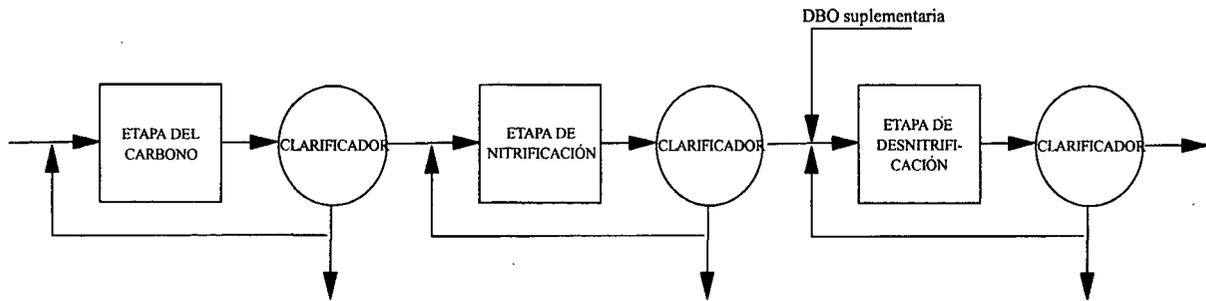


Fig. 1.13. Proceso de triple etapa

1.2.5 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO.

1.2.5.1 CICLO DEL FÓSFORO

Stainer, [1991] consideran sencillo, desde un punto de vista químico, el ciclo del fósforo ya que éste se encuentra en los organismos vivos con valencia +5, bien como iones fosfatos libres o bien como constituyentes orgánicos con fosfato de las células. La mayor parte de los compuestos orgánicos fosfatados no pueden pasar al interior de las células. Las necesidades se cubren tomando ion fosfato. Los compuestos orgánicos fosfatados se forman luego dentro de la célula y al morir el organismo el ion fosfato es rápidamente liberado por hidrólisis.

El fósforo de las aguas residuales puede existir en tres formas diferentes:

- *Fósforo orgánico*: insoluble y con tendencia a transformarse por degradación biológica en fosfato soluble.
- *Polifosfatos*: se hidrolizan total o parcialmente en solución acuosa, pasando a ortofosfatos después del tratamiento biológico normal del agua.
- *Ortofosfatos*: a efectos prácticos el fósforo soluble del agua residual se puede decir que está en forma de ion ortofosfato PO_4^{3-} .

1.2.5.2 PROCESOS IMPLICADOS EN LA ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE FÓSFORO

La literatura indica que los microorganismos acumuladores de fósforo (OAF) son todos aquellos capaces de acumular en su interior gránulos de fósforo, y son principalmente del género *Acinetobacter* [Wentzel, 1986; Knigh., 1995], aunque también describe otros géneros como OAF: *Pseudomonas*, *Moraxella* [Szpyrkowicz, 1995], *Aeromonas*, *Rhodococcus* y *Corynebacterium* [Knight, 1995].

La clave de la eliminación biológica de fósforo es la actividad de los OAF, que necesitan condiciones anaerobias/aerobias alternantes para construir sus

componentes internos de reserva energética, polímeros orgánicos y polifosfatos. En condiciones anaerobias liberan fosfato mientras consumen moléculas orgánicas ligeras, principalmente ácidos grasos volátiles (AGV), y en condiciones aerobias o anóxicas acumulan fosfatos muy por encima de sus requerimientos metabólicos.

Metabolismo anaerobio

En condiciones anaerobias los ácidos grasos volátiles son captados y almacenados en los microorganismos en forma de polihidroxialcanos (PHA). Cuando el principal sustrato es acetato, se produce y almacena poli- β -hidroxibutirato (PHB), mientras que la energía requerida es generada por la hidrólisis del polifosfato intracelular a fosfato. Este fosfato es liberado de la célula a la solución, lo que hace aumentar la concentración de fosfato en el agua. La captación y almacenamiento de acetato y la degradación de polifosfato están unidas, por lo que deberían cumplir las restricciones metabólicas, es decir, la relación entre el fósforo liberado y el acetato captado debería ser constante. Sin embargo, los datos bibliográficos muestran que esta relación es variable.

Se han propuesto varios modelos para el metabolismo anaerobio de los OAF, que difieren, principalmente, en el origen de la reducción de equivalentes necesaria para la producción de PHB a partir del acetato.

La primera hipótesis [Comeau, 1986; Wentzel, 1986] considera que la reducción de equivalentes se obtiene del NADH producido por oxidación de parte del acetato en el ciclo del ácido tricarboxílico (TCA), figura 1.14.

La segunda hipótesis [Mino, 1987] sugiere que la fuente necesaria para la producción de NADH es la degradación del glucógeno intracelular por vía Embden-Meyerhof, figura 1.15.

No obstante, estas dos hipótesis dan un valor constante de la relación P-liberado/C-captado, por lo que no explican satisfactoriamente los resultados experimentales. Otros autores han encontrado que

esta relación es función del pH. Según estos, el incremento del pH aumenta la diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana celular. Esto hace que al aumentar el pH se requiera más energía para captar un ion cargado negativamente, como el acetato, contra el potencial eléctrico negativo de las células.

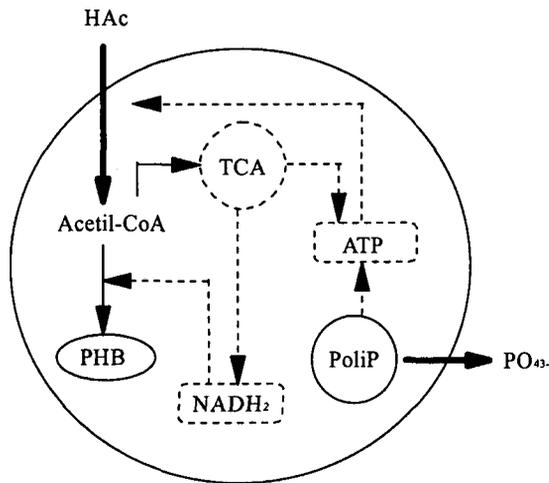


Fig. 1.14. Modelo metabólico de los OAF en condiciones anaerobias a través del TCA

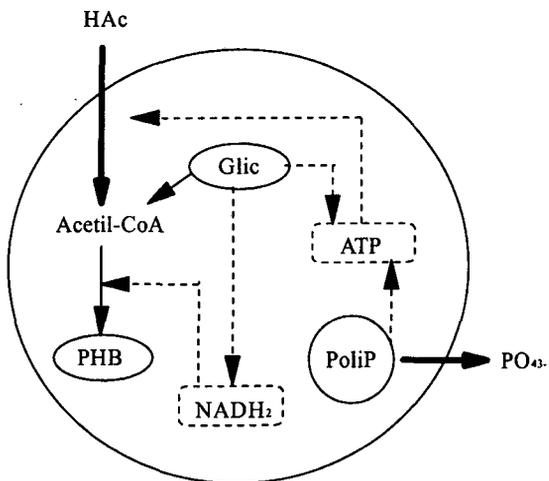


Fig. 1.15. Modelo metabólico de los OAF en condiciones anaerobias a través del glucógeno

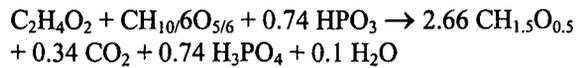
Metabolismo aeróbico

En condiciones aerobias el PHB intracelular es utilizado para el crecimiento y la producción de glucógeno. El exceso de energía producida es almacenado en forma de polifosfatos, que se forman con el fosfato presente en la solución. De esta manera, la concentración de fósforo en el agua disminuye en mayor grado de lo que había aumentado en la fase anaerobia, produciéndose así la eliminación de fósforo.

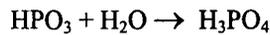
Las principales reacciones bioquímicas implicadas en el proceso de eliminación biológica de fósforo son las siguientes [Smolders, 1995]:

Fase anaerobia:

- Captación de acetato:

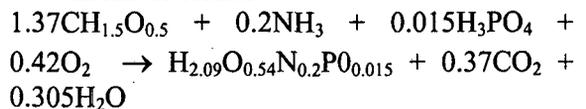


- Mantenimiento:

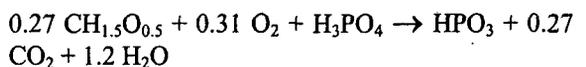


Fase aeróbica:

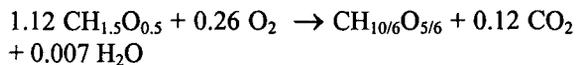
- Síntesis de biomasa:



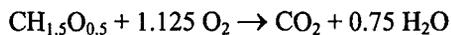
- Captación de fosfato:



- Formación de glucógeno:



- Mantenimiento:



En muchos casos los procesos biológicos de eliminación de nutrientes incluyen tanto la eliminación de fósforo como la de nitrógeno. En estos sistemas, además de las etapas anaerobia y aeróbica, existe una etapa anóxica donde se realiza la desnitrificación. Ocurre que muchos de los microorganismos que realizan la desnitrificación son también acumuladores de fósforo [Barker, 1996]. Este hecho provoca que en la zona anóxica se establezca una competencia entre la liberación de fosfato y la desnitrificación.

Chuang, [1998] considera que esta competencia depende, en gran medida, de la presencia de un sustrato orgánico disponible. Si se dispone de una fuente de carbono, por ejemplo, acetato, el NADH necesario para la síntesis de PHB proviene de la degradación de parte del acetato extracelular en el ciclo ATC. El ATP procedente de la respiración anóxica de los OAF disminuye la necesidad de degradación de polifosfato y, en consecuencia, disminuye la liberación de fosfato con respecto al metabolismo anaerobio. Sin embargo, la captación de acetato aumenta debido a las necesidades de la desnitrificación y de la síntesis de PHB. Por el contrario, si no disponemos de acetato extracelular, la desnitrificación utiliza el PHB intracelular como fuente de energía para la producción de ATP, con lo que no se realiza la liberación de fosfato sino la captación, figura 1.16.

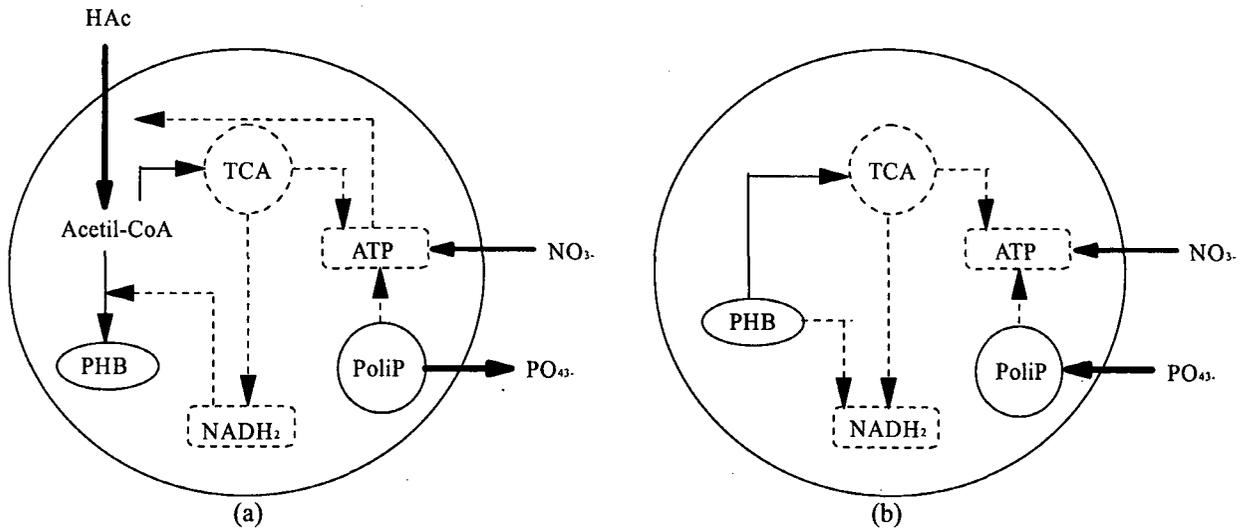


Fig. 1.16. Modelo metabólico de desnitrificación y eliminación de fósforo simultánea bajo condiciones anóxicas; (a) en presencia de ácido acético, (b) sin ácido acético disponible

Parámetros que afectan a la eliminación biológica de fósforo

1) Características de las aguas residuales

La capacidad de los OAF de acumular polifosfatos depende de la disponibilidad de moléculas orgánicas ligeras, principalmente AGV, en el reactor anaerobio. Este substrato puede obtenerse de la propia agua residual o como producto de fermentación producido en el reactor anaerobio por los microorganismos heterótrofos ordinarios.

Cuando se produce una disminución en la cantidad de materia orgánica alimentada al reactor anaerobio, el proceso de eliminación de fósforo se ve rápidamente afectado por la disminución de la cantidad de PHB intracelular en los OAF. Cuando se termina la perturbación, la recuperación de la acumulación de los PHB en condiciones anaerobias es instantánea, mientras que la captación de fosfato en condiciones aerobias tiene una capacidad de recuperación mucho menor [Temminck, 1996]. Una manera de contrarrestar este problema es disminuir la aireación para mantener un nivel de PHB intracelular suficiente para que se lleve a cabo el proceso.

2) Fracción volumétrica anaerobia

Wentzel [1996] considera que un aumento en la fracción volumétrica anaerobia nos da un incremento en la eliminación de fósforo. Esto se debe a que con mayores volúmenes anaerobios, aumenta la biomasa activa de los heterótrofos ordinarios y, por lo tanto, se produce más AGV. Sin embargo, dicha mejora disminuye en cada aumento

de volumen anaerobio. Según estos autores, el volumen anaerobio óptimo está entre un 15-20% del volumen total de la planta.

3) Tiempo de residencia celular (θ_c)

Wentzel [1996] dice que el efecto del θ_c en la eliminación de fósforo es complejo. Para un $\theta_c < 3$ días la eliminación se incrementa al aumentar el θ_c , sin embargo para un $\theta_c > 3$ días la eliminación de fósforo disminuye al aumentar el θ_c .

La razón de este comportamiento es que el aumento del θ_c causa un aumento en la biomasa activa de heterótrofos ordinarios, lo cual produce un incremento en la producción de AGV, y por lo tanto, un incremento en la eliminación de fósforo. Sin embargo, el incremento del θ_c también provoca una disminución en la eliminación de fósforo debido a la menor purga por día de biomasa activa de OF. A $\theta_c < 3$ días domina el primer efecto, mientras que a $\theta_c > 3$ días domina el segundo.

Para estos autores el θ_c óptimo es de 3-5 días. No obstante, cuando se quiere que también haya nitrificación se necesita un $\theta_c > 10-5$ días en función de la temperatura. Rodrigo [1996] ha estudiado el efecto del θ_c en estos sistemas y sus conclusiones son que al aumentar el θ_c mejora la eliminación de fósforo hasta llegar a un máximo (óptimo θ_c de 10 días), a partir del cual la eliminación de fósforo disminuye al aumentar el θ_c .

4) Temperatura

Jones [1996] sugiere que la temperatura óptima de ambos procesos es de 30 °C. La eliminación

biológica de fósforo tiene un rango en el cual es posible, de 5 a 40 °C.

5) pH

Numerosos autores han encontrado que, en condiciones anaerobias, la relación P-liberado/P-captado esta fuertemente influenciada por el pH

6) Presencia de nitratos u oxígeno en el reactor anaerobio

Si se introduce nitrato u oxígeno en la zona anaerobia, los heterótrofos ordinarios consumen los AGV ellos mismos, utilizando los nitratos u oxígeno como aceptores externos de electrones. De esta forma, los AGV disponibles para los OAF disminuyen y empeora la eliminación biológica de fósforo.

1.2.6 MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVOS

Dentro del campo de las aguas residuales, existen muchos nombres que se usan para referirse a los microorganismos responsables de la depuración. Así nos podemos referir como biomasa, sólidos (procedente de la analítica que se realiza para la determinación de la cantidad), licor mezcla (refiriéndose a la mezcla del agua y microorganismos del bioreactor), lodos o fangos (cuando la concentración de microorganismos es elevada).

La principal responsabilidad del Jefe de la planta es la de conducir el ecosistema que forman los lodos activos, controlando el ambiente por el cual se debe desarrollar la población de microorganismos. El objetivo es construir una cadena trófica particular y estable, que elimine los contaminantes del agua y que decante con facilidad.

Los microorganismos presentes en el sistema de lodos activos son del mismo tipo que los existentes en los sistemas naturales, pero las especiales condiciones que se dan dentro del bioreactor y del sedimentador se seleccionan unas especies determinadas.

Los compuestos mayoritarios son las bacterias, protistas unicelulares que se pueden encontrar en concentraciones superiores los 10^6 individuos por mililitro. La mayoría de estas bacterias son heterótrofos aeróbicos o facultativos, Gram negativo, móviles, y de forma esférica, cilíndrica o helicoidal. Principalmente son originarios del tubo digestivo de mamíferos.

Entre las bacterias heterótrofas más corrientes se destacan los géneros *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Citromonas* y *Zooglea* [Jenkins, 1993].

También existen heterótrofos aeróbicos facultativos desnitrificantes, y autótrofos para oxidar el amonio (*Nitrosomonas*), el nitrito (*Nitrobacter*) o el sulfuro (*Thiothrix*) [Berk, 1993].

1.2.6.1 EL FLÓCULO

La biomasa de los lodos activos presenta una característica especial, que es su capacidad para formar flóculos y decantar cuando se para la agitación. Este hecho es debido a la gran proporción de ciertas bacterias floculantes (como por ejemplo *Zooglea*) que segregan polímeros extracelulares. Estos tipos de bacterias son seleccionados en el sistema mediante la reinoculación constante establecida entre el sedimentador secundario y el bioreactor.

A pesar de que la célula procariota es la unidad primordial de los procesos bioquímicos de depuración, en el caso de lodos activos el flóculo es quién abarca el papel principal, no solamente por ser responsables directo sobre la correcta separación entre el agua tratada y los sólidos, sino por su influencia sobre otras operaciones del proceso, como la deshidratación de los fangos, la incorporación de material coloidal en el flóculo en forma de sólidos sedimentables, la eliminación de metales por adsorción a los polímeros extracelulares, o la mayor resistencia de los microorganismos a los compuestos tóxicos. Entonces, queda evidenciado que la gran parte de los problemas operativos del proceso biológico de la EDAR son debidos a las anomalías asociadas a la estructura del flóculo. La figura 1.17 muestra la estructura típica de un flóculo formado básicamente por un conjunto de bacterias, con sus respectivos radicales, y unidos entre sí por el polímero extracelular, que también retiene partículas inorgánicas y cationes divalentes.

En el flóculo está el origen de los gradientes y los diferentes microambientes dentro de la aparente uniformidad del reactor, y el flóculo es también la base física de un microsistema formado principalmente por bacterias, pero en dónde también existen protozoos, rotíferos, nemátodos y otros invertebrados. Aunque estos últimos solamente representan un 5 % de la biomasa total, y su importancia parece secundaria, también facilitan el correcto funcionamiento del proceso. Se alimentan de bacterias del líquido intersticial, contribuyendo a la clarificación del agua y a la eliminación de patógenos, segregan mucosas que facilitan a la floculación, y con su vigorosa movilidad rompen los flóculos excesivamente grandes. Los protozoos

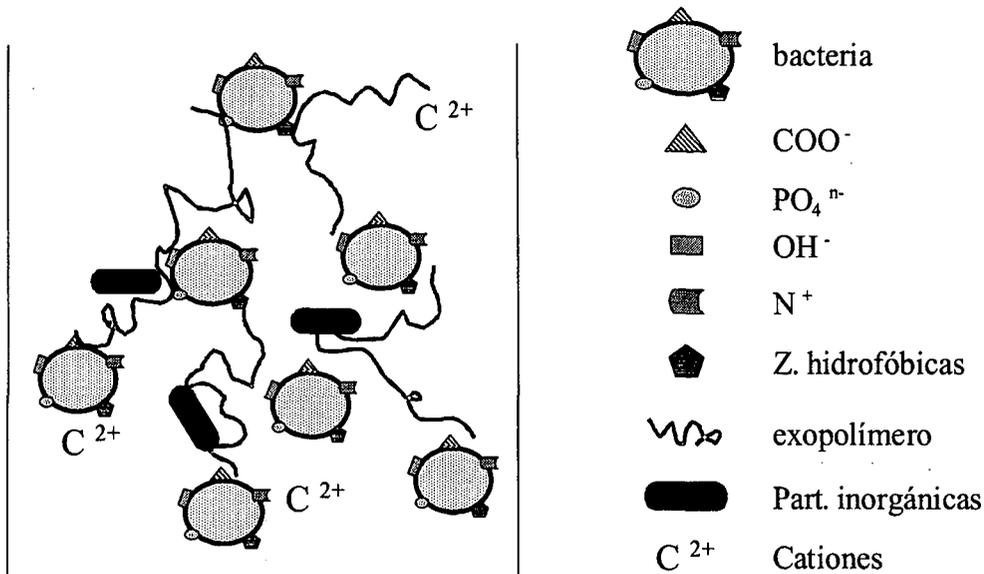


Fig. 1.17. Estructura principal de un flóculo

también pueden rascar la superficie del flóculo y alimentarse de las bacterias arrancadas, provocando efectos positivos sobre ésta biomasa bacteriana, que se renueva con mayor facilidad y se mantiene más activa.

1.2.6.2 LAS BACTERIAS FILAMENTOSAS

La sólida apariencia del flóculo se basa en su construcción sobre una estructura formada por bacterias filamentosas. El equilibrio ideal entre los dos tipos de bacterias (formadores de flóculos y filamentosas) es el que comporta la existencia de flóculos grandes y compactos que facilitan la sedimentación y provocan un sobrenadante claro y un valor bajo del índice volumétrico de fangos o IVF. Esta estructura ideal está indicada en el cuadro B de la figura 1.18.

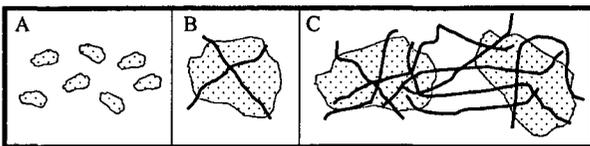


Fig. 1.18. Diferentes relaciones flóculos - filamentosas

No obstante, cuando por determinadas circunstancias se producen un fuerte desequilibrio entre la cantidad de bacterias formadoras de flóculo y las filamentosas presentes, la estructura del flóculo puede tender hacia una disgregación total con pequeñas y débiles agrupaciones de bacterias que generan un sobrenadante muy turbio, un valor muy bajo de IVF (en caso de ausencia total de filamentosas), o hacia un aumento excesivo de la medida del flóculo que implica problemas de compactación y evita la sedimentación de estos flóculos esponjosos, con el correspondiente aumento del valor del IVF y el peligro que se escape la

biomasa del proceso cuando el abanico de fangos supere las posibilidades de contención del sedimentador secundario (cuando hay proliferación excesiva de filamentosas que establecen puentes de unión entre los flóculos). Los cuadros A y C de la figura 1.18 muestran la estructura que presenta el flóculo en estos dos últimos casos [Jenkins, 1993].

1.2.6.3 LOS PROTOZOOS

Ya se ha hecho mención de la presencia e importancia que los protozoos tienen dentro del proceso de depuración de lodos activos. Estos protozoos son siempre aeróbicos y heterótrofos estrictos, y solamente pueden desarrollarse a expensas de la materia orgánica. Al ser fácilmente identificables en el microscopio, y muy sensibles a los tóxicos y al cambio de condiciones de operación, son muy buen indicadores del estado de proceso de depuración.

Los principales tipos de protozoos presentes en el sistema de lodos activos se pueden clasificar según flagelados, rizópodos, ciliados (holotricos, hipotricos y peritricos), y suctorios. También hay metazoos pluricelulares, destacando dentro el resto los Rotíferos, incluso se pueden encontrar nemátodos y otros invertebrados.

- **Flagelados.** Protozoos pequeños (5 - 20 μm), de forma alargada o oval, y de elevada movilidad mediante uno o más flagelos. Algunas especies se alimentan de materia orgánica disuelta, y su presencia es claramente indicativa de pobres rendimientos de eliminación de DBO, mientras que otros son bacteriófagos. Son los organismos dominantes en los estadios de la sucesión del fango activo, hasta que son sustituidos por los ciliados. Cuando su presencia es importante a un fango activo maduro, son indicativos de la

existencia de algún problema en el proceso, como por ejemplo una carga excesiva, fermentaciones, o un choque de tóxicos.

- **Rizópodos** (amebas). De aspecto, forma y medida variada (20 - 400 μm), se mueven mediante pseudópodos. Hay tecamebas que presentan un esqueleto o teca mineral. La presencia de determinados tipos suele ser indicativo de ciertos fenómenos. Por ejemplo, la identificación de la tecameba *Euglypha* insinúa una buena eliminación de materia orgánica, combinado con unas edades celulares superiores a 10 días.
- **Ciliados**. Son el grupo más importante y abundante de los protozoos presentes en los lodos activos. Valores de hasta a 10^6 ciliados/litro son habituales (cuando hay más de 10^7 ciliados/litro el funcionamiento de la EDAR es óptimo), siendo valores inferiores a 10^4 ciliado/litro indicativos de una depuración insuficiente. Casi siempre se caracterizan por la presencia de cilios, y pueden tener un micronúcleo y un macronúcleo. Al ser un grupo muy variado, presentan unos hábitos alimentarios muy diversos, existiendo macrófagos bacteriófagos y depredadores de otros ciliados. Pueden estar asociados al flóculo, bien sea fijados por un pedúnculo (sésilos), bien sin unión física (reptantes), o bien nadar libremente por el líquido intersticial.
- **Ciliados holotricos**. Con ciliación somática a la cara dorsal y la boca a la cara ventral. Son ciliados nadadores, con alguna excepción asociada al flóculo. El más conocido es el paramecio, y hay de depredadores, como la *Amphileptus* o *Linotus*, de bacteriófagos, como *Chlidonella uncinata* (ligada a condiciones de mala eliminación de nitrógeno), o *Colpidium* (abunda en condiciones de mala eliminación de carbono). La proliferación de pequeños paramecios (medida inferior a los 130 μm) suelen darse en situaciones de alta carga y suficiente oxigenación, mientras que los de medida superior no son tan habituales e indican buena eliminación de carbono. Los bacteriófagos son abundantes en los primeros estadios de la sucesión, pero son sustituidos por ciliados hipotricos y peritricos, que viven al flóculo y son más eficientes a la vez de alimentarse de bacterias libres.
- **Ciliados hipotricos o espirotricos**. La ciliación somática se encuentra exclusivamente a la cara ventral, y está formada por cilios compuestos agrupados en cirrus, una forma de apéndice más fuerte, que a parte de nadar les permite desplazarse y fregar sobre las

superficies sólidas. La mayoría están asociados al flóculo, todo y que con frecuencia se les ve nadando por el líquido intersticial. Un de los más típicos es la *Euplotes*, y es indicativo de buena eliminación de carbono y suficiente oxigenación. *Aspidisca lynceus* no tolera concentraciones de amonio superiores a 10 - 15 mg/l, y por lo tanto su presencia asegura una buena nitrificación. Otro ejemplo puede ser *Oxytricha fallax*, presente a edades celulares elevadas y buena calidad del agua.

- **Ciliados peritricos**. Son ciliados sésiles, fijados al substrato (en este caso el flóculo) por un pedúnculo que puede ramificarse y donar lugar a colonias arboriformes. Su ciliación somática es muy reducida, pero, la bucal se encuentra muy desarrollada. Su fuerte asociación al flóculo los convierte en los más bien adaptados, y son muy eficientes en la filtración de bacterias libres. *Vorticella microstoma* es típica de cargas elevadas y situaciones transitorias, mientras que *Vorticella convallaria* es característica de buenos rendimientos depurativos.
- **Suctorios**. Al igual que los peritricos, son ciliados sedentarios fijados al flóculo por un pedúnculo. Son los únicos que no presentan cilios en su forma adulta, y tampoco presentan boca. Se alimentan mediante unos tentáculos succionadores, y son depredadores de otros ciliados. Algunos ejemplos pueden ser *Tokophyra* y *Acineta*.

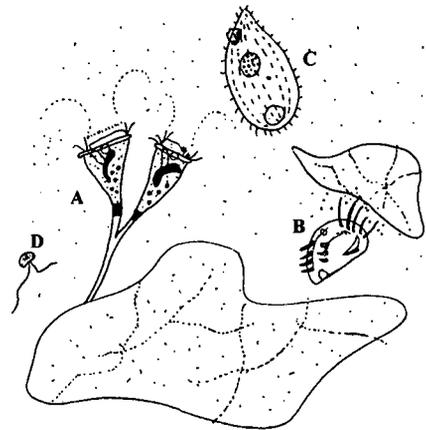


Fig. 1.19. Relación establecida entre los principales protozoos y el flóculo

La figura 1.19 muestra la situación y forma aproximada de los principales tipos de protozoos presentes en el licor mezcla del bioreactor de un sistema de lodos activos. El indicativo identificación A corresponde a una colonia de *Carchesium*, ciliados sésiles fijados al flóculo por el pedúnculo, la B representa la *Aspidisca lynceus*, ciliado reptador o

"crawling" asociado al flóculo, C es *Colpidium*, ciliado bacteriófago que nada libremente por el líquido intersticial, y D es un pequeño flagelado de la especie *Bodo saltans*.

1.2.6.4 LA CADENA TRÓFICA

Los lodos activos pueden ser considerados como un ecosistema extremo, sujetos a importantes fluctuaciones, y con dependencia directa a una fuente externa de nutrientes. Aunque faltan los productores primarios, se dan muchas de las características típicas de los ecosistemas naturales: se establecen relaciones tróficas a diferentes niveles, y la cantidad total de biomasa depende de la energía disponible (en este caso la carga orgánica que contenga el influente) por los niveles tróficos más bajos (las bacterias). La proporción de la biomasa total disminuye a los niveles tróficos superiores, y la diversidad de especies está muy relacionada con la estabilidad de los sistemas. Hay nichos ecológicos asociados bien al flóculo, bien al líquido intersticial. Los primeros, condicionados por la edad celular, están ocupados por especies de dinámica más lenta que los segundos, condicionados por el tiempo de residencia hidráulico y ocupados por especies de rápido crecimiento.

Además, al igual que a los ecosistemas naturales, se establece una sucesión temporal de especies a partir de la puesta en marcha del sistema, sucesión que parte de una preponderancia inicial de especies pioneras de crecimiento rápido, asociados al agua, como bacterias, flagelados y ciliados bacterívoros poco eficientes, mientras que evolucionan hacia a un sistema más complejo y estructurado, dominado por especies asociadas al flóculo como los ciliados hipótricos y perítricos, ciliados depredadores y otros invertebrados. Siguiendo el símil con los sistemas naturales, después de una perturbación fuerte, como la que puede suponer un choque de tóxicos, se da una regresión al nivel de organización del ecosistema, y se reinicializa la sucesión.

Esta sucesión desde que se pone en marcha el proceso, o a partir de alguna perturbación significativa, es paralela a una evolución positiva de la calidad del agua, por el que parece existir una correlación que permite utilizar el análisis ecológico para caracterizar el funcionamiento de la EDAR. Además, algunas de las especies de protozoos presentes en los lodos activos son descritas al Sistema de los Saprobis [Kolkwitz, 1935; Liebmann,

1962], índice biótico de calidad del agua a los sistemas naturales. Así, la presencia de una especie oligosaprobia será indicativa de la buena calidad del agua intersticial y del efluente, mientras que la presencia de alguna especie polisaprobia indicará todo lo contrario. Otra característica importante es la relativa independencia de la población establecida respecto a la que llega con el influente. Este hecho facilita la utilización de los mismos criterios por el control ecológico de sistemas de lodos activos situados a diferente localización geográfica, como por ejemplo el Índice Biótico de Madoni [Madoni, 1994].

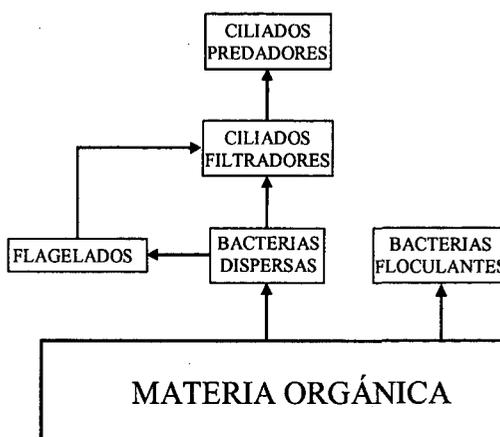


Fig. 1.20. Cadena trófica establecida al proceso de lodos activos

La figura 1.20 muestra una simplificación de la cadena trófica que se establece dentro el ecosistema generado por el proceso de lodos activos. La totalidad de la materia orgánica disuelta es consumida por los habitantes del nivel trófico inferior, las bacterias. De estas bacterias, una fracción queda atrapada por el mucílago que constituye el flóculo (bacterias floculantes), mientras que el resto siguen libres ocupando el líquido intersticial (bacterias dispersas). El nivel trófico superior es responsabilidad de los pequeños flagelados, predadores de estas bacterias dispersas, y a la vez fuente de alimento de los ciliados filtradores, que con el movimiento de sus cilios bucales provocan una turbulencia que arrastra las bacterias libres y los pequeños flagelados hacia su interior. Finalmente, el nivel superior de la cadena queda ocupado por los ciliados predadores, con plena libertad de movimiento por el licor mezcla, y que se alimentan de los filtradores.

1.3 CONTROL DE PROCESOS

Los sistemas basados en microorganismos están obligados a trabajar en unas condiciones muy específicas para poder obtener las transformaciones deseadas de una manera eficiente. El control de estos procesos es complejo, y se enfrenta además con el hecho de que las medidas necesarias para conocer el avance de un proceso basado en un bioreactor son muy variadas y en muchos casos no se dispone de una instrumentación en línea, aplicable de forma universal, para todas ellas.

La operación de un bioproceso puede verse afectada por diferentes perturbaciones que afectan a su eficacia. Estas alteraciones pueden afectar tanto a las características del influente que alimenta el proceso (caudal y concentración) como perturbaciones propias del mismo (averías, fallos de operación, grado de mezcla, etc.). Todos estos requerimientos imponen la necesidad de la continua monitorización de la operación del proceso así como la intervención (control) con el objetivo de garantizar que se cumplan los requisitos marcados en el mismo. Esto se lleva a término a través de una racional interrelación entre el equipo (sistemas de medida, válvulas, controladores, ordenadores, etc.) y la intervención humana, lo que constituye el sistema de control del proceso.

Es necesario destacar que existe retraso notable en la aplicación de sistemas de control avanzados a los procesos de producción biotecnológicos respecto a otros procesos industriales. En principio podrían aplicarse las mismas metodologías que son aplicadas en estas industrias, sin embargo hay tres dificultades particulares en el control de los procesos biológicos que explican este retraso y justifican un mayor estudio previo a su implementación:

- la limitación de métodos de análisis en línea adecuados
- la extraordinaria complejidad de este tipo de procesos y el elevado grado de interacción entre las reacciones bioquímicas y los fenómenos de transporte
- el complejo sistema regulador existente dentro de los propios microorganismos, teniendo en cuenta además que el sistema de control sólo puede manipular las condiciones ambientales extracelulares

1.3.1 OBJETIVOS DEL CONTROL.

La primera de las consideraciones a realizar para el diseño del sistema de control será la definición del

objetivo a alcanzar. Hay tres tipos de necesidades que tiene que satisfacer un sistema de control:

- **Eliminación de las perturbaciones externas.** Como perturbación externa se puede considerar el efecto del mundo externo en el proceso biotecnológico y que normalmente suele estar fuera del control del operador (temperatura externa, variaciones de caudal, concentración del substrato...) siendo necesario introducir un mecanismo de control que reduzca el impacto negativo que dichas perturbaciones puedan tener en la operación del proceso.
Por ejemplo, si se considera un proceso de digestión anaerobia de aguas residuales, el proceso puede estar diseñado para operar a una temperatura de 35 °C mientras que la temperatura ambiente puede variar entre 10 °C y 30 °C. Esto conlleva un proceso de transferencia de energía del bioreactor al exterior que depende de una variable externa que no se puede manipular. El sistema de control de temperatura del bioreactor tendría como objetivo realizar un aporte variable de calor para poder compensar las pérdidas energéticas y mantener el proceso en las condiciones de temperatura deseadas.
- **Estabilización del proceso.** Si bien algunos procesos son autoregulados, es decir, no necesitan intervención externa para su estabilización, el caso más habitual corresponde a aquellos que, evolucionando espontáneamente, presentan una respuesta inestable alejándose de las condiciones de trabajo deseadas. Este tipo de comportamiento hace necesario un control externo para su estabilización.
Por ejemplo, si se considera un proceso cuyo objetivo es el crecimiento de un microorganismo específico que se produce a un pH óptimo, los productos secundarios del crecimiento del microorganismo pueden producir una acidificación del medio de cultivo (tal como sucede en la nitrificación). El sistema de control de pH actuaría en el sistema con el objetivo de contrarrestar el efecto de los productos de la fermentación y mantener las condiciones de operación, en este caso el pH, en las óptimas para el crecimiento.
- **Optimización del rendimiento.** Un problema habitual en los procesos biotecnológicos y especialmente en las fermentaciones hace referencia a la posibilidad y/o necesidad de establecer diferentes condiciones de trabajo a lo largo del proceso para ir obteniendo en cada momento aquellas que permitan el mayor rendimiento del mismo. También los cambios en las propiedades reológicas del medio de cultivo implican la necesidad de disponer de un lazo de control que se adapte a la evolución del proceso.

1.3.2 TÉCNICAS DE CONTROL

Para llevar a cabo estos objetivos se han desarrollado o adaptado diferentes metodologías de control. La primera y más utilizada correspondería al control "feedback" o control por retroalimentación.

1.3.2.1 CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN

En este esquema de control (figura 1.21) se analiza a través de un sensor la variable que se quiere mantener controlada y se comparan los valores obtenidos en cada momento con un valor de consigna dado por el operador del sistema. A partir del error existente entre el valor deseado y el real, un controlador fija la actuación a realizar en el proceso a través de una modificación de la variable manipulada. Este tipo de control realiza la actuación únicamente una vez ya se ha producido la desviación del valor deseado y se detecta un error por lo que no evita desviaciones sobre el valor deseado sino que intenta minimizar el error producido.

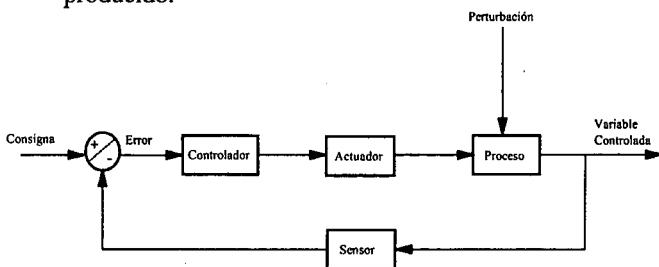


Fig. 1.21. Esquema de control por retroalimentación

Una mejora a esta metodología, siguiendo el mismo esquema, es el denominado control en cascada. Este tipo de control (fig. 1.22) establece dos bucles anidados; el exterior que mantiene la variable a controlar y un bucle interior aplicado sobre una variable auxiliar. Este bucle interior, que normalmente tiene una dinámica más rápida, permite ofrecer una respuesta inmediata a ciertas perturbaciones y disminuir las oscilaciones que aparecen en el control por retroalimentación.

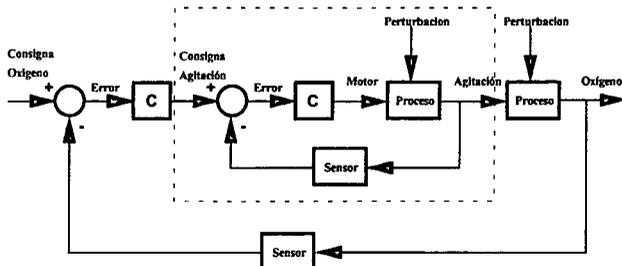


Fig. 1.22. Esquema de control en cascada

El esquema de la fig. 1.22 representa un sistema de control en cascada para el oxígeno disuelto de un

fermentador, donde la variable de actuación del bucle principal sería la consigna de agitación para un bucle interno de la velocidad de agitación del sistema. Cualquier perturbación que afectara a la velocidad de agitación y consecuentemente al oxígeno disuelto del sistema sería eliminada por el lazo de control interior mientras que el lazo exterior eliminaría variaciones en las condiciones del sistema (aumento del consumo de oxígeno, obturación del filtro de entrada...).

Metodología de control por retroalimentación

La metodología de control por retroalimentación se basa en la existencia de bucles retroalimentados como el indicado en la figura 1.21. En general este tipo de control realiza la medición de la variable que se quiere mantener (variable controlada) a un nivel de consigna prefijado y en caso de discrepancia (error) se actúa modificando el valor de alguna variable de entrada del proceso (variable manipulada).

En dicho bucle se distinguen los siguientes elementos:

- 1.- Elemento sensor.
- 2.- Elemento acondicionador o transmisor.
- 3.- Controlador.
- 4.- Elemento final de control.

Elemento sensor

Sin duda el primero de los requerimientos que debe cumplirse para poder realizar un control eficiente es el conocimiento de la evolución de la variable a controlar. Esta información se adquiere en general en forma de datos numéricos a partir de los elementos sensores correspondientes. Desde el punto de vista de control las variables más interesantes serán aquellas que puedan obtenerse en tiempo real.

Elemento acondicionador y transmisor

En el caso de utilización de sensores, estos proporcionan señales eléctricas que habitualmente no son utilizables directamente por el controlador. La señal producida por el sensor suele ser una corriente o un voltaje (aunque algunos casos puede ser una señal neumática o incluso digital) con una alta impedancia y pequeña en magnitud. Estas señales suelen presentar bastante ruido y estar sujetas a perturbaciones externas, y por ello que puede ser necesario un tratamiento previo a su utilización.

Controlador

Se pueden proporcionar, en principio, dos tipos de actuación respecto a la señal de error detectada:

- independiente de la magnitud del error (controlador ON/OFF)
- función del error (controladores P, PI, PID)

Controlador ON/OFF

Corresponde a la configuración más sencilla de control automático. En este caso la respuesta del controlador es independiente de la magnitud del error. Simplemente cuando detecta su existencia hace actuar, en toda su intensidad, al elemento final.

Si bien esto representa una instrumentación sencilla y de bajo coste, provoca simultáneamente la presencia de importantes oscilaciones. Necesariamente la respuesta del sistema de control debe ser superior a la magnitud de la perturbación para que ésta pueda ser corregida, lo que conlleva que el sistema trabaje en la práctica fuera del límite exacto establecido haciéndolo en una banda alrededor del valor prefijado.

Otro problema asociado a este tipo de control hace referencia al límite de detección del error o a la magnitud del error necesaria para que actúe el sistema de control. En el caso en que se quiera un control muy ajustado, el elemento final de control tendrá que actuar con elevada frecuencia lo que ocasionará importantes problemas mecánicos. Simultáneamente, dado el elevado tiempo muerto asociado a estos procesos, aumenta la posibilidad de inestabilidad del sistema. Es por ello que habitualmente este tipo de control no utiliza como consigna un valor exacto sino una banda fuera de la cual actúa el sistema de control. Naturalmente la magnitud de esta banda (conocida como 'banda muerta') dependerá del sistema a controlar, teniendo en cuenta que cuanto menor sea mayor será el esfuerzo solicitado al sistema, mientras que en caso contrario al ensancharse la banda la precisión con la que se obtiene la variable controlada disminuye. Todo ello lleva a que este tipo de control sea únicamente utilizado en aquellas situaciones donde no sea necesario un control muy estricto de la variable.

Controladores PID

Para eliminar los problemas asociados de la respuesta excesiva del controlador y su falta de modulación, se intenta ajustar dicha respuesta en función de la magnitud del error. La primera de las posibilidades es introducir un mecanismo que responda de forma proporcional (acción P) a dicho error $[e(t)]$.

$$c(t) = K_c \cdot e(t)$$

Ello implica la aparición de un primer parámetro de control a ajustar que corresponde a la ganancia (K_c). Este valor deberá ser seleccionado en función del proceso y de los objetivos. Un valor elevado de K_c aumenta las oscilaciones de la respuesta (en el límite tiende al control ON/OFF) mientras valores pequeños hacen la respuesta más lenta (en el límite corresponde a un sistema sin control).

Uno de los problemas asociados a este tipo de control corresponde al llamado error residual ("offset"). Una vez aparece la perturbación y alejado el proceso del valor deseado, la acción del sistema de control tiende a volver al valor original hasta un cierto valor a partir del cual el sistema no puede recuperar el valor inicial, apareciendo el error residual. Por ejemplo en el caso de que se haya producido una variación del caudal de entrada al fermentador, el controlador aumenta el caudal de salida intentando mantener el nivel en el valor establecido, a partir de un momento es incapaz de corregir totalmente el error acumulado inicialmente sin conseguir alcanzar el punto de consigna (fig. 1.23).

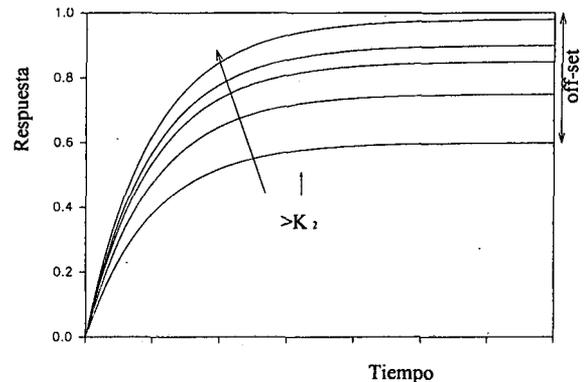


Fig. 1.23. Efecto de la ganancia en un controlador proporcional

Este error residual es menor cuanto mayor es la ganancia, por tanto una posibilidad de disminuir su valor puede ser aumentar K_c , teniendo en cuenta que un valor excesivo podría llegar a producir grandes oscilaciones e incluso inestabilización del proceso. Para eliminar este problema se añade el efecto integral en el que la respuesta tiene en cuenta el error acumulado.

$$c(t) = K_c \cdot e(t) + K_c / \tau_i \int_0^t e(t) dt$$

Este tipo de controlador presenta las ventajas del proporcional eliminando además el problema del offset, sin embargo la adición del efecto integral aumenta la lentitud de la respuesta del controlador por lo que en algunos casos puede ser necesario introducir un nuevo efecto que acelere la misma. La forma más habitual corresponde a la adición de un efecto derivativo en el que la respuesta es proporcional a la derivada del error.

$$c(t) = K_c \cdot e(t) + K_c / \tau_i \int_0^t e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

La adición de cada uno de los efectos hace aumentar el número de parámetros a determinar, para lo cual debe recurrirse al uso de las metodologías establecidas como pueden ser los métodos de Ziegler-Nichols o Cohen-Coon.

El controlador PID, con un correcto ajuste de sus parámetros, proporciona el mejor tipo de respuesta siguiendo la metodología de control por retroalimentación (en la figura 1.24 puede observarse un ejemplo del tipo de resultados obtenidos). Actualmente es el más ampliamente utilizado y se puede afirmar que es capaz de resolver de forma satisfactoria el 80% de las aplicaciones.

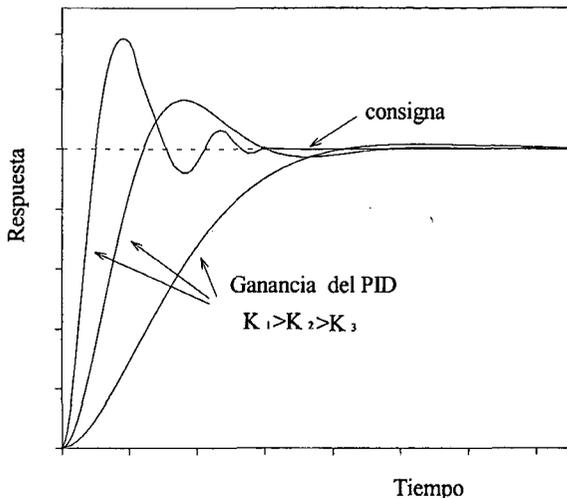


Fig. 1.24. Respuesta para un controlador PID

Elemento final de control

El elemento final de control varía según la variable a controlar. En el caso de la agitación la señal del control actúa sobre la regulación del motor de agitación (normalmente un variador de frecuencia), en el caso del pH el elemento final puede ser una bomba de dosificación de ácido o base. Sin embargo el elemento final de control más utilizado son las válvulas de control que permiten variar el paso de fluidos en función de la señal de control. Tradicionalmente son válvulas neumáticas que permiten regular el caudal de aire, la presión del bioreactor, los caudales de agua de refrigerante o calefacción, la adición de agente antiespumante o la variación de los caudales de entrada al bioreactor de nutrientes y/o substratos.

La regulación del grado de apertura de las válvulas de control se efectúa modulando la presión (0-1 bar) del aire de instrumentación suministrado a la membrana de la válvula que provoca el movimiento del vástago. A diferencia de otros procesos, en este caso hay que establecer precauciones especiales para asegurar las condiciones estériles del proceso.

1.3.2.2 CONTROL ANTICIPADO

Como ya se ha dicho los dos esquemas de control anteriores (por retroalimentación, cascada) solo actúan cuando se ha producido el error en la variable controlada. Se ha intentado utilizar una alternativa que actúa antes de que la perturbación aleje el sistema de

las condiciones deseadas. Esta es la base del control anticipado o control "feedforward" (fig. 1.25).

En el control anticipado se analiza la perturbación previamente a la entrada al sistema y se toma la acción de control necesaria para minimizar su efecto. La dificultad de disponer de modelos eficientes que permitan definir esta acción, conjuntamente con la práctica imposibilidad de identificar todas las perturbaciones posibles al sistema hacen que este tipo de control no sea utilizado de forma individual sino que trabaje siempre acoplado a un lazo de regulación por retroalimentación que permita en todo momento conocer y ajustar las desviaciones de la variable controlada.

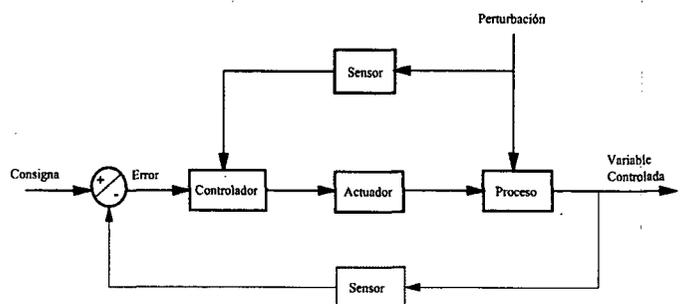


Fig. 1.25. Esquema de control anticipado ("feedforward")

1.3.2.3. CONTROL ADAPTATIVO

De forma más reciente, se ha desarrollado una serie de técnicas de control que parecen ser especialmente idóneas para poder superar los problemas que presentan los bioprocesos. El control adaptativo consiste básicamente en un estimador de parámetros que permite su sintonía a lo largo del proceso y un algoritmo de control. La sintonía de los parámetros de control se realiza generalmente a partir de medidas en línea del proceso y de un modelo de comportamiento.

Existen diferentes tipos de control adaptativo dependiendo de la forma que se realiza la sintonía de parámetros, siendo los más empleados los controladores autosintonizables (STR), el control con un modelo de referencia (MRAS) y el control predictivo (MPC). Además, la estimación puede ser realizada de muy diversas maneras: filtros de Kalman extendidos, ajuste por mínimos cuadrados, filtros adaptativos, etc. La elección del controlador a emplear vendrá determinada por las necesidades y el conocimiento adquirido del proceso.

Un controlador autosintonizable (figura 1.26) permite la adecuación de los parámetros del controlador (por ejemplo un PID) a las variaciones de las condiciones de operación. El ajuste de los parámetros puede realizarse a partir del análisis de los efectos causados por pequeñas variaciones

provocadas sobre la variable manipulada (en forma de pulsos o escalones).

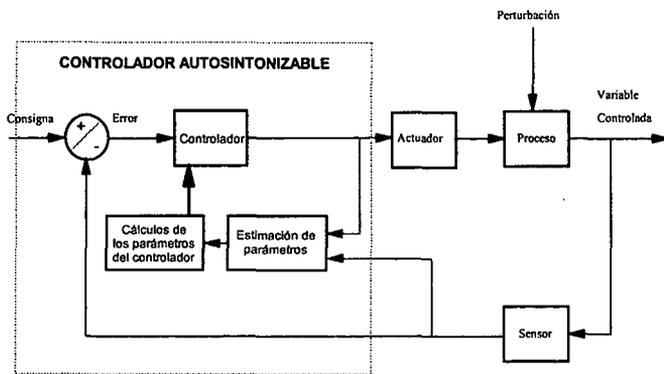


Fig. 1.26. Esquema de control adaptativo

Otra forma de autosintonizar los parámetros del controlador es empleando técnicas basadas en el estudio de los efectos causados sobre un lazo de control "feedback" por perturbaciones cíclicas. En estas técnicas se analiza el ciclo de oscilación límite con lo que se obtiene la información necesaria de la dinámica del sistema.

Un control con un modelo de referencia (MRAS) será muy útil cuando lo que se desee es mantener una trayectoria de fermentación prefijada. Este tipo de controlador (figura 11.7) requiere un buen modelo del sistema ya que lo que trata es de ajustar el comportamiento a lo que prevé el modelo.

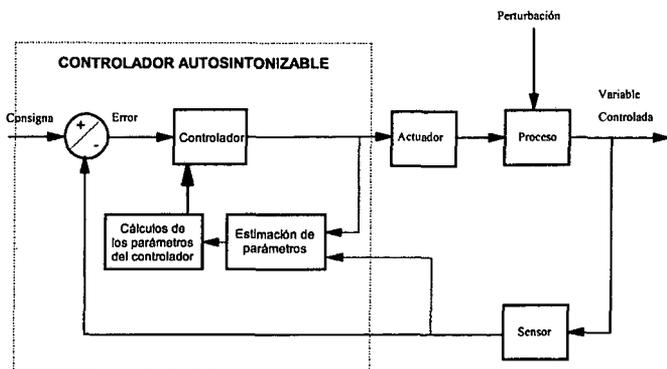


Fig. 1.27. Esquema de un lazo de control adaptativo de modelo de referencia

Un controlador de este tipo está formado por dos bucles anidados, siendo el interno un lazo de control "feedback" y dedicándose el externo al ajuste de los parámetros del controlador de forma que se minimice la diferencia entre el valor de salida previsto por el modelo y el valor medido.

El control predictivo presenta un gran interés en el caso de procesos con dinámicas lentas ya que este tipo de controlador permite reducir los tiempos muertos entre actuación y respuesta del sistema. El control predictivo no toma la decisión de control en

función del estado actual del sistema o de su historia pasada sino que decide la actuación a realizar en función de la evolución prevista del sistema.

Para cada período de muestreo se emplea un sistema de optimización que determina la actuación del controlador a aplicar en el siguiente intervalo de tiempo de forma que minimice la función de coste (error previsto del sistema, estabilidad...). La función de coste requiere un modelo matemático de la dinámica del proceso que permita predecir su comportamiento futuro.

Un ejemplo de técnica de control predictivo es la denominada de horizonte móvil (figura 1.28). El funcionamiento de esta técnica está basado en la realización, en un instante t_0 , de diferentes simulaciones del comportamiento futuro del sistema en función de la estrategia de control escogida. La acción de control así definida sólo se realiza durante un período de muestreo ya que transcurrido este tiempo se vuelve a definir una estrategia de control óptima.

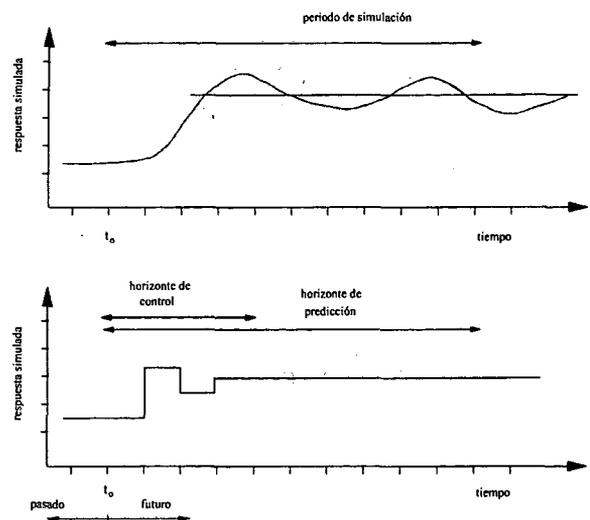


Fig. 1.28. Esquema general de la metodología de un control predictivo (horizonte móvil)

Este sistema presenta como inconvenientes la necesidad de un modelo del proceso, aunque no es necesario que sea de una alta fiabilidad, y la necesidad de realizar una serie de simulaciones. A cambio se obtiene un sistema en que las acciones de control no se toman sin tener en cuenta la evolución futura del proceso por lo que se consigue un sistema de control mucho más estable.

1.3.2.4. TÉCNICAS AVANZADAS EN EL CONTROL DE PROCESOS

El importante desarrollo de la automática y de la informática ha hecho surgir toda una serie de nuevas herramientas matemáticas que amplían de forma muy importante las posibilidades del control de procesos.

Redes neuronales

Recientemente se ha incrementado el interés en el campo del control de procesos basado en redes neuronales. Estos modelos están inspirados en redes neuronales biológicas y están formadas por muchas neuronas (o unidades) interconectadas. Las redes neuronales basadas en multicapa consisten en un conjunto de neuronas organizadas en diferentes capas y con conexiones "feedforward" entre capa y capa. La salida de una neurona viene dada por una expresión del tipo

$$y = f\left(\sum_{j=1}^n w_j u_j\right)$$

donde u_i es la entrada número i , w_i es el peso asociado a u_i y f es, normalmente, una función sigmoideal:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$$

Ha sido demostrado que muchos tipos de funciones continuas pueden ser aproximadas por una red neuronal multicapa. Las redes neuronales son capaces de aprender relaciones lineales y no lineales. Hay también algoritmos, como propagación hacia atrás ("back propagation") de modo que la función puede ser construida proveyendo a la red con un conjunto de valores y argumentos. El aprendizaje se realiza dando a la red una entrada y la correspondiente salida deseada. Este procedimiento se repite con diferentes conjuntos de datos entrada - salida. Los algoritmos ajustan los pesos para que la red proporcione la respuesta deseada. Hay fuertes conexiones entre las redes neuronales y los sistemas adaptativos. Los algoritmos utilizados para entrenar las redes neuronales pueden ser interpretados como versiones especiales de sistemas adaptativos basados en modelos de referencia.

Una dificultad en estos sistemas es que no hay procedimientos sistemáticos para determinar el número de capas y neuronas requeridas para aproximar satisfactoriamente una determinada función. Estos parámetros son, por tanto, determinados por prueba y error.

Actualmente, hay un gran interés en usar redes neuronales en la industria de proceso. Los modelos basados en principios básicos son costosos en aplicaciones de control de procesos, ya que no pueden ser transportados fácilmente de una planta a otra. Las redes neuronales parecen ser una aproximación genérica que puede ser aplicada a muchas plantas

dentro de una compañía utilizando los datos históricos para construir los modelos. De este modo, los modelos basados en redes neuronales pueden tener una buena relación coste / efectividad.

Lógica difusa (Fuzzy Logic)

Otra técnica basada en inteligencia artificial que va ganando importancia lentamente es la lógica difusa. Éste es un método para representar variables de proceso continuas mediante el uso de reglas en vez de modelos matemáticos precisos. La lógica difusa se ha popularizado en Japón, donde ha sido aplicado principalmente a productos de consumo. Esta tecnología está empezando a aplicarse en la industria de proceso, particularmente en el control de procesos.

En el control difuso, las órdenes de control son desarrolladas en términos de reglas imprecisas con relación a los valores de las variables medidas, con ajustes planificados de las variables manipuladas. En sistemas convencionales de control, se mide una señal precisa del proceso y entonces se aplica un algoritmo de control basado en un modelo matemático. El control difuso está basado en el conocimiento, en forma de reglas que describen el comportamiento del sistema. Este control es una alternativa valiosa cuando un modelo matemático del sistema no es conocido o es demasiado complejo para desarrollarlo.

El procedimiento utilizado por un controlador difuso se basa en tres pasos. Inicialmente, se lleva a cabo la transformación de las variables continuas en variables lingüísticas difusas, mediante un proceso llamado fuzzificación, que determina el grado de pertenencia a cada clase de cada una de las variables. Posteriormente, la ley de control difusa transforma los datos obtenidos en el paso anterior en una señal de control en forma de variable lingüística, utilizando las leyes de control difusas que describen el sistema. Por último, la variable lingüística proporcionada por la ley de control es transformada en una variable continua utilizada para controlar la variable manipulada, mediante una operación conocida como defuzzificación.

La lógica difusa parece ajustarse bien al mundo no lineal del control de procesos químicos. Otra ventaja de estos sistemas es que pueden disminuir las desviaciones de un determinado punto de consigna respecto a un controlador tradicional.

Por otro lado, parece ser que los controladores difusos están indicados para tareas de control sencillas. Todos los cálculos pueden hacerse con aritmética entera, lo que simplifica la construcción de los controladores, y explica su uso en aplicaciones de electrónica de consumo.

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos, al igual que las redes neuronales, pueden ser comparados a procesos biológicos. En evolución natural, ciertas características que contribuyen a la supervivencia de las especies son pasadas de generación en generación. Este proceso mejora la calidad de la población en su conjunto a medida el ciclo evolutivo progresa. Los algoritmos genéticos funcionan de un modo similar, como un procedimiento de búsqueda optimizado.

El algoritmo comienza con una generación aleatoria de muestras representativas del espacio de búsqueda. Estos datos son codificados en un esquema de representación para el algoritmo (generalmente, dígitos binarios). Si la muestra de población cumple los criterios de optimización, el algoritmo para. Si no los cumple, los miembros de la población son seleccionados para la reproducción, basándose en criterios de ajuste. Parejas aleatorias de miembros son acoplados, con segmentos de la cadena que los representa intercambiados entre ellos. Este proceso se

conoce como entrecruzamiento. La mutación es el cambio de uno o más bits en una cadena. Esto sirve para aumentar el espacio de búsqueda y puede ayudar al proceso de búsqueda, evitando que el algoritmo pare en un máximo o mínimo local. Esta nueva generación es evaluada utilizando los criterios de ajuste. Si los criterios no se cumplen, el proceso es repetido.

La aplicación práctica de esta tecnología reside en su habilidad para encontrar soluciones adaptativas en un ambiente dinámico. Los algoritmos genéticos son prometedores en aplicaciones híbridas, con otras tecnologías que se pueden beneficiar de un algoritmo de optimización robusto. Por ejemplo, las aplicaciones de redes neuronales pueden ser mejoradas con un algoritmo genético diseñado para el entrenamiento de una red en ambientes dinámicos. Esto aliviaría los problemas de disminución de rendimiento de las redes neuronales después del entrenamiento.

Por el momento, los algoritmos genéticos son más un tema de investigación que un sistema que haya demostrado su valor en aplicaciones prácticas.

1.4 SISTEMAS EXPERTOS EN CONTROL DE BIOPROCESOS

A los ingenieros de bioprocesos les gustaría disponer de sistemas de control para los procesos biotecnológicos con características de seguridad, altas prestaciones y capacidad de manejo de forma inteligente de las diversas situaciones en las que puede encontrarse el proceso. Tradicionalmente, esto se ha conseguido mediante la aplicación de modelos matemáticos cada vez más complejos para la modelización global y el control de los sistemas biológicos. La gran complejidad e incertidumbre de los procesos de fermentación requieren una lógica de operación sofisticada, que no se puede ajustar fácilmente al marco matemático del control convencional. Estos sistemas de control están basados en algoritmos formales de validez limitada, que no son capaces de explicar amplios rangos de hechos y fenómenos, y a menudo permanecen ajenos a la situación real de la planta, con todas sus peculiaridades y cambios dinámicos. Estas dificultades con la aplicación de la teoría de control convencional a los complejos y sólo cualitativamente entendidos sistemas biotecnológicos son la razón de que el control de los procesos de fermentación sea todavía fundamentalmente manual y de que la industria biotecnológica lleve un gran retraso en la automatización de las plantas respecto a otras industrias.

La necesidad de mejorar el control ha llevado a la búsqueda de nuevos métodos capaces de utilizar los diferentes tipos de conocimiento disponibles en una planta biotecnológica. Una alternativa valiosa ha sido encontrada en la metodología de los sistemas basados en el conocimiento (SBC, Knowledge Based Systems, KBS). La aproximación SBC encaja bien con el control de bioprocesos, por su capacidad de trabajar con conocimiento fragmentado, incierto, cualitativo y mezclado, el tipo de conocimiento típicamente disponible para los sistemas biológicos [Konstantinov, 1992a].

Hasta ahora, la aproximación SBC ha sido utilizada con éxito en el control de diversos bioprocesos: tratamiento de aguas residuales, producción de levaduras, bacterias, enzimas, antibióticos o aminoácidos. Estas variadas aplicaciones muestran su dinámica evolución. Comenzando con el diseño de controladores basados en lógica difusa (fuzzy logic) de bajo nivel y pasando por el desarrollo de prototipos de sistemas expertos, las técnicas basadas en el conocimiento para el control de bioprocesos han alcanzado una nueva fase con el desarrollo de

sistemas expertos de alto rendimiento con abundantes capacidades funcionales.

1.4.1 ARQUITECTURA DE SISTEMAS PARA CONTROL EXPERTO

Hay varios modos de incorporar el conocimiento experto en un sistema de control de procesos. Estos pueden ser reducidos a dos esquemas básicos de control experto, conocidos como directo y supervisor (o indirecto) [Konstantinov, 1993].

Los sistemas directos (figura 1.29) son aquellos en los que los módulos basados en el conocimiento forman parte del lazo de control. Estos módulos operan al mismo nivel que los controladores PID estándar, y son útiles en realizar algoritmos de control más complicados, no lineales. Estos módulos son conocidos mayoritariamente como controladores difusos (fuzzy), porque suelen estar basados en lógica difusa. Desarrollos recientes en redes neuronales proporcionan otra alternativa para el diseño de ese tipo de controladores. Generalmente, el sistema de control directo experto, aunque es útil en algunos casos, está limitado a problemas locales y de bajo nivel. Esto significa que aplicabilidad al control de bioprocesos es posible, pero de ámbito limitado.

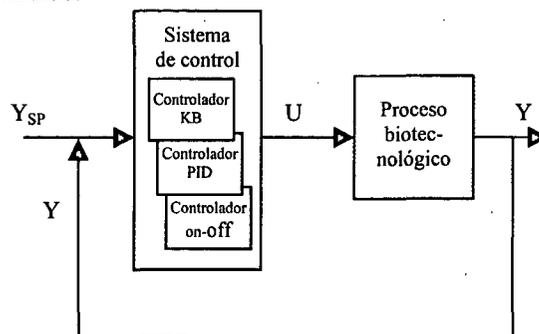


Fig. 1.29. Estructura de un sistema para control experto directo

Aplicaciones recientes de este tipo de controladores abundan en la literatura. Menzl [1996] muestra la aplicación de un controlador fuzzy al control del pH. Müller [1997] describe la utilización de un controlador fuzzy para la detección de condiciones peligrosas a la entrada de plantas depuradoras, como sobrecargas o compuestos tóxicos e inhibitorios. Las acciones de control que manejan esas situaciones se basan en la modificación de caudales de las diferentes corrientes de la planta. Chang [1998] muestra la aplicación de un controlador fuzzy a un proceso de eliminación de fósforo, en el que la variable controlada es el caudal de recirculación. Cohen [1997] utiliza estos controladores para el control de reactores secuenciales. Manesis [1998] presenta un tipo de control fuzzy que puede ser

implementado en un PLC comercial. El prototipo requiere medidas de amoníaco, nitrato, oxígeno, temperatura, sólidos en suspensión y DBO, en la entrada y la salida. Con esa información y unas 50 reglas fuzzy se controla DBO, nitrificación y desnitrificación. Aparte de los requerimientos de información necesarios para ese controlador, sólo ha sido comprobada la viabilidad del sistema mediante simulación. La complejidad del escenario real muestra la dificultad encontrada en la aplicación de estos sistemas en un nivel superior al del control local, donde técnicas como las mostradas con anterioridad pueden ser aplicadas con éxito.

La estructura de un sistema para control experto supervisor es mostrada en la figura 1.30. Está compuesta de dos niveles jerárquicos, marcando una clara distribución de las funciones del sistema. El conjunto estándar de tareas de control, tal como medidas, filtros, adquisición de datos, control, etc., es encargado al nivel inferior, que representa un sistema de control convencional. Tales sistemas están incluidos en casi todos los equipos biotecnológicos modernos, tanto en la forma de controladores independientes o como algoritmos implementados en ordenadores. El nivel superior representa una superestructura basada en el conocimiento por encima del control convencional.

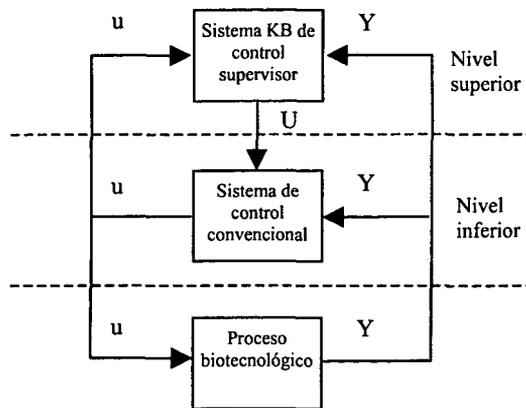


Fig. 1.30. Estructura de un sistema de control experto supervisor

En comparación al esquema directo, el módulo del sistema basado en el conocimiento, que de hecho es un sistema experto completo, no está explícitamente involucrado en el control a bajo nivel: no genera señales de control hacia la planta, sino ayuda al sistema de control de bajo nivel a hacer mejor su trabajo. Para este fin, el nivel superior manda órdenes de supervisión que le dicen al nivel inferior cuando realizar determinadas tareas. Como las técnicas para el diseño de controladores de bajo nivel están relativamente bien establecidas, la síntesis de la parte convencional del sistema no tiene que causar excesivas dificultades. De este modo, el éxito de todo el desarrollo del sistema depende principalmente del diseño del módulo basado en el

conocimiento utilizando una herramienta de desarrollo de sistemas expertos (HDSE) adecuada.

El concepto de control experto supervisor ofrece nuevas posibilidades para el desarrollo de sistemas inteligentes de control de bioprocesos de alto rendimiento. Esta estructura flexible combina las ventajas de la aproximación tradicional con las de la de los SE. Permite la mejora del sistema de control mediante la capacidad inteligente de efectuar decisiones basándose en la interpretación experta del comportamiento complejo del sistema vivo. Si está adecuadamente implementada, esta estructura será capaz de cubrir diferentes problemas de control que normalmente están fuera del alcance de los sistemas convencionales.

1.4.2 FUNCIONES DEL MÓDULO BASADO EN EL CONOCIMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL

Las características de la HDSE necesaria para la construcción del módulo basado en el conocimiento están relacionadas con las funciones que este módulo deberá realizar en tiempo real. Aunque pueden aparecer diferencias dependiendo de la aplicación, las funciones pueden ser clasificadas en cinco grandes apartados [Konstantinov, 1992a] [Konstantinov, 1993]:

- **Validación de los datos de entrada.** Generalmente, la validación consiste en el chequeo de la violación de regiones físicas o fisiológicas de cada variable de proceso y de su derivada, por no concordar con los datos de fermentaciones previas o por contradecirse con otros datos del proceso. Ejemplos del tipo de validación requerida pueden encontrarse en [Kanaya, 1996], donde se muestran técnicas para la detección de datos inusuales, para la prevención de acciones de control incorrectas. Se examinan diferentes criterios para detectar datos incorrectos: límites superior e inferior, velocidad de cambio excesiva, velocidad de cambio demasiado lenta, relación con otros instrumentos, comparación con instrumentos similares o detección de tendencias incorrectas. Önerth [1996] también muestra la aplicación de métodos estadísticos para validar las señales.
- **Identificación del estado de la población celular.** En este apartado se incluye la evaluación en línea del estado fisiológico de la población celular, predicción de futuros estados, detección y diagnosis de fenómenos fisiológicos esperados (cambios de estado) o inesperados (desviaciones del comportamiento normal). Ésta es la más importante, difícil y avanzada función

del sistema supervisor. En plantas depuradoras, esto se puede traducir como la presencia de crecimientos microbiológicos indeseados (fenómenos de "bulking"), aparición de condiciones negativas para la operación como "foaming" o "rising", así como cambios de población por variación de la edad de los lodos.

- **Identificación del estado del equipo de proceso.** La principal tarea en este apartado es la detección y la diagnosis de los errores instrumentales, tal como problemas con los sensores o actuadores. Esta función debe estar explícitamente separada de la anterior, para contribuir a la modularización de la base de conocimiento del sistema experto.
- **Supervisión del control convencional de la planta.** Las tareas anteriores son procedimientos pasivos, que muestran información sobre la planta. Para que esta información sea útil, esta debe ser transformada en órdenes de alto nivel para la supervisión y sincronización del trabajo del nivel de control convencional inferior. El propósito principal es obtener un control inteligente de los fenómenos fisiológicos durante el proceso. Órdenes supervisoras típicas son activación y desactivación de lazos de control (cambios en la estrategia de control), modificación de parámetros de control, cambios de puntos de consigna, etc.

Debe observarse especial atención a la capacidad de cambiar de estrategia, que es necesaria para responder a las transformaciones estructurales en los sistemas biológicos. En el caso de cambios fisiológicos drásticos, la parte basada en el conocimiento debe reaccionar replanteando dinámicamente el proceso. Estas capacidades avanzadas no pueden ser conseguidas mediante una simple lista de órdenes supervisoras, requiere una segmentación interna de la base de conocimiento, estableciendo una relación jerárquica entre sus componentes.

La supervisión del sistema también es necesaria para manejar fallos en los instrumentos. El objetivo es compensar en lo posible cualquier daño, y permitir al sistema mantener una operación segura bajo circunstancias anormales, es decir, asegurar un comportamiento robusto y tolerante a fallos.

- **Monitorización inteligente de la planta biotecnológica.** Una función similar de creciente importancia es la especial supervisión del funcionamiento de los complejos equipos de medida modernos. El mejor recurso es encargar esta tarea al sistema basado en el conocimiento, lo que proporcionará un funcionamiento

coherente y coordinado de todos los componentes del sistema.

- **Comunicación avanzada con el usuario.** El módulo basado en el conocimiento debe ser capaz de representar toda la información del proceso, así como explicar sus decisiones y actividades en una forma adecuada al usuario. De hecho, esta función es obligatoria para todo sistema experto, pero las restricciones de tiempo real imponen algunos requisitos específicos más.

1.4.3 ESQUEMAS DE IMPLEMENTACIÓN

Dependiendo del método de acoplamiento del módulo basado en el conocimiento con la parte de control convencional, son posibles dos tipos de esquema de implementación:

- **Esquema conectado.** El módulo basado en el conocimiento reside en un ordenador dedicado, conectado al módulo de control convencional (figura 1.31). Las dos partes son independientes en el software y el hardware. Generalmente, el sistema superior es comprado (como una HDSE), desarrollado y añadido separadamente, después que la parte convencional ha sido puesta en operación.

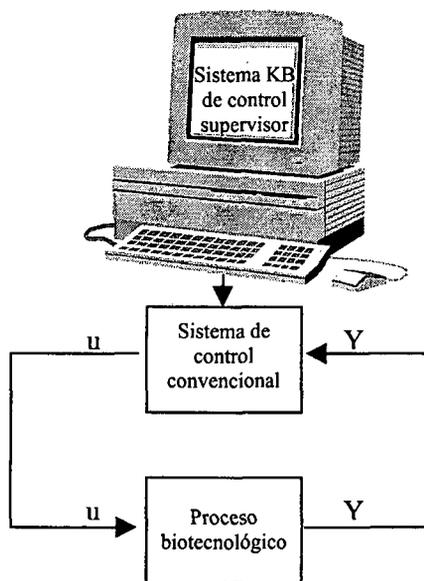


Fig. 1.31. Esquema de implementación del SBC conectado

Actualmente, debido a la ausencia de alternativas realistas, este esquema conectado es la solución estándar para el problema de control de bioprocesos con sistemas basados en el conocimiento. Esto es debido a que las HDSE disponibles son programas de gran tamaño diseñados para ser ejecutados en ordenadores

separados siguiendo este esquema. Además, los modernos bioreactores son equipados con controladores de bajo nivel que realizan algunas de las tareas del módulo de control convencional, y que pueden ser conectados a un sistema superior.

Aunque popular, esta arquitectura tiene algunas desventajas: el software de ambos sistemas es proporcionado por diferentes distribuidores, lo que dificulta la integración, la comunicación entre ordenadores puede causar problemas y el almacenamiento de la información y la interfaz hombre-máquina del sistema puede ser redundante.

- **Esquema integrado.** En este caso (figura 1.32), el módulo basado en el conocimiento está integrado en el entorno de control en tiempo real, coexistiendo con los algoritmos de control convencional en el mismo ordenador. La integración entre ambas partes es más eficiente, y los problemas de comunicación del esquema conectado son evitados. La implementación de este esquema es difícil porque los sistemas de desarrollo de sistemas expertos actuales no están diseñados para este tipo de integración. Otra desventaja es la vulnerabilidad de todo el sistema de control a un fallo en cualquiera de los módulos del sistema. Esta arquitectura es menos tolerante a fallos porque los dos niveles de control están integrados en un solo ordenador, lo que va en dirección opuesta a las tendencias de control distribuido actuales.

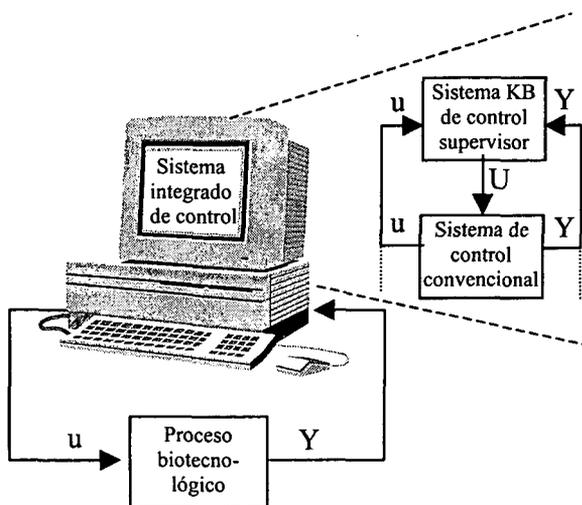


Fig. 1.32. Esquema de implementación del SBC integrado

1.4.4 CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS A LAS HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE SISTEMAS EXPERTOS

Algunas de las capacidades de tiempo real de las HDSE usadas para el control de bioprocesos son comunes a los sistemas diseñados para aplicaciones en tiempo real en general, mientras que otras son más específicas a bioprocesos.

1.4.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES:

Capacidades de tiempo real

Las capacidades de tiempo real de las HDSE son de gran importancia en el control de procesos. Estas capacidades tienen considerable impacto sobre todas las características del sistema. Por esta razón, estas herramientas de desarrollo son clasificadas en dos grandes grupos: tiempo real y no tiempo real, lo que representa no una única característica, sino un conjunto de ellas:

- **Tiempo de respuesta corto.** La velocidad de ejecución es una característica a considerar cuidadosamente en los sistemas de control por ordenador. Esto es particularmente importante en los SE, que debido a que procesan información simbólica, son conocidos por lentos y difíciles de manejar. El tiempo de respuesta requerido en control de bioprocesos depende de la aplicación particular, aunque por lo general las limitaciones de velocidad no son tan rígidas como en otros procesos tecnológicos. Éstas varían desde pocos segundos (para manejar fenómenos rápidos como saltos de OD, o fallos instrumentales) a varias horas (para interpretar cambios en estados fisiológicos). En plantas depuradoras de aguas residuales estas dinámicas puede alargarse más todavía, coincidiendo por ejemplo con la variación en las características de la entrada, con frecuencias diaria, semanal o incluso estacional.

Por lo general, las HDSE no son desarrolladas utilizando lenguajes simbólicos tipo Lisp o Prolog, sino un lenguaje convencional como C, que les proporciona más rapidez de ejecución. Otra ganancia de velocidad del sistema puede obtenerse utilizando una HDSE basada en la compilación de la base de conocimiento de una forma textual (interpretada) a una forma comprimida (compilada). Sin embargo, este procedimiento impide el cambio en línea de la base de conocimiento, algo muy habitual en este tipo de desarrollos. Una combinación de ambos procedimientos (interpretativo y compilador),

conocido como compilación incremental, es una mejora que algunos sistemas implementan. Además de las mejoras de las HDSE, debe considerarse también las mejoras en el hardware, que producen un incremento periódico en la capacidad y velocidad de los sistemas.

- **Activación de reglas en función del tiempo.** Cualquiera de estos sistemas debe ser capaz de interpretar instrucciones del tipo: 'Ejecuta la regla X cada 5 minutos', es decir, especificar un intervalo de activación específico para cada regla. Además, este valor debe ser actualizable dinámicamente utilizando por ejemplo otras reglas.
- **Actuación dentro de un tiempo máximo (tiempo de respuesta garantizado).** El tiempo de respuesta del sistema es difícil de predecir sin un mecanismo de este tipo. Este tiempo dependerá del tamaño de la base de conocimiento, el número de tareas simultáneas y de la disponibilidad de los datos necesarios para la inferencia. En el caso de no disponer de un dato necesario para la inferencia, debe existir un mecanismo alternativo que permita efectuar una decisión urgente, aunque sea posiblemente una solución subóptima.
- **Operación cíclica continua.** Contrariamente a los SE convencionales, que terminan después de completar la decisión, los usados en control de procesos deben ser capaces de trabajar continuamente, en un ciclo sin fin. Aunque este requerimiento parece simple, no es siempre satisfecho, especialmente en algunos sistemas expertos desarrollados con lenguajes simbólicos como Lisp. Este lenguaje dispone de un sistema de gestión de memoria no pensado para un entorno de tiempo real, lo que puede provocar problemas en tiempo de ejecución.

Además de las características anteriores, el SE heredará gran parte del comportamiento del sistema operativo en el que se desarrolle. Si el sistema operativo no es de tiempo real, al SE le faltarán características de tiempo real. De este modo, las herramientas diseñadas para sistemas operativos sin tiempo real (como DOS[®]) son básicamente inapropiadas para aplicaciones de control. Desde este punto de vista, los más apropiados sistemas de desarrollo de sistemas expertos trabajan en entornos UNIX (o similares a UNIX) de tiempo real, como QNX[®].

Razonamiento temporal

El razonamiento temporal es la capacidad del SE para razonar acerca de sucesos o fenómenos discretos o continuos, teniendo en cuenta la

dimensión del tiempo [Konstantinov, 1992b]. El razonamiento temporal está estrechamente ligado a las características de tiempo real del sistema. Diferentes aspectos del razonamiento temporal pueden ser muy útiles en el control de bioprocesos:

- **Razonamiento sobre la historia de variables de proceso continuas.** La necesidad de monitorizar fenómenos fisiológicos complejos con un número reducido de sensores obliga a extraer la mayor información posible de las variables disponibles y de sus históricos. En consecuencia, las decisiones de un operador humano suelen estar basadas en los valores actuales de las variables y en su perfil histórico reciente. El sistema experto debe ser capaz de detectar estos perfiles y esquemas de comportamiento, es decir, violaciones de restricciones, tendencias, o formas, en conjuntos de datos históricos especificados. Hay muchos casos en que la información de los sistemas biotecnológicos puede ser interpretada adecuadamente mediante la observación de tendencias en las variables.

Otra forma útil de razonar acerca de la historia de las variables es utilizar los datos sobre un periodo determinado para calcular algunas variables estadísticas, realizando decisiones basándose en sus valores. Este tipo de análisis puede ser útil, por ejemplo, en la detección de errores de funcionamiento en sensores.

- **Razonamiento acerca de sucesos y situaciones pasadas.** Los razonamientos respecto al tiempo pueden ser también aplicados a algunos sucesos y situaciones detectadas por el SE, y que su incidencia puede afectar a la decisión en la situación actual. Los sistemas expertos en tiempo real almacenan los eventos y sucesos ocurridos junto a su tiempo de aparición, lo que permite utilizarlos en el proceso de inferencia.

Otra forma de razonamiento temporal está representada por la introducción de límites superiores e inferiores para sucesos esperados. El sistema debe chequear si el suceso se ha producido dentro del intervalo previsto.

Integración con módulos de software externos

El módulo de control basado en el conocimiento no es un sistema aislado. Para realizar su función necesita el intercambio de información con el resto del sistema. Esto significa que la HDSE debe estar provista de sistemas de comunicación con elementos externos.

- La HDSE no puede tener todos los algoritmos de control necesarios en situaciones específicas, por

lo que es requerida la capacidad de integrar algoritmos definidos por el usuario. La integración puede ser entendida como la incorporación de módulos externos en el cuerpo del SE, o el establecimiento de canales de comunicación entre el SE y los módulos externos.

- El SE debería ser capaz de comunicarse con equipos externos, utilizando puertos de comunicación. En otros casos puede ser necesario enviar directamente señales a los equipos. Esta comunicación se realiza por software, lo que reduce el problema a la integración del SE con los programas del usuario.

La mayor parte de SE actuales no están diseñados para comunicarse con programas en tiempo real, sino sólo a través del teclado con el operador. Los productos que si soportan esta comunicación utilizan dos mecanismos diferentes: intercambio de mensajes mediante un protocolo establecido o uniones por software que permiten la incorporación del código del usuario directamente en el SE. Esta última es más eficiente, pero los errores en los programas de usuario pueden provocar la desestabilización del SE.

Mecanismos para estructurar el conocimiento

El conocimiento de un bioproceso no es un conjunto homogéneo de información, está altamente estructurado de acuerdo con ciertos criterios funcionales o temporales. Por ejemplo, en el caso de un cultivo semicontinuo, en cada una de las etapas se requieren diferentes parcelas de conocimiento, es decir, para un estado específico sólo un grupo de reglas debería funcionar. La aplicación de reglas que no pertenecen al contexto actual puede ser indeseable o incluso peligroso. Consideraciones similares pueden extraerse para cultivos continuos, aunque la estructura no tendrá un sentido cronológico, sino que los grupos de reglas corresponderán a posibles situaciones del proceso. Para la manipulación dinámica del conocimiento, las HDSE deben proporcionar mecanismos para la activación y desactivación de grupos de reglas particulares.

El agrupamiento explícito de reglas representa el modo más simple de estructurar el conocimiento. Aunque en muchos casos puede trabajar adecuadamente, las HDSE ofrecen mecanismos más sofisticados para determinar el conjunto de reglas actualmente activas. Generalmente están basados en algún criterio asociativo, por ejemplo todas las reglas relacionadas con una clase de objeto particular o un tipo de problema. La capacidad de conducir el motor de inferencia a limitar su campo de interés, y usar sólo parte del conocimiento, es

conocida como capacidad de 'enfocar su atención'. Otra forma de estructurar el conocimiento es asignar prioridades a las reglas. La prioridad representa la importancia de la regla particular: una regla será chequeada sólo después de que todas las reglas de prioridad superior hayan sido procesadas. Este mecanismo es útil, porque asignando diferente prioridad a diferentes grupos de reglas, una parte del conocimiento puede ser forzado a actuar antes de otra.

Aparte de la claridad lógica, hay dos ventajas importantes de la estructuración del conocimiento. En primer lugar, la velocidad del sistema es mejorada porque se reduce el número de reglas que se requiere procesar en cada momento. En segundo lugar, la estructuración del conocimiento simplifica la depuración de la base de conocimiento.

Manejo de varias categorías y niveles de conocimiento

Una característica fundamental de las HDSE es su flexibilidad en la representación del conocimiento. Esto es crucial en el campo del control de bioprocesos, donde varias categorías de conocimiento están envueltas, desde experiencias superficiales a modelos analíticos fundamentales. Generalmente, el desarrollo de un sistema de control es la tarea final de una investigación de múltiples fases, incluyendo estudios genéticos, bioquímicos, microbiológicos y de comportamiento del microorganismo de interés. Para sacar provecho de la información acumulada en cada uno de estos estudios, la HDSE debe proporcionar abundantes capacidades de representación y manejo de los distintos tipos de conocimiento.

Aunque la aproximación del SE es intuitivamente considerada heurística, la heurística generalmente representa sólo una parte del conocimiento disponible. Las capacidades del SE no deberían estar limitadas a la representación del conocimiento de este tipo. El conocimiento de los bioprocesos puede estar disponible en la forma de modelos analíticos (ecuaciones diferenciales, balances de materia y energía, modelos cinéticos, ecuaciones estequiométricas), modelos cualitativos, o información fundamental sobre la genética de la célula y su metabolismo. Ese conocimiento está representado en diferentes formas, y el SE debería ser capaz de manejar cualquiera de ellas. Cuando se desarrolla un nuevo SE, el conocimiento disponible debería ser analizado inicialmente, las categorías del conocimiento determinadas y, basándose en ello, escoger la HDSE más conveniente.

Además de en la forma, el conocimiento difiere también en la profundidad. Los SE suelen ser acusados de ser modelos superficiales de su dominio

de aplicación, en el sentido de que extraen conclusiones directamente de los fenómenos observados, sin penetrar en el mecanismo subyacente. El funcionamiento de los SE puede ser mejorado por el enriquecimiento de este conocimiento superficial con conocimiento más profundo, que provea interpretación consistente de los hechos, basándose en los mecanismos, estructuras y dependencias subyacentes.

A menudo, el conocimiento profundo está representado en la forma de modelos matemáticos. Estos pueden ser muy útiles en resolver tareas para la detección de fallos de sensor, desviaciones del comportamiento esperado, estimación de variables inaccesibles, pronósticos, planificación, validación de hipótesis y comprobación de la base de conocimiento. Desde este punto de vista, la tecnología de sistemas expertos no debería ser considerada contradictoria a las técnicas de modelización, al contrario, la importancia de modelos analíticos en los SE se espera que sea más profunda. Ya existen desarrollos aplicados a plantas depuradoras que utilizan modelos matemáticos desarrollados [Moreno, 1992] en unión a sistemas expertos [Serra, 1993], una muestra de que la integración de ambas técnicas puede ser productiva.

Depuración e integración eficiente del conocimiento

La construcción de una base de conocimiento es una tarea incremental y repetitiva. Unas pocas reglas deben ser primero definidas y probadas, y entonces unas pocas más añadidas. Después de cada actualización, el conocimiento debe ser validado de nuevo. Esta es una tarea obligatoria, dado que inicialmente el conocimiento contendrá errores lógicos e inexactitudes. Para facilitar su localización y eliminación, las HDSE deben proporcionar mecanismos para ello, generalmente conocidos como depuradores del conocimiento.

Los sistemas de desarrollo de SE suelen incluir capacidades para depuración off-line de la base de conocimiento, como establecer puntos de parada dentro de reglas y seguimiento paso a paso del proceso de inferencia. Los sistemas más avanzados proporcionan mecanismos conocidos como comprobadores de la integridad del conocimiento, que examinan las reglas en busca de inconsistencias lógicas, como cláusulas a las que no se puede llegar o de las que no se puede salir, cláusulas cíclicas, redundantes o reglas contradictorias.

Antes de la operación real, la base de conocimiento debe ser probada en condiciones cercanas a la realidad y en tiempo real. Esto suele realizarse mediante algún tipo de simulación. El modo más simple es reemplazar las entradas del sensor por

datos reales recogidos en experimentos anteriores. Sin embargo, no todas las situaciones que pueden producirse pueden chequearse de este modo. Como es imposible sacrificar todo el proceso para provocar deliberadamente la situación (fallo del sensor, limitación de nutrientes, contaminación), esto debe ser conseguido mediante simulación por ordenador. Para este propósito, los sistemas de desarrollo más avanzados están equipados con simuladores especiales. Esta herramienta es considerada uno de los más potentes mecanismos para la depuración del conocimiento.

Otra importante característica es la posible edición del conocimiento durante la operación en línea. Como el problema de la validación del conocimiento no puede ser resuelto totalmente fuera de línea, pueden aparecer errores en la ejecución real. Estos tienen que ser resueltos sin parar el sistema, mediante la edición del conocimiento en línea. Además, durante el proceso, nuevos fenómenos pueden ser observados. En vez de esperar al fin del proceso, puede ser mejor enriquecer la base de conocimiento añadiendo inmediatamente una nueva regla.

Respuesta a las preguntas del usuario

La complejidad de los bioprocesos hace difícil el entendimiento de los fenómenos que le acompañan a operadores sin experiencia. En consecuencia, las actividades del SE serán obscuras para el principiante, a no ser que la lógica de sus operaciones sea representada de una forma transparente. Esto se consigue mediante una utilidad explicativa del SE, que le permite al usuario realizar preguntas durante la operación; el sistema experto responderá basándose en el conocimiento disponible en el contexto actual. Una buena explicación en línea contribuirá al entendimiento del proceso y de los conceptos de control subyacentes. También incrementará la confianza del usuario en el SE, y puede servir como una herramienta para comprobar el conocimiento.

Actualmente, los SE tratan de explicar sus decisiones y acciones, es decir su conocimiento, mediante ese conocimiento. Generalmente, para la explicación inteligente, es necesario un conocimiento más profundo que el requerido en la resolución del problema. Sin embargo, el enriquecimiento de la base de conocimiento con información suplementaria sólo para el propósito de la explicación, siempre disminuirá la velocidad del proceso de inferencia. En algunos SE el desarrollador puede adjuntar textos explicativos a las reglas, que aparecerán en la pantalla como respuestas a preguntas del usuario en circunstancias particulares. Este mecanismo es primitivo, pero puede ser útil en muchas circunstancias.

Interfaz de usuario avanzada con capacidades gráficas

Esta característica está bien desarrollada actualmente. Las principales dificultades resultan de la necesidad de combinar la simplicidad de la interfaz hombre-máquina con el rendimiento avanzado de un SE. En el control de bioprocesos es muy importante mantener la simplicidad porque los usuarios potenciales no suelen tener niveles informáticos especializados. Afortunadamente, las técnicas de software modernas, con representación gráfica, diálogos por menús, definición de iconos, entrada de datos simplificada utilizando ratón, separación de la interfaz de desarrollo de la del usuario final, y otros, proporcionan un buen balance entre simplicidad y sofisticación.

Un papel principal en la interfaz de usuario es jugado por las capacidades gráficas de la HDSE. En bioprocesos, la mayor parte de la información está representada por variables continuas, por lo que las capacidades gráficas son de la mayor importancia. Aparte de la representación de variables de proceso, los sistemas modernos usan gráficos para la representación y el desarrollo de esquemas, tablas y diagramas. Esto ayuda a proporcionar una visualización más realista de la situación de control de la planta, o representar el conjunto de reglas como una red fácil de comprender.

Otras características

Existen otra serie de propiedades que pueden ser útiles en determinados sistemas. Las HDSE orientadas a objeto permiten construir SE más genéricos, lo que se consigue con una jerarquía de clases y objetos [Gensym, 1995]. Esta técnica permite reducir el número de reglas, lo que simplifica el mantenimiento de la base de conocimiento. El lenguaje de programación utilizado también puede ser mejorado, mediante la utilización de técnicas de lenguaje natural, que transforman la enunciación de reglas en una tarea no de programación, sino simplemente explicativa. Otra propiedad interesante puede ser la utilización de redes neuronales para la identificación de sistemas, como ayuda para la estimación de parámetros de los que no se dispone de medida y para aumentar la frecuencia de las medidas con la utilización de variables auxiliares [Häck, 1996].

Otra faceta de interés creciente es el aprendizaje automático, con sistemas como el razonamiento basado en casos [Serra, 1994; Sánchez, 1996a, 1996b, 1997a, 1997b] o las redes de transición [Gimeno, 1999]. Estos sistemas permiten la organización de los resultados experimentales y la construcción automática de reglas, lo que los convierte en herramientas útiles para actualizar y

mejorar los SE. Otra característica necesaria para la construcción de una interfaz de usuario amigable y clarificadora es la presencia de capacidades multimedia en la HDSE. La presencia de esquemas explicativos, fotografías y animaciones de los equipos permite una mejor transferencia de información entre el SE y el operador.

1.4.4.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS PARA BIOPROCESOS

Además de las propiedades generales discutidas anteriormente, hay algunas características específicamente relacionadas con el control de bioprocesos. Ellas reflejan las características únicas de los procesos biológicos, que difieren de los de control de plantas convencionales, y que pueden influir en la selección del sistema de desarrollo de SE.

Campo limitado y profundidad aumentada

En el campo de los bioprocesos, el conjunto de variables medidas en línea es bastante limitado. Para minimizar el riesgo de contaminación, el número de sensores en sistemas a gran escala es incluso inferior al de bioreactores de laboratorio. Esto implica que las capacidades de monitorizar decenas de miles de entradas y mantener enormes bases de datos, que proporcionan algunos sistemas de desarrollo, no son necesarias. Tampoco se espera que el conjunto de reglas sea muy grande. Su número variará probablemente entre algunas docenas y unos pocos cientos. Es decir, es poco probable que el SE para el control de bioprocesos crezca demasiado en amplitud.

El tamaño reducido de la base de conocimiento no implica, sin embargo, simplicidad. Para interpretar intrincadas e indefinidas situaciones, la forma de las reglas y la estructura de la base de conocimiento serán complejas. En consecuencia, un sistema de desarrollo compacto y flexible que provea un rico conjunto de capacidades funcionales (en referencia a la profundidad del SE) se acomodará mejor al problema de interés.

Manejo de información incierta, incompleta y fuzzy

El problema de la cantidad y calidad de la información disponible en línea en sistemas biotecnológicos es probablemente más serio que en el control de cualquier otra planta. Muchos de los fenómenos fisiológicos son pobremente comprendidos, grandes regiones de estados fisiológicos permanecen desconocidos, mientras que la información sobre otros estados no está bien delimitada y no es cuantitativa, sino difusa, con un carácter cualitativo. Además, debido a la falta de

sensores para variables bioquímicas, es imposible suministrar al sistema de control toda la información necesaria en línea.

Esto impone serios requisitos para la HDSE usada en el control de bioprocesos: debe ser capaz de manejar y utilizar esa información incierta, incompleta y difusa para realizar decisiones en condiciones de soluciones simultáneas, y actuar adecuadamente en situaciones desconocidas. En realidad, el problema está relacionado con uno de los principales trabajos del sistema de control superior, que debe resolver incertidumbres del proceso, creando un entorno determinístico simple para el funcionamiento del nivel inferior de control. Tales capacidades son generalmente implementadas por mecanismos para el manejo de conjuntos difusos, conocimiento cualitativo, factores de certeza y niveles de confianza, que son proporcionados por algunos de los sistemas de desarrollo actuales.

Orientación hacia el procesado de variables continuas

Cerca del 100% de la información disponible en línea se encuentra en la forma de variables de proceso continuas con un comportamiento dinámico complejo. Debido a la falta de sensores, el sistema de control debe extraer la máxima información posible de las variables disponibles y de sus históricos. De este modo, capacidades de procesamiento de señal avanzado, tanto determinísticas como estocásticas, son altamente deseables.

Capacidades de monitorización inteligente

Debido a las complicadas dinámicas de bioprocesos y a la creciente complejidad de los recientes equipos de medida, la supervisión inteligente se necesita no solo para el control de procesos, sino también para el control de las tareas de medida. De acuerdo con cada situación, pueden ser requeridas modificaciones de los procedimientos de medida. Por ejemplo un cambio de la frecuencia de muestreo de acuerdo con la dinámica de la planta, activación / desactivación de la medida o estimación de variables válidas sólo en intervalos de tiempo particulares, calibración periódica de los sensores en línea, cambios de rango, supervisión del trabajo de equipos avanzados de análisis (espectrómetros de masas, analizadores de flujo, sistemas automáticos de toma de muestras, etc.), o control de algunas mediciones específicas que requieren pruebas previas.

El SE debe ser suficientemente flexible para acomodar el conocimiento para la supervisión de los procedimientos de medida. El enriquecimiento de la base de conocimiento con tales reglas proporcionarán a la medida algo de inteligencia, y

contribuirán a la sincronización y coordinación de las actividades del SE.

Disponibilidad de bases de conocimiento de bioprocesos comunes

Las HDSE disponen de bases de conocimiento vacías que deben ser rellenas por el ingeniero del conocimiento, o por el propio usuario. Las bases de conocimiento de sistemas de desarrollo especializados deberían tener inicialmente una cierta cantidad de información fundamental, válida en la mayor parte de las aplicaciones del campo. Algunas partes básicas del conocimiento de sistemas biológicos como metabolismo, comportamiento de poblaciones, u otros aspectos de la bioingeniería, pueden ser fijados permanentemente en el sistema de desarrollo. En muchos casos esto acortaría el tiempo de desarrollo del sistema de control, y haría el conocimiento de la planta más extenso.

Tiempo corto de construcción de prototipos

La biotecnología actual es un campo de rápida evolución tecnológica, en el que el desarrollo de un nuevo proceso o la mejora de uno anterior no suele tardar mucho. Sería poco práctico si el esfuerzo de desarrollo requerido para la construcción del sistema de control consumiera mucho tiempo. Así, el tiempo de desarrollo para el SE es otro criterio que debe ser cuidadosamente considerado. Lo ideal sería un sistema de desarrollo conciso y flexible, con una aplicación que requiera un mínimo estudio y esfuerzo de programación. Esto es especialmente importante para los equipos biotecnológicos, que no incluyen normalmente un especialista en software.

Desde el punto de vista de programa, hay varios modos de crear un SE. Puede ser construido completamente por uno mismo, utilizando un lenguaje de programación adecuado, o se puede desarrollar utilizando una HDSE. Dependiendo de la complejidad de la tarea, el tiempo de desarrollo utilizando una HDSE puede variar entre unos meses y alrededor de un año, lo que es generalmente aceptado para aplicaciones biotecnológicas. Sin embargo, el tiempo requerido para construir un sistema utilizando un lenguaje convencional es estimado en varias veces más que usando una HDSE. La conclusión es evidente, tiempos de construcción de prototipos cortos sólo pueden conseguirse utilizando HDSE. De hecho, esta es una práctica muy común en todas las aplicaciones de SE.

Bajo precio

La mayor parte de los laboratorios biotecnológicos están equipados con un número de bioreactores, generalmente operados en paralelo para el desarrollo de diferentes procesos. Dependiendo de las

circunstancias, varios de estos bioreactores pueden necesitar monitorización y control por un sistema avanzado por ordenador. En la práctica es posible utilizar un solo SE para el control de más de un proceso, pero como las condiciones y los objetivos de control de cada proceso pueden variar mucho, esta integración sería artificial, resultando en una serie de problemas. En tal caso, la mejor solución sería proporcionar a cada bioreactor su sistema de control independiente. Esto sólo será posible si los correspondientes hardware y software no son muy caros. Estos sistemas de control independientes

pueden estar a su vez supervisados por un nivel superior que coordine todos los subsistemas, dentro de un esquema de control distribuido.

Afortunadamente, las características de los procesos permiten la utilización de hardware estándar como PC. En cambio, los precios para las HDSE en tiempo real son prohibitivamente altos. Sin duda, el precio del software es una gran restricción para que los SE se conviertan en una práctica biotecnológica habitual.

1.5 PROBLEMÁTICA DEL CONTROL EN PLANTAS DEPURADORAS

En el control de las plantas depuradoras, existe una problemática especial que motiva gran parte de los trabajos de investigación realizados para la mejora de su operación. La falta de información de algunas variables del proceso, obliga a buscar métodos para incrementar el conocimiento del proceso. Entre los problemas que actualmente son necesarios resolver satisfactoriamente, destacan los comentados detalladamente a continuación: la toma de muestras, los sistemas de análisis automáticos, las técnicas respirométricas y las diferentes estrategias de control para la mejora del proceso de eliminación de nitrógeno mediante nitrificación/desnitrificación.

1.5.1 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE TOMA DE MUESTRAS

La monitorización y control de EDAR requiere una frecuente toma de muestras para un posterior análisis. Generalmente, la toma de muestras se realiza manualmente por el personal de laboratorio. Este procedimiento limita la frecuencia de toma de muestras y no permite la monitorización del proceso en tiempo real. Con esta información con retraso, el control del proceso no puede efectuarse correctamente. En consecuencia es cada vez más importante en los sistemas de control de EDAR la necesidad de un sistema automático de toma de muestras que permita obtener una muestra libre de biomasa para el posterior análisis automático.

Características importantes a considerar en estos sistemas son:

- El sistema de filtrado debe ser capaz de eliminar la biomasa del sistema sin variar la concentración de las especies a analizar. La velocidad de transferencia de las diferentes formas solubles de N y P en ese sistema debe ser muy alta, para evitar cambios de concentración en la muestra de las especies a analizar.
- La duración del periodo sin mantenimiento de un sistema de filtrado dependerá en todos los casos del punto de toma de muestras. El peor caso es el del influente, donde pueden llegar a ser necesarias limpiezas diarias. La limpieza de determinados filtros cuando se toma muestra en los reactores puede ser necesaria semanalmente. El mejor caso es la salida de la planta, donde

ciclos de limpieza de 2 a 6 semanas pueden ser suficientes [Schlegel, 1996].

- En muestras con alto contenido en biomasa puede ser necesario un sistema de prefiltrado para eliminar una parte de la biomasa.
- En los sistemas de ultrafiltración, el alto caudal y las diferentes direcciones del flujo de entrada (radial) y permeado (axial) evita la colmatación del filtro, resultando en un sistema de autolimpieza que aumenta la duración del filtro sin mantenimiento.
- Dependiendo del sistema es posible utilizar el mismo analizador para monitorizar diferentes puntos de la EDAR mediante la utilización de un sistema de válvulas. Esto puede realizarse utilizando un mismo filtro [Gabriel, 1998] o diferentes filtros para cada punto [Isaacs, 1996], lo que proporciona diferentes tiempos de respuesta.

Los sistemas de filtración utilizados están basados principalmente en la extracción de muestra con una bomba y el posterior filtrado con sistemas basados en membranas. En [Guang, 1996] se muestran los resultados obtenidos con membranas de diferente composición, utilizadas en un sistema de filtrado a contracorriente. [Gabriel, 1998] muestra la utilización de un equipo de ultrafiltración comercial Millipore® en la monitorización en línea de una EDAR piloto.

En [Lynggaard-Jensen, 1996] se ofrece una alternativa a los sistemas de toma de muestras basados en la extracción de muestra con una bomba. Sus analizadores han sido diseñados para introducirse directamente en el proceso. Están basados en técnicas de microCFA y membranas semipermeables. Estos analizadores tienen bajos tiempos de respuesta (5 minutos), ya que se consigue eliminar parte del retraso provocado por el traslado de la muestra con el sistema de bombeo.

Otra alternativa es la utilización de analizadores que no requieren pretratamiento de la muestra. En este caso se ahorra dinero en el sistema de filtrado, pero a cambio de un mayor mantenimiento en la limpieza de equipos, debido a la necesidad de limpiar manualmente los sensores. Estos requerimientos también pueden minimizarse instalando sistemas automáticos de limpieza [Thomsen, 1996].

1.5.2 ANALIZADORES

El primer paso para el control de una variable de un proceso es la adquisición de información sobre esa variable. En el control clásico en la industria, estas

variables suelen ser temperatura, presión o caudal. En la industria química también aparecen sensores de parámetros químicos como el pH o la concentración de especies químicas de interés. Para este último caso, es necesaria la utilización de analizadores químicos. Estos sensores, que proporcionan la información que necesitamos sobre el proceso, suelen ser instrumentos de elevado mantenimiento y escasa fiabilidad, en comparación con los sensores clásicos utilizados en la industria. En este ambiente de incertidumbre sobre las medidas, se hace más necesario la utilización de sistemas que permitan el tratamiento de esta información incierta sin desestabilizar el proceso.

El primer paso para el control automático de la eliminación de nitrógeno en una planta depuradora, es la obtención de unas medidas correctas de las diferentes formas de nitrógeno presentes en el medio: amonio, nitrato y nitrito. En la literatura se presentan diferentes ejemplos de utilización de analizadores para la mejora de este proceso, que a continuación se detallan:

- [Sorensen, 1996] presenta analizadores on-line de nitrato, amonio y fósforo para el control de un sistema Biodenitro de eliminación de nutrientes a escala real, incluyendo el mantenimiento de los analizadores, a corto y largo plazo. La introducción del control en línea significó una mejora de la planta, en resultados y flexibilidad de operación para adecuarse a las exigencias del momento.
- [Bundgaard, 1996] muestra el diseño de un nuevo modo de operación, ATS, "Aeration Sludge Settling", que se ha podido implementar gracias a los analizadores en línea instalados. En este artículo se discute este tipo de operación que con métodos convencionales no se hubiera podido implementar.
- [Lynggaard-Jensen, 1996] describe nuevos sensores de amonio, nitrato y fosfato, que han sido diseñados para introducirse directamente en el proceso, tener bajo mantenimiento y poco consumo de reactivos. Están basados en técnicas de microCFA y membranas semipermeables, y tienen sistemas de autocalibrado. Estos analizadores dan bajos tiempos de respuesta (5 minutos). Han sido probados en planta piloto con agua real y artificial.
- [Schlegel, 1996] hace un estudio de los requerimientos que se deberían tener en cuenta en la elección de un determinado analizador. La asociación alemana ATV prepara estas reglas, de las que este artículo es una primera visión. Se considera el pretratamiento de la muestra, los métodos de medida de los diferentes parámetros,

los requerimientos generales, el entrenamiento necesario para su uso y las necesidades de supervisión y mantenimiento.

- [Thomsen, 1996] estudia diferentes elementos a considerar en el diseño e implementación de analizadores de N y P. Se estudia el caso de Dinamarca, tratando estos parámetros: pretratamiento de la muestra, principio de la medida, diseño (calibrado, limpieza, tiempo de respuesta, tiempo necesario para la calibración, reactivos, caudal de muestra, dimensiones, calidad de componentes (deben funcionar 24 horas), facilidad de uso), precisión, precio y mantenimiento, y por último el punto de medida.
- [Londong, 1996] realiza una comparación de diferentes analizadores comerciales de NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , DQO y DBO, mostrando la gran variabilidad de respuesta ofrecida por los diferentes analizadores para un mismo parámetro.
- [Isaacs, 1996] utiliza analizadores "on-line" de N y P para monitorizar una planta piloto y varios ensayos en discontinuo simultáneos, estudiando la eliminación de fósforo, y la respuesta del sistema a diferentes adiciones de DQO.
- [Wacheux, 1996] compara el funcionamiento de 9 analizadores de amonio, en laboratorio e instalados en una planta real.
- [Leeuw, 1996] monitoriza una planta real, proponiendo diversas modificaciones de la planta depuradora para mejorar la eliminación de N y P, basándose en la respuesta de los analizadores y la simulación del proceso.
- [Gabriel, 1998] presenta la monitorización de una planta piloto con eliminación de nitrógeno mediante un analizador de nitrato y nitrito y un sistema automático de toma de muestras.

1.5.3 TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN RESPIROMÉTRICAS

Las técnicas respirométricas están basadas en la medida del oxígeno disuelto y su evolución en un sistema determinado. Esta medida puede proporcionar diferentes informaciones del proceso, dependiendo de las condiciones experimentales. Las medidas respirométricas han sido tradicionalmente utilizadas para el análisis de parámetros del proceso como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

En el análisis de la DBO se mide el oxígeno necesario para oxidar biológicamente la materia orgánica presente en la muestra a analizar. Para ello se introduce una sonda de oxígeno en un recipiente hermético, junto a la muestra a analizar y un inóculo de microorganismos. La diferencia entre el oxígeno inicial y el oxígeno pasado un intervalo determinado de tiempo, permite obtener este parámetro. Si la medida se realiza pasados cinco días, se obtiene la DBO₅. Si ésta se produce después de 20 días, se obtiene la DBO₂₀. Para un mismo tipo de agua residual, estos parámetros suelen estar relacionados entre sí, así como con la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Esto permite estimar uno de los parámetros a partir de otro de ellos.

La DBO permite estimar la parte biodegradable del agua residual, por lo que es un parámetro de seguimiento muy importante en una planta depuradora. Por ejemplo, la legislación marca unos límites de vertido de materia orgánica utilizando este análisis (ver apartado 1.1). Pero este parámetro ofrece una visión integrada de todo el proceso de consumo de la materia presente en el medio. No presenta la variación de la velocidad de consumo de oxígeno a medida que la materia oxidable de la muestra se agota.

Las técnicas respirométricas amplían este análisis para ofrecer estimaciones del consumo instantáneo de oxígeno en un sistema determinado. Esta estimación se basa en la pendiente de las curvas de oxígeno disuelto en función del tiempo, mediante las que se calcula la velocidad de consumo de oxígeno (OUR, Oxygen Uptake Rate).

Estas técnicas han sido utilizadas para diferentes propósitos, incluidos algunos recientes para la monitorización de los procesos de nitrificación. Los ejemplos de aplicación pueden clasificarse en varias categorías:

- Estudios sobre inhibición y toxicidad de procesos. [de Bel, 1996] realiza ensayos de toxicidad sobre la nitrificación, utilizando respirometrías. Realiza dos ensayos en paralelo, uno con inhibidor y otro sin. La diferente respuesta permite calcular el grado de inhibición del proceso. [Kong, 1996] realiza ensayos para la determinación simultánea de la inhibición de la oxidación de materia orgánica y la nitrificación utilizando un biosensor basado en técnicas respirométricas.
- Monitorización del consumo de oxígeno en la nitrificación. [Surmacz-Gorska, 1996] monitoriza la OUR de los procesos de oxidación de amonio, nitrito y DQO durante la nitrificación. Efectúa respirometrías fuera de línea utilizando dos inhibidores. Primero mide el

consumo sin inhibición, lo que da el consumo total. Después introduce NaClO₃, que inhibe la oxidación de nitrito, y con la diferencia entre este consumo y el anterior puede estimarse el consumo de O₂ en la oxidación de nitrito. Después introduce el compuesto ATU, que inhibe la oxidación de amonio. Con la diferencia se puede calcular el O₂ consumido en la oxidación de amonio a nitrito. Este último valor de OUR es el consumo de O₂ por la materia orgánica más el consumo para mantenimiento celular. Con este sistema se realizan una serie de experimentos en SBR, con cargas normales, bajas y sobrecarga. Con las medidas de OUR es posible realizar un seguimiento de las diferentes capacidades de oxidación. Con este sistema se puede regular el final de la fase aeróbica, cuando se ha oxidado todo el amonio y no hay variación en la velocidad de consumo de materia orgánica más respiración endógena, que significa que la DQO que queda no es biodegradable. En caso de baja carga, este sistema puede ser útil para finalizar más rápidamente el ciclo aeróbico. En el caso de influente sobrecargado de DQO, la duración de un ciclo estándar no es suficiente, lo que produce presencia de nitrito y amonio en el efluente. Esto puede ser evitado alargando la duración del ciclo. Klapwijk [1998] propone la utilización de un respirómetro conectado en línea para estimar el punto final de nitrificación y desnitrificación. Johansen [1997] Realiza la adquisición de medidas de OUR en el propio reactor SBR, aprovechando el sistema de aireación "on-off". Se pueden observar tres consumos diferentes durante el periodo de aireación: el primero corresponde a oxidación de materia orgánica y amonio, el segundo a oxidación de amonio y el tercero a consumo por respiración endógena.

- Estimación de parámetros de modelos. [Vanrolleghem, 1995] realiza la estimación de los parámetros del modelo cinético de la nitrificación utilizando experimentos realizados con mezclas de diferente composición.

El comportamiento y precisión del un respirómetro están muy influenciados por el comportamiento de la sonda de oxígeno. Estudios sobre los problemas asociados a ellos pueden encontrarse en la literatura. Giroux [1996] modeliza un respirómetro utilizando el modelo IAWQ n° 1. Se realizan experimentos y se ajusta el modelo. Con este modelo, se estudia la influencia del número de medidas de oxígeno utilizadas, además de la frecuencia de esas medidas, en la precisión y exactitud de los resultados de OUR obtenidos. Lindberg [1996] presenta un sensor basado en software para el cálculo de la respiración y la velocidad de

transferencia de oxígeno. La estimación se realiza mediante un filtro de Kalman utilizando las medidas de DO y caudal de aire. La señal del sensor de oxígeno está filtrada para reducir la influencia de la dinámica del sensor.

1.5.4 ESTRATEGIAS DE CONTROL EN PROCESOS DE NITRIFICACIÓN / DESNITRIFICACIÓN

Se han propuesto diferentes técnicas para la mejora del control de los procesos de nitrificación y desnitrificación. La mejora de los sistemas de análisis automático ha permitido el desarrollo de estrategias de control más refinadas. El uso de estos analizadores también ha permitido el desarrollo de la modelización de los procesos de nitrificación / desnitrificación. Estos modelos pueden ser actualmente desarrollados, ajustados al sistema particular y utilizados en el control del proceso.

[Aspegren, 1992] presenta la monitorización de una planta real con diferentes sensores: TOC, amonio, nitrato, DO, ORP, SS, caudales, aireación. Con estos datos ajusta el modelo IAWQ-1 y lo utiliza para optimizar el sistema de dosificación de metanol para la desnitrificación mediante simulación. Esta optimización fuera de línea es el primer paso en la aplicación de modelos en el control automático de plantas depuradoras.

Otros tipos de control, como el adaptativo [Lindberg, 1996] han sido utilizados para el control de la adición de una fuente de carbono externa para los procesos de desnitrificación cuando no se dispone de suficiente materia orgánica biodegradable.

En algunos casos se ha propuesto la utilización de medidas auxiliares, como el potencial de óxido reducción (ORP) para el control de estos procesos. Debido a la naturaleza de la medida, sólo ha sido aplicada a procesos cíclicos tipo SBR. El ORP da una idea del estado oxidativo del sistema, pero no es posible deducir la concentración de las diferentes especies que componen el sistema. Con la evolución del ORP en el tiempo sí que se puede observar la desaparición de algunas de las especies que tienen mayor influencia sobre la medida, como el oxígeno o el nitrato. La desaparición total de una de estas especies produce un cambio brusco (punto de ruptura) en la medida que puede ser detectado. Este cambio ha sido utilizado como señal para indicar la finalización de un ciclo en un reactor de tipo secuenciado.

[Wareham, 1993] compara la operación en dos reactores SBR, uno con secuencia de operación fija y otro que controla el fin de la fase anóxica detectando el punto de ruptura en la curva de ORP, coincidente con la desaparición del nitrato. Sin embargo, los resultados de eliminación sólo son ligeramente mejores en el caso del reactor controlado.

[Vanrolleghem, 1995] muestra una descripción de un modelo de ORP en función de las concentraciones de DBO, oxígeno, nitrato y sulfato. Simula el ORP en un experimento batch, probando diferentes métodos para la estimación del punto de ruptura en la curva de ORP, señal de la desaparición total de nitrato.

[Plisson-Saune, 1996] también muestra el control de un reactor SBR piloto. Regulan la duración de los ciclos mediante el ORP. Detecta 3 puntos de ruptura de la curva de ORP, correspondientes al aumento del oxígeno en consecuencia al consumo total de NH_4 , la desaparición de oxígeno después de cerrar la aireación, y por último, la desaparición de nitrato. Plisson-Saune detecta el punto de ruptura utilizando la 2ª derivada del ORP.

Esta es sólo una pequeña muestra del interés que se ha demostrado en esta variable para el control de la nitrificación y desnitrificación. El citado interés se debe a que es una variable fácil de medir con un electrodo directamente en el proceso, al contrario de los requerimientos exigidos por los analizadores automáticos de nitrógeno en sus diferentes formas. También se han propuesto estrategias de control de sistemas secuenciales basadas en respirometrías.

[Klapwijk, 1998] propone el control de plantas depuradoras con eliminación de nitrógeno mediante aireación intermitente utilizando un respirómetro conectado al proceso. Con este sistema se puede detectar el punto final de los procesos de nitrificación y de desnitrificación, lo que se podría utilizar para detectar la finalización de una fase en un sistema secuencial.

Las estrategias para la minimización de nitrógeno en plantas continuas suelen estar basadas en las medidas proporcionadas por analizadores automáticos.

[Balslev, 1996] Estudia de diferentes estrategias para la eliminación de nitrógeno en un planta piloto con nitrificación y desnitrificación con dos reactores (anóxico y óxico), basándose en las medidas de analizadores automáticos. Las estrategias implementadas pretenden conseguir: minimizar las concentraciones de nitrato, amonio y fosfato en la salida; minimizar la energía por aireación en la nitrificación; minimizar la energía por recirculación en la desnitrificación y, por último, eliminar fósforo

en el reactor desnitrificante. Las diferentes estrategias probadas incluyen el control encendido/apagado del oxígeno disuelto, el cambio del setpoint de oxígeno en función de la concentración de amonio, el control encendido/apagado del oxígeno en función de las concentraciones de nitrato y amonio, así como diferentes estrategias para variar la recirculación en función de la concentración de nitrato en el reactor óxico.

[Hoen, 1996]. Utiliza un modelo muy simplificado de N/D (del que se pueden estimar los parámetros), unido a unas reglas 'expertas' para mejorar los resultados de una planta depuradora con nitrificación y desnitrificación. Mediante simulación muestra los resultados que se pueden obtener con diferentes estrategias de control: cambio de volumen de nitrificación y desnitrificación, utilización de un tanque de homogeneización inicial y adición de acetato cuando el sistema no dispone de suficiente capacidad desnitrificadora.

[Önnerth, 1996] muestra los estudios sobre una planta depuradora real con nitrificación y desnitrificación, basado en un esquema con recirculación interna. Se efectúa un control basándose en los datos de nitrato y amonio, en un punto situado al final del tanque de aireación. Se utilizan estas medidas para diferentes estrategias de control simultáneas: aireación intermitente del reactor aeróbico, cambio del setpoint de oxígeno en función de la concentración de amonio y variación del caudal de recirculación.

2 OBJETIVOS

2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo se centran en la elaboración y validación de un sistema supervisor para la gestión integrada de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, teniendo en cuenta criterios de eliminación de nutrientes.

Más concretamente se pretende definir un sistema supervisor que permita ser implementado en una EDAR y en tiempo real, y donde sea fácil desarrollar y modificar estrategias de operación y control. El sistema debería permitir la gestión integrada, desde el mantenimiento de la maquinaria a la diagnosis y control de los problemas de operación, incluyendo en él características de robustez y estabilidad

Una característica a mantener durante el trabajo debería ser la validación experimental de todos los elementos desarrollados con el objetivo de incrementar la confianza de los potenciales usuarios en este tipo de soluciones. Para alcanzar este objetivo se trabajara con una planta piloto con instrumentación industrial donde se validaran los elementos desarrollados. Finalmente, se validara el sistema sobre una planta depuradora de aguas residuales real.

En función de los objetivos se considera que durante el presente trabajo es necesario desarrollar los siguientes aspectos:

- **Diseño y construcción de una planta piloto.** Se diseñarán y construirán todos los elementos de una planta depuradora a escala piloto que permita trabajar con diferentes configuraciones.
- **Monitorización del proceso.** Se instalaran y construirán todos los elementos necesarios para la adquisición de la información del proceso. Desde las variables físicas (pH, oxígeno, etc.)

pasando por las variables simbólicas hasta los elementos necesarios para su adquisición automática (elementos y programas).

- **Control de los parámetros clave.** El sistema gestionará la actuación sobre el oxígeno disuelto, el caudal y concentración de la entrada, la recirculación interna, la recirculación de fangos, nivel de cada uno de los tanques, etc.
- **Comunicaciones.** Se elaborarán los programas necesarios que permitan la monitorización y actuación sobre los lazos de control de la planta piloto por parte de un sistema experto escrito en el entorno G2 situado en la estación de trabajo.
- **Sistema supervisor.** Se desarrollara un sistema modular que permita estructurar el conocimiento, así como, su utilización en la gestión de plantas depuradoras.
- **Validación experimental planta piloto** Finalmente, se validara el funcionamiento de todos los elementos desarrollados. Validando cada uno de ellos por separado y posteriormente trabajando en cooperación.
- **Validación planta real** En la ultima fase se intentará aplicar todos los conocimientos adquiridos durante el presente trabajo en la gestión de una planta depuradora real. En esta fase se tiene como objetivo la comprobación de la validez de los desarrollos del mundo académico en el mundo industrial.

En resumen, el objetivo del presente trabajo es el *Desarrollo e Implementación de un Sistema Supervisor para la Gestión y Control de EDAR.*

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 PLANTA PILOTO

Desarrollar estrategias de control y supervisión en plantas reales es complejo, y puede ser peligroso, por

lo que el primer objetivo llevado a cabo en el presente trabajo fue diseñar y construir una planta piloto que permitiera desarrollar, implementar y validar diferentes estrategias de control de EDAR.

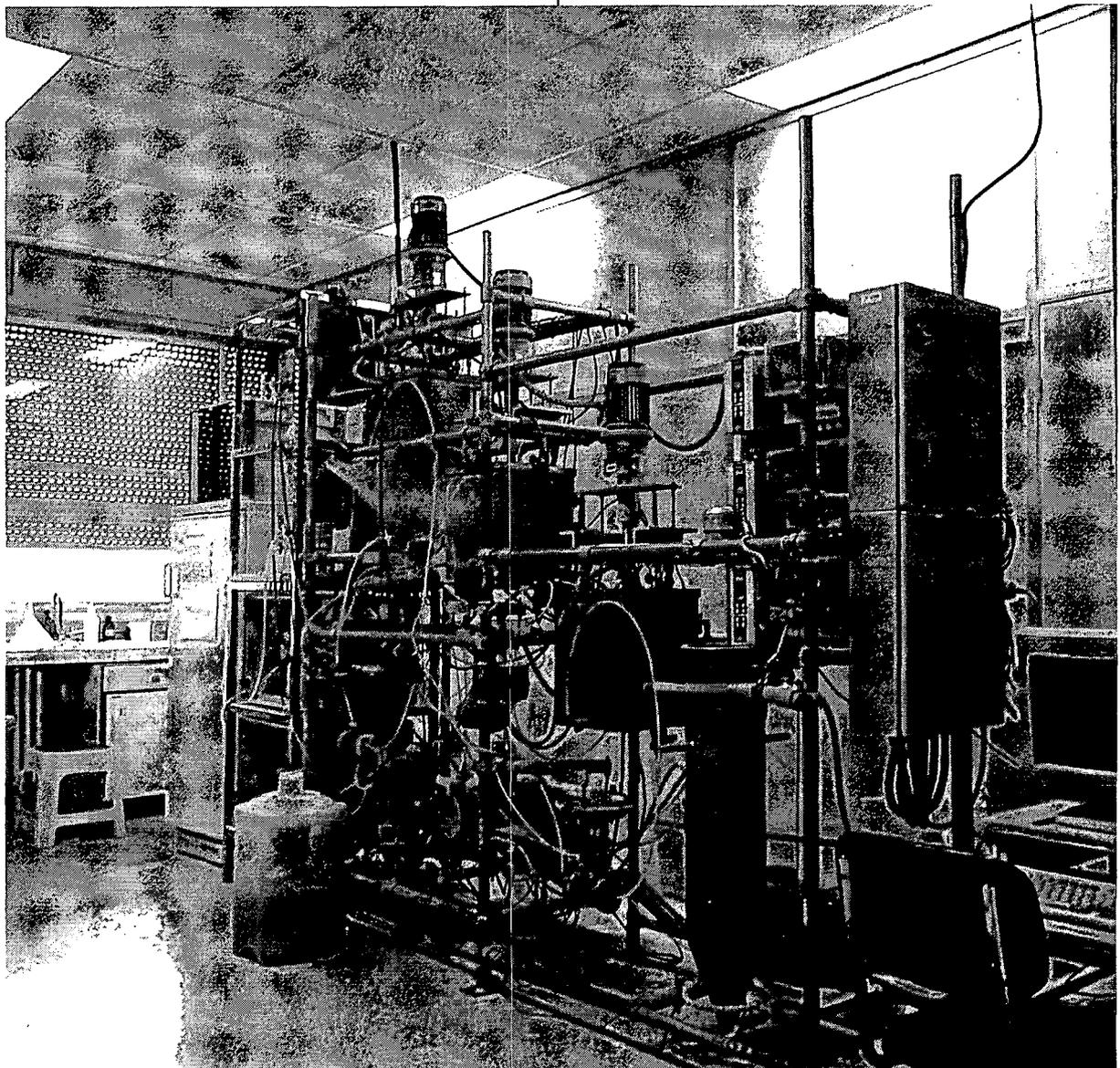


Fig. 3.1. Vista general de la planta piloto

En los experimentos realizados se ha utilizado una planta piloto altamente instrumentada y controlable desde el ordenador, lo que supone una alta complejidad, tal como se puede observar en el diagrama eléctrico y el de ingeniería realizados.

En la figura 3.2 se reproduce a escala el plano de ingeniería de la planta piloto, con todos los elementos utilizados en su construcción, que son comentados en el apartado 3.2.

En la figura 3.3 se muestra un diagrama de todos los elementos eléctricos de la planta piloto, con sus conexiones correspondientes a las salidas y entradas del autómatas programable utilizado

La descripción del funcionamiento y modo de utilización de cada uno de los elementos utilizados se realiza en el capítulo 4.

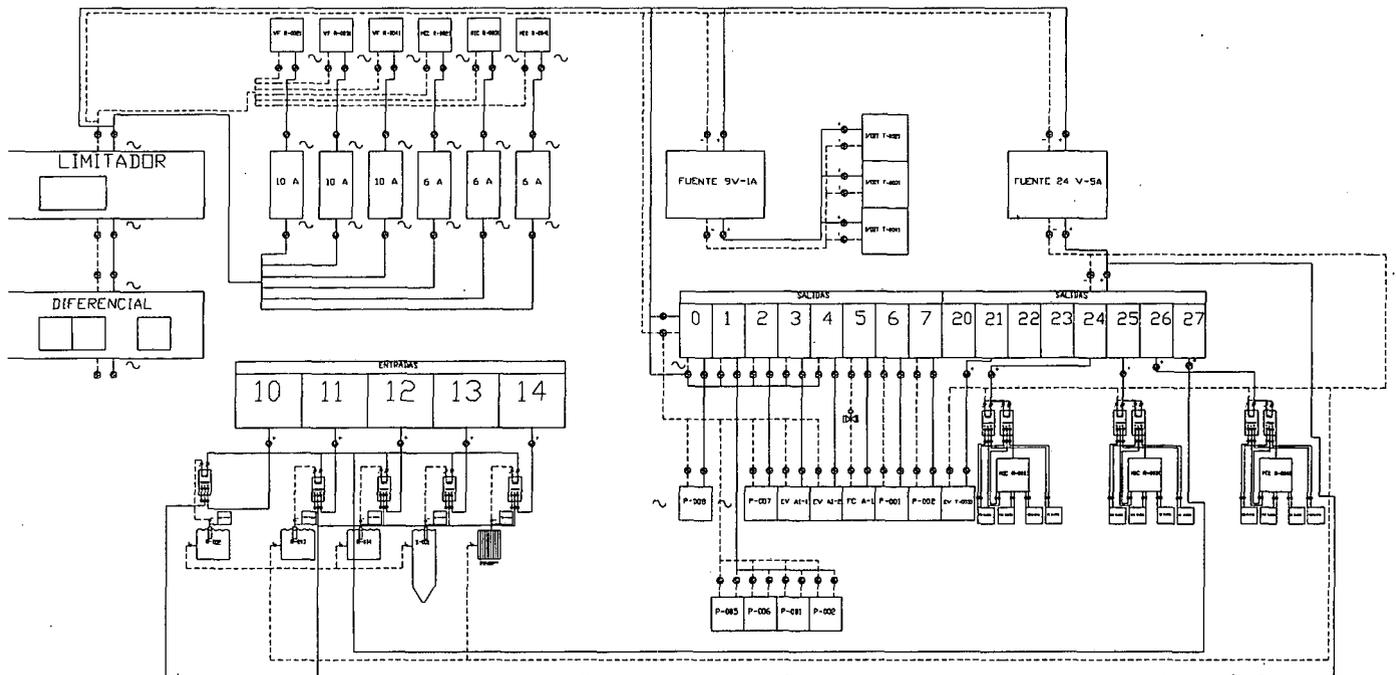


Fig. 3.3. Diagrama eléctrico de la planta piloto

3.2 INSTRUMENTACIÓN

En la construcción de la planta piloto de depuración de aguas se ha utilizado un gran número de elementos. En las tablas siguientes aparece la descripción de los elementos utilizados en la construcción, el número de unidades de cada elemento, la función a la que se han destinado y sus características técnicas.

Debe tenerse en cuenta que en la planta piloto hay cuatro reactores, tres de los cuales disponen de los mismos sensores y actuadores. Aparte de ellos existe el sedimentador, el sistema de alimentación y todos los elementos necesarios para el trasvase de líquidos entre los equipos.

3.2.1 DEPÓSITOS Y SISTEMA DE AGITACIÓN

Elemento	Depósito - reactor	Unidades	3
Función	Reactor		
Características técnicas	Dimensiones: 300 x 300 x 400 mm de altura Material: acero inoxidable AISI 304, 2 mm de espesor, con refuerzo externo de 35 x 8 mm y puente para agitador de 80 x 8 mm 3 entradas de diámetro 3/8 de pulgada a 300 mm de altura 2 salidas de diámetro 3/8 de pulgada a 200 y 300 mm de altura Serpentin distribuidor de aire interior con tubo de 10 mm y agujeros de 1 mm		

Elemento	Agitador	Unidades	3
Función	Homogeneizar reactores / airear reactores		
Características técnicas	Motor: 0.5 cv (0.37 kW), 1500 rpm, 200/380 V, III, 50 Hz, IP55 Reductor: IBC-84. Velocidad de salida 158 rpm Eje de acero AISI-316L, longitud 605 mm Hélice Sabre 10SG de acero AISI-316L, diámetro 130 mm, altura variable Hélice Rushton de acero AISI-316L, diámetro 130 mm, altura variable		

Elemento	Variador de frecuencia	Unidades	3
Función	Regular la velocidad de los agitadores		
Características técnicas	Variador Danfoss VLT-2010. 220/240 V, 50/60 Hz. 0.37 kW. Potencia de salida regulable 0 -100 % Conexión RS-232 estándar		

Elemento	Depósito - sedimentador	Unidades	1
Función	Sedimentador lodos activos		
Características técnicas	Dimensiones: 350 mm diámetro, 950 mm de altura Material: acero inoxidable AISI 304, 2 mm de espesor Entrada de diámetro 3/8 de pulgada a 400 mm de altura Salida de diámetro 3/8 de pulgada a 900 mm de altura Salida de diámetro 3/8 de pulgada en el fondo del sedimentador		

Elemento	Rascador sedimentador	Unidades	1
Función	Homogeneizar zona compactación sedimentador		
Características técnicas	Motor 1 rpm		

3.2.2 SISTEMAS DE BOMBEO Y TRASVASE DE LÍQUIDOS

Elemento	Bomba peristáltica	Unidades	1 - 4
Función	Bombeo de fangos		
Características técnicas	Modelo: Watson Marlow 302S/RL, 110/240 V, 50/60 Hz. Dimensiones: 185 x 125 x 300 mm Admite tubos de silicona con diámetros internos de 0.5 a 8.0 mm Velocidad variable de 7 a 220 rpm Caudal máximo de 2200 ml/min a 220 rpm y con tubo de 8.0 mm		

Elemento	Bomba Flojet	Unidades	2
Función	Bombeo de fangos		
Características técnicas	Bomba Flojet 5500 series Entrada y salida 3/8 de pulgada Capacidad máxima: 12 l/min Peso neto: 0.54 kg		

Elemento	Bomba dosificadora	Unidades	2
Función	Dosificación alimento		
Características técnicas	Bomba dosificadora de membrana accionada electromagnéticamente Modelo DOSAPRO MILTON ROY A773-152M Alimentación: 220 V Caudal máximo: 1.57 l/h Presión máxima: 9.7 bar Volumen cilindro: 0.26 cm ³ Regulación de carrera: 30 - 100 % Cadencia: 5 - 100 cpm Mando externo por impulsos		

Elemento	Bomba dosificadora	Unidades	1
Función	Recirculación Externa		
Características técnicas	Caudal regulable del 10 al 100 % Caudal máximo de 50 l/h Contrapresión máxima: 10 bar Señal de entrada 4 - 20 mA Cabezal y válvulas de PVC Membrana de Teflon Juntas Viton Alimentación 220 V Motor Siemens 0.09 kW		

Elemento	Bomba dosificadora	Unidades	1
Función	Recirculación Interna		
Características técnicas	Caudal regulable del 10 al 100 % Caudal máximo de 115 l/h Contrapresión máxima: 10 bar Señal de entrada 4 - 20 mA Cabezal y válvulas de PVC Membrana de Teflon Juntas Viton Alimentación 220 V Motor Siemens 0.09 kW		

Elemento	Electroválvula	Unidades	11
Función	Distribución de caudales de recirculación y purga		
Características técnicas	Electroválvulas de tres vías Sirai S307 Mecanismo: pinzamiento tubo de silicona ($\varnothing_{int}=4.8$ mm y $\varnothing_{ext}=7.9$ mm) Un tubo normalmente abierto y un tubo normalmente cerrado Alimentación: 24 V cc, 10 W Dimensiones: 30 x 99 mm		

3.2.3 SISTEMA DE AIREACIÓN

Elemento	Purga automática de la entrada de aire	Unidades	1
Función	Eliminación de agua del aire de red		
Características técnicas	Purga FESTO Pneumatic LFR ¼ SB Caudal nominal: 2290 l/min Capacidad de condensación: 43 cm ³ Accesorio: purga automática de condensado FESTO WA-1		

Elemento	Válvula reguladora de aire	Unidades	3
Función	Regulación del caudal de aire de entrada a los reactores		
Características técnicas	Válvula de control Samson tipo 3241 00 DN=15, Kvs=0.63, PN=16, H=15 Cuerpo de fundición GG-25, con asientos y obturadores de acero inoxidable Empaquetadura de PTFE autoajustable. Accionamiento neumático tipo 271 Superficie de membrana: 240 cm ² Presión de trabajo: 0.2 - 1.0 bar Normalmente cerrada		

Elemento	Transductor I/P	Unidades	3
Función	Convertidor electroneumático para señales de corriente		
Características técnicas	Convertidor I/P Samson 6113-01 Señal de entrada: 4 - 20 mA Alimentación: 1.4 bar (20 psi) Señal de salida: 0.2 - 1.0 bar (3 - 15 psi)		

3.2.4 SISTEMA DE ENTRADA DE AGUA

Elemento	Transductor I/P	Unidades	3
Función	Convertidor electroneumático para señales de corriente		
Características técnicas	Convertidor I/P Samson 6113-01 Señal de entrada: 4 - 20 mA Alimentación: 1.4 bar (20 psi) Señal de salida: 0.2 - 1.0 bar (3 - 15 psi)		

Elemento	Válvula reguladora de agua	Unidades	1
Función	Regulación del caudal de agua de entrada		
Características técnicas	Válvula de control Samson tipo 3241 02 DN=15, Kvs=0.016, PN=16, H=7.5 Cuerpo de fundición GG-25, con asientos y obturadores de acero inoxidable Empaquetadura de PTFE autoajustable. Accionamiento neumático tipo 271 Superficie de membrana: 240 cm ² Presión de trabajo: 0.2 - 1.0 bar Normalmente cerrada Posicionador Samson 3763: Señal de entrada: 4-20 mA Alimentación: 1.4 bar (20 psi) Señal de salida: 0.2 - 1.0 bar (3 - 15 psi)		

3.2.5 ELEMENTOS MEDIDORES

Elemento	Sonda pH	Unidades	3
Función	Medida del pH en los tres reactores		
Características técnicas	Sonda pH Crison 52-21, especial para medios viscosos Compensación de temperatura manual o automática con referencia a la sonda de temperatura Rango de medida: 0 - 12 unidades de pH a temperatura entre 0 y 60 °C		

Elemento	Sonda temperatura	Unidades	3
Función	Medida de la temperatura en los reactores		
Características técnicas	Sonda de temperatura Crison Pt100 (Termoresistencia de platino) Rango de medida: -20 a 130 °C		

Elemento	Sonda redox	Unidades	3
Función	Medida del potencial de óxido-reducción en los tres reactores		
Características técnicas	Sonda redox con electrodo de platino Crison 52-62, especial para medios viscosos Medida para temperaturas entre 0 y 60 °C		

Elemento	Oxímetro	Unidades	3
Función	Medida del oxígeno disuelto en los tres reactores		
Características técnicas	Oxímetro portátil Crison Oxi-92 Sensor de oxígeno disuelto por electrodo amperométrico Clark con compensación de temperatura automática Rango de medida: 0.0 - 50.0 mg/l, ± 0.01 mg/l; 0 - 199 % saturación Medida temperatura mediante termistor: Rango de 0 a 50 °C Alimentación 9 V cc Salida de registrador, 30 mV/(mg/l) aprox.		

Elemento	Controlador de sondas	Unidades	3
Función	Lectura de las sondas y transmisión de datos al PC		
Características técnicas	Controlador de sondas Crison pHrocon 18 Alimentación 220 V 2 tarjetas instaladas: pH/temperatura y Redox Salidas de control todo/nada Salida RS - 485 para intercambio de datos con PCs		

Elemento	Caudalímetro	Unidades	1
Función	Medida caudal de agua de entrada		
Características técnicas	Modelo Turbine Flowmeter DS525 Alimentación de 5 V DC a 30 V DC Material de construcción: poliamida Temperatura de trabajo -20 °C a 70 °C Señal de salida en frecuencia		

3.2.6 ELEMENTOS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

Elemento	PLC Izumi FA-2J	Unidades	1
Función	Control de bombas, electroválvulas y relés		
Características técnicas	Autómata programable IZUMI FA-2J Módulo de memoria EPROM con capacidad de programa 1K pasos Alimentación CPU 220 V Módulos de expansión: PFJ-N084: 8 entradas, 220V PFJ-N082: 8 entradas, 24V PFJ-T081: 8 salidas a relé PFJ-T162A: 16 salidas a transistor Adaptador RS-232 - RS-485 para funcionar en red		

Elemento	PC	Unidades	1
Función	Control, monitorización y supervisión del sistema analítico		
Características técnicas	PC HP Vectra/VL2 486 DX 33 MHz		

Elemento	PC	Unidades	1
Función	Control, monitorización y supervisión de la planta piloto		
Características técnicas	PC Pentium 120 MHz		

Elemento	Tarjeta ethernet NE-2000	Unidades	2
Función	Comunicación con red Ethernet		
Características técnicas	Tarjeta compatible NE-2000 Dirección de entrada-salida e interrupción configurables		

Elemento	Placa PCL-726	Unidades	1
Función	Regulación válvulas de control		
Características técnicas	6 salidas analógicas con 12 bits de resolución D/A con diferentes rangos de aplicación: ± 10 V, ± 5 V, 0 - 10 V, 0 - 5 V, 4 - 20 mA 16 salidas digitales, compatibles TTL 16 entradas digitales, compatibles TTL		

Elemento	Placa PCL-711	Unidades	1
Función	Regulación toma de muestras		
Características técnicas	6 entradas analógicas 0 - 5 V 16 salidas digitales, compatibles TTL 16 entradas digitales, compatibles TTL		

Elemento	Placa comunicaciones 2° puerto serie	Unidades	1
Función	Comunicación con conversor RS-232 - RS-485		
Características técnicas	Tarjeta estándar PC compatible Configurable COM1/COM3 y COM2/COM4		

Elemento	Conversor RS-232 - RS-485	Unidades	1
Función	Transmisión de datos PC - pHrocon 18		
Características técnicas	Interface VIDMAR - control RS232 -RS485 Alimentación 12 V por fuente de alimentación externa		

Elemento	Impresora	Unidades	1
Función	Registro y monitorización de alarmas		
Características técnicas	Impresora EPSON LQ-100, 24 agujas Alimentación: 220 V ca, 50/60 Hz Velocidad máxima: 19200 bit/s		

Elemento	Estación de trabajo SUN	Unidades	1
Función	Ejecutar el sistema experto G2 y el servidor de datos		
Características técnicas	Sun 4/80 (SPARCstation 10) 32 MB RAM, 1HD 1GB, 1 HD 3 GB, Lector DAT, Lector CD-ROM Sistema operativo SUN O.S. 5.4 Nombre del sistema: eq3.uab.es Dirección Internet: 158.109.13.2		

3.2.7 ACCESORIOS

Elemento	Frigorífico	Unidades	1
Función	Conservación concentrados de alimento		
Características técnicas	NEW/POL Alimentación 220 V ca, 50 Hz, 90 W Volumen: 315 l		

Elemento	Fuente alimentación 9V - 1A	Unidades	1
Función	Alimentar los tres oxímetros portátiles OXI - 92		
Características técnicas	Fuente de alimentación estabilizada, variable y cortocircuitable Circuito Cebek FE-23 Tensión de entrada: 125/220 V ca Tensión de salida: 3 - 19 V cc, 1 A intensidad máxima de salida		

Elemento	Fuente alimentación 24 V - 1A	Unidades	1
Función	Alimentar las electroválvulas y los relés		
Características técnicas	Fuente de alimentación estabilizada, variable y cortocircuitable Circuito Cebek FE-14 Tensión de entrada: 125/220 V ca Tensión de salida: 18 - 27 V cc, 6 A intensidad máxima de salida		

3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS

3.3.1 TOMA DE MUESTRA Y PRETRATAMIENTO.

En todos los análisis realizados "off-line" es necesario tener en cuenta la particularidad del sistema en cada punto de muestra para asegurar la representatividad de la medida:

- *Entrada:* Se toma muestra en la válvula de tres vías situada a la entrada del primer reactor. El volumen mínimo de muestra debe ser el recogido en un ciclo completo de las bombas dosificadoras de alimento (5 minutos). Este ciclo está diseñado para obtener la concentración deseada, pero con un aumento de la frecuencia de bombeo durante cierto tiempo. Este aumento de dosificación momentáneo evita la acumulación de aire y sólidos en el cuerpo de la bomba, lo que provocaría su descebado. El volumen de muestra no utilizado en el análisis se devuelve a los reactores, preferiblemente al anaeróbico, lugar por donde entra normalmente.
- *Reactores:* Los cuatro reactores disponen de una válvula manual de salida, situada en la parte inferior, para tomar muestra.
- *Salida:* Se toma muestra de la parte superior del sedimentador, justo a la salida de la planta.
- *Recirculación externa:* Se toma en la válvula de tres vías situada en la entrada al primer reactor.

Antes del análisis de los parámetros que implican la adición de reactivos químicos específicos es necesario eliminar la biomasa de las muestras por centrifugación y filtración.

La centrifugación se realiza con las siguientes condiciones:

- Tiempo: 10 minutos.
- Velocidad de rotación: 12000 rpm.
- Temperatura: 4 °C.

Para filtrar se utilizan filtros de celulosa de 0.45 μm .

3.3.2 MEDIDA DE CAUDALES

Cada punto de medida dispone de una válvula de tres vías. Para medir el caudal se cronometra el tiempo necesario para llenar un matraz aforado de 1 litro.

$$Q = \frac{1000}{\text{tiempo}} (\text{ml/min})$$

3.3.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.

Se utiliza el micrométodo (APHA, 1995).

Consiste en la medida, por valoración con sulfato ferroso amónico (sal de Mohr), del dicromato potásico en exceso después de dos horas de oxidación de la materia orgánica e inorgánica a 150 °C en medio ácido.

Debido a la baja repetitividad del método, las muestras se analizan por duplicado, mientras que el blanco de agua destilada se realiza por triplicado, ya que su valor es necesario para el cálculo de las concentraciones de todas las muestras. El procedimiento es el siguiente:

- Añadir, en tubos de DQO, 2.5 ml de muestra, 1.5 ml de dicromato potásico 0.0167 M ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y 3.5 ml de ácido sulfúrico concentrado con Ag^+ .
- Si la $\text{DQO}_{\text{muestra}} > 400 \text{ mg/l}$ debe realizarse una dilución para entrar en el rango de análisis.
- Tapar inmediatamente y agitar vigorosamente para asegurar la mezcla de todos los reactivos.
- Introducir en la estufa a 150 °C durante dos horas como mínimo.
- Determinar la concentración de Sal de Mohr, aproximadamente 0.01 M, cada vez que se prepara de nuevo, y cada semana después de preparada ya que el reactivo es muy inestable. Para determinar la concentración se valoran con la sal de Mohr, 1.5 ml de dicromato potásico en medio ácido con ferroína como indicador. El viraje del indicador a color rojo nos indica el punto final de la valoración (V_f , ml). La concentración de la sal de Mohr (C_{SM} , mol/l) se determina según:

$$C_{SM} = \frac{0.0167 \cdot 6 \cdot 1.5}{V_f}$$

- Valorar cada una de las muestras con la sal de Mohr estandarizada.

La DQO se calcula como:

$$DQO = \frac{(V_{\text{blanco}} - V_{\text{muestra}}) \cdot 8000 \cdot C_{SM}}{2.5}$$

Donde:

DQO	demanda química de oxígeno.
V_{blanco}	volumen de valoración utilizado para el blanco (ml).
V_{muestra}	volumen de valoración utilizado para la muestra (ml).

3.3.4 FOSFATO

Se ha utilizado un método de electroforesis capilar para el análisis de los fosfatos en aguas residuales urbanas. La electroforesis capilar es una técnica de separación. Los compuestos inyectados en un extremo del capilar se separan según su movilidad bajo el efecto de un campo eléctrico (Carrera, 1997). Los componentes esenciales del sistema pueden verse en la figura 3.4:

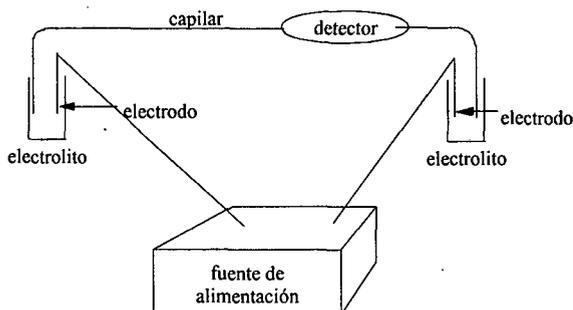


Fig. 3.4. esquema de la electroforesis capilar

- **Fuente de alimentación.** Aplica el potencial necesario para la separación, normalmente entre 10 y 30 kV. El sentido de la corriente generada depende de la polaridad de la fuente de alimentación.
- **Capilar.** El capilar es un tubo vacío de sílice fundida con diámetros que oscilan entre 50 y 100 μm y longitudes que pueden variar entre 35 y 100 cm. Están recubiertos de una capa de poliimida que evita la rotura durante su manipulación. En una sección de la pared del capilar se elimina el recubrimiento de poliimida para que actúe como celda de detección.
- **Electrolito.** Los extremos del capilar están sumergidos en recipientes que contienen el electrolito. El capilar se llena aplicando vacío (purga) en el extremo del detector. Es importante que, a lo largo de la separación, las características del electrolito, naturaleza, concentración y pH, se mantengan constantes.

- **Detección.** La detección de las especies separadas se realiza mediante la lectura de la absorbancia en la región UV/Vis.

- **Inyección.** Existen dos modos de inyección de la muestra:

- 1) **Hidroestático:** la inyección de la muestra se realiza a través de uno de los extremos abiertos del capilar generando una diferencia de presión al elevar durante un cierto tiempo el extremo del capilar introducido en la muestra por encima del extremo sumergido en el electrolito.

- 2) **Electromigración:** consiste en aplicar un cierto potencial cuando el extremo de inyección del capilar está sumergido en un vial de muestra y manteniendo el extremo de detección sumergido en electrolito. Este modo de inyección consigue una introducción selectiva de los componentes de la muestra, aniones o cationes según la polaridad de la fuente de alimentación, y se utiliza en el análisis de muestras muy diluidas porque realiza un efecto de preconcentración.

El sistema de electroforesis capilar utilizado es el *Quanta 4000E CE* de la marca *WATERS*. El electrolito utilizado es una solución comercial de la marca *WATERS* denominada *Ionselect High Mobility Anion Electrolyte*.

El protocolo de análisis es el siguiente:

Preparación del capilar.

Antes de realizar un análisis con el electrolito comercial es necesario acondicionar el capilar que vamos a utilizar:

- Purgar el capilar durante 10 minutos con una solución de hidróxido sódico 0.1 N y después otros 10 minutos con agua milli-Q.
- Asegurarse de que no salen burbujas de aire por el extremo del capilar. Si se detecta una salida continua de burbujas es señal de que se ha roto el capilar, en ese caso debe reemplazarse por uno nuevo.
- Purgar el capilar 10 minutos con el electrolito.
- Con el capilar sumergido en electrolito en sus dos extremos, aplicar (-)15 kV y vigilar el valor de la corriente. A 25°C, el valor debe ser de $14 \mu\text{A} \pm 1$. Si el valor no es ese, cambiar el electrolito. Si persiste el fallo, cambiar el capilar.

Este procedimiento debe realizarse cada vez que reiniciemos el equipo. Si se dedica un capilar en exclusiva para este electrolito, el último punto del protocolo sólo debe realizarse la primera vez.

Condiciones del análisis.

- Temperatura: 25°C.
- Inyección: 30 segundos, hidrostática.
- Voltaje: 15 kV con fuente de alimentación negativa.
- Detección: UV indirecta a 254 nm.
- Velocidad de adquisición de datos: 20 puntos/segundo.
- Tiempo de análisis: 5 minutos.
- Tiempo de purga automática: 2 minutos.

El tipo de electroferograma que se obtiene se presenta en la figura 3.5.

3.3.5 NITRATO Y NITRITO

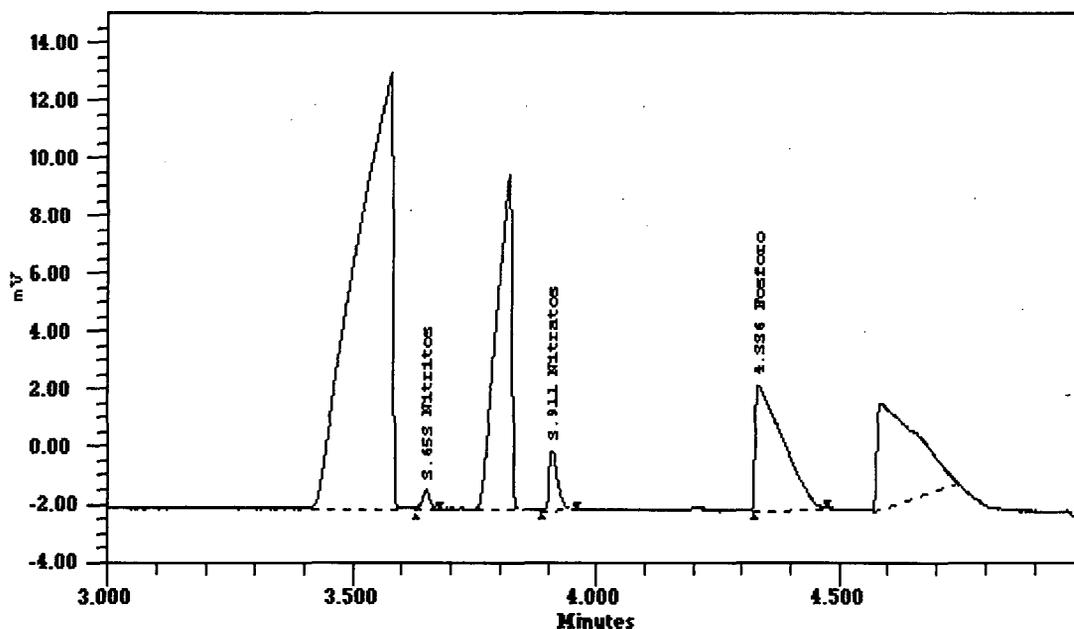
Se han utilizado dos técnicas diferentes en el análisis de nitrato y nitrito:

1) *Electroforesis capilar.*

También se ha utilizado la electroforesis capilar para analizar estos dos aniones. En un mismo análisis, y en un tiempo inferior a cinco minutos, se determinan fosfato, nitrato y nitrito (figura 3.4).

2) *Análisis de flujo por inyección (FIA).*

Este sistema de análisis automático se utiliza principalmente para el análisis en continuo del proceso, aunque también se ha utilizado para realizar algunas medidas "off-line". El analizador FIA es comentado en la sección 3.4. métodos analíticos automáticos.

*Resultats*

#	Nom	Temps migració (min)	Area (uV*sec)	Altura (uV)	Concentració	Unitats	Tipus
1		3.581	80042	15088			BB
2	Nitritos	3.653	682	641	1.459	ppm	BB
3		3.823	25227	11713			BB
4	Nitratos	3.911	2589	2056	6.673	ppm	BB
5	Fosforo	4.336	16704	4308	7.378	ppm	BB
6		4.586	20470	3706			BB

Fig. 3.5. Electroferograma del análisis de aniones

3.3.6 NITRÓGENO TOTAL (NT)

Se utiliza el método del persulfato (APHA, 1995) para la determinación del nitrógeno total. Se basa en la oxidación de todos los compuestos nitrogenados a nitrato. Si se conoce la medida de amonio, nitrato y nitrito, se puede obtener por diferencia el valor del nitrógeno orgánico.

$$N_{\text{total}} = N_{\text{orgánico}} + N\text{-NH}_4^+ + N\text{-NO}_2^- + N\text{-NO}_3^-$$

La oxidación, donde todo el nitrógeno orgánico pasa a nitrato, se realiza a 110 °C. Este es posteriormente determinado utilizando el analizador FIA.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Preparar los patrones de N-NO₃- con concentraciones 3.39 y 6.77 mg/l, a partir de una solución intermedia.
- Preparar una solución de ácido glutámico con concentración de 2.9 mg N/l a partir de una solución stock.
- En cada tubo de digestión añadir 10 ml de muestra y 5 ml de reactivo.
- Proceder de igual manera con los patrones y el ácido glutámico.
- Asegurarse de que los tubos están bien cerrados y agitarlos vigorosamente.
- Introducir los tubos en el autoclave a 110 °C durante 30 minutos.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente y añadir 1 ml de disolución tampón de borato agitando los tubos.
- Determinar el nitrógeno total (en forma de nitrato) de cada muestra, interpolando los valores de las absorbancias en la recta de calibrado.

Reactivos y patrones.

- Todos los reactivos se preparan con agua Milli-Q.
- Solución stock de nitrato. Dejar secar nitrato de potasio (KNO₃), durante 24 horas a 105 °C. Disolver 0.7218 g en agua y enrasar a 1 litro.
- Solución intermedia de nitrato. Diluir 100 ml de la solución stock de nitrato en 1 litro de agua.
- Solución stock de ácido glutámico. Dejar secar ácido glutámico, C₃H₅NH₂(COOH)₂, durante 24 horas a 105 °C. Disolver 1.051 g en agua y enrasar a 1 litro.
- Solución de ácido glutámico 2.9 mg/l. Hacer una dilución 1:10 de la solución stock (solución intermedia), y a partir de esta diluir 29 ml en 100 ml.
- Reactivo. Disolver 20.1 g de persulfato potásico (K₂S₂O₈) y 3.0 g de NaOH en agua y enrasar a 1 litro.

- Solución tampón. Disolver 61.8 g de ácido bórico (H₃BO₃) y 8.0 g de NaOH en agua y enrasar a 1 litro.

3.2.7 SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN TOTALES (SST)

Es una medida de la cantidad de materia orgánica e inorgánica en suspensión del sistema por filtración y posterior secado (APHA, 1995). Se utilizan filtros de fibra de vidrio Wathmann 0.45 μm. El procedimiento experimental es el siguiente:

- Acondicionar los filtros durante 30 minutos en la mufla a 550 °C, excepto el filtro correspondiente a la salida que se deja en la estufa durante 1 hora a 105 °C para evitar que la malla de fibra de vidrio pierda la estructura y la filtración de volúmenes grandes sea muy lenta.
- Dejar enfriar en el desecador.
- Pesar cada uno de los filtros con una balanza analítica (P_{filtro}).
- Filtrar 10 ml de muestra (V_{muestra}), previamente agitada, limpiando la pipeta con igual volumen de agua destilada. Para las muestras de la salida del sedimentador hace falta filtrar un volumen mínimo de 200 ml debido la poca cantidad de sólidos en suspensión en este punto.
- Dejar en la estufa hasta peso constante, es decir, durante 4 horas en la estufa a 97-100 °C, o bien durante una hora a 105 °C.
- Dejar enfriar en el desecador.
- Pesar los filtros con balanza analítica (P_{estufa}).
- Determinar la cantidad de sólidos en suspensión (mg/l) según:

$$SST = \frac{(P_{\text{estufa}} - P_{\text{filtro}}) \cdot 10^6}{V_{\text{muestra}}}$$

3.2.8 SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN VOLÁTILES (SSV)

Con este parámetro se mide la cantidad de material volátil eliminado, que es asimilable a la cantidad de biomasa del sistema (APHA, 1995). El procedimiento experimental utilizado es el siguiente:

- Proceder de igual manera que en el análisis de sólidos en suspensión.
- Introducir el filtro en la mufla durante 30 minutos a 550 °C.
- Dejar enfriar en el desecador.

- Determinar la cantidad de sólidos en suspensión volátiles (mg/l) según:

$$SSV = \frac{(P_{estufa} - P_{mufla}) \cdot 10^6}{V_{muestra}}$$

- El valor correspondiente a la salida se calcula como producto entre la cantidad de sólidos en suspensión totales en la salida y la media aritmética de las relaciones SSV/SST de todas las muestras.

$$SSV_{salida} = SST_{salida} \cdot \frac{\overline{SSV}_i}{\overline{SST}_i}$$

3.2.9 SEDIMENTABILIDAD

Para conocer la sedimentabilidad del fango en el sistema (Jenkins *et al.*, 1993) se tienen dos métodos que dependen de la concentración de sólidos en suspensión totales (SST) en los reactores.

El Índice Volumétrico de Fangos (IVF, o Sludge Volume Index, SVI) se utiliza cuando se tiene baja concentración de SST (por debajo de 3000 mg/l) en el reactor. El procedimiento experimental es el siguiente:

- Llenar el cono de Imhoff hasta un volumen de un litro, agitando para que la mezcla sea completa.
- Dejar reposar y anotar la altura de la interfase agua-fango (V_{30} en ml/l) a los treinta minutos.

- Devolver el volumen de líquido al sistema.
- El valor del IVF (ml/g), conociendo la concentración de SST (g/l) del punto donde se ha tomado la muestra, se calcula como:

$$IVF = \frac{V_{30}}{SST}$$

El Índice Volumétrico de Fangos Diluidos (IVFD, o Diluted Sludge Volume Index, DSVI) se utiliza cuando se tiene mala sedimentabilidad del fango o elevada concentración de sólidos en suspensión totales (SST) en los reactores. El procedimiento es el siguiente:

- Llenar el cono de Imhoff hasta un volumen de muestra de 0.5 litros y añadir agua del grifo hasta un litro, agitando para que la mezcla sea completa. Si fuese necesario, el resto de diluciones se preparan a partir de esta, eliminando medio litro de muestra y rellenando el cono con igual volumen de agua del grifo.
- Dejar reposar y anotar la altura de la interfase agua-fango (V_{30} ml/l) a los 30 minutos.
- Devolver el volumen de líquido al sistema.
- El valor del IVFD (ml/g), conociendo las concentraciones de SST (g/l) del punto de muestreo, se calcula como:

$$IVFD = \frac{V_{30} \cdot f}{SST}$$

Donde:

f factor de dilución.

3.4 MÉTODOS ANALÍTICOS AUTOMÁTICOS

3.4.1 NITRATO Y NITRITO

El sistema FIA desarrollado por Gabriel (Gabriel, 1996; Gabriel, ACHA), es un sistema biparamétrico que permite el análisis simultáneo de los dos analitos con una única inyección de muestra (figura 3.6).

La característica más destacada del analizador es la división de la muestra inyectada en dos canales. La muestra que pasa por el primero se utiliza para detectar nitrito, y la del segundo canal (con la columna de reducción de nitrato a nitrito) se utiliza para detectar nitrito más el nitrato reducido a nitrito. Este último canal tiene un tiempo de residencia mayor, lo que permite la separación de los picos.

El análisis colorimétrico de nitrito se basa en la detección espectrofotométrica a 543 nm del compuesto azoico formado como producto de reacción del nitrito con sulfanilamida y n-(1-naftil)-

etilendiamina dihidrocloruro (NED), conocida como reacción de Shinn. El nitrato se detecta de la misma forma, pero con una reducción previa a nitrito utilizando cadmio como agente reductor, recubierto de una película de cobre metálico como catalizador de la reacción.

Características del analizador

Tiene un rango de detección de 0.1 a 5 mg NO₂⁻/l y de 0.5 a 50 mg NO₃⁻/l, que equivale a 0.03 a 1.52 mg N-NO₂⁻/l y 0.11 a 11 mg N-NO₃⁻/l.

Cada uno de los módulos del analizador está controlado por ordenador, utilizando un programa de desarrollo propio que permite la monitorización y el archivo de los datos obtenidos.

Con este sistema se puede obtener una medida de nitrato y nitrito cada 10 minutos.

Para su calibrado es necesario utilizar dos patrones de nitrito (3 y 7 mg/l) y uno de nitrato (50 mg/l). El calibrado de nitrito es bastante estable, por lo que generalmente es suficiente un calibrado por semana para mantener una respuesta correcta. La respuesta del sistema al nitrato es más variable, por lo que conviene realizar un calibrado más frecuente. Durante la operación en continuo, el sistema está programado para calibrarse automáticamente cada 8 horas.

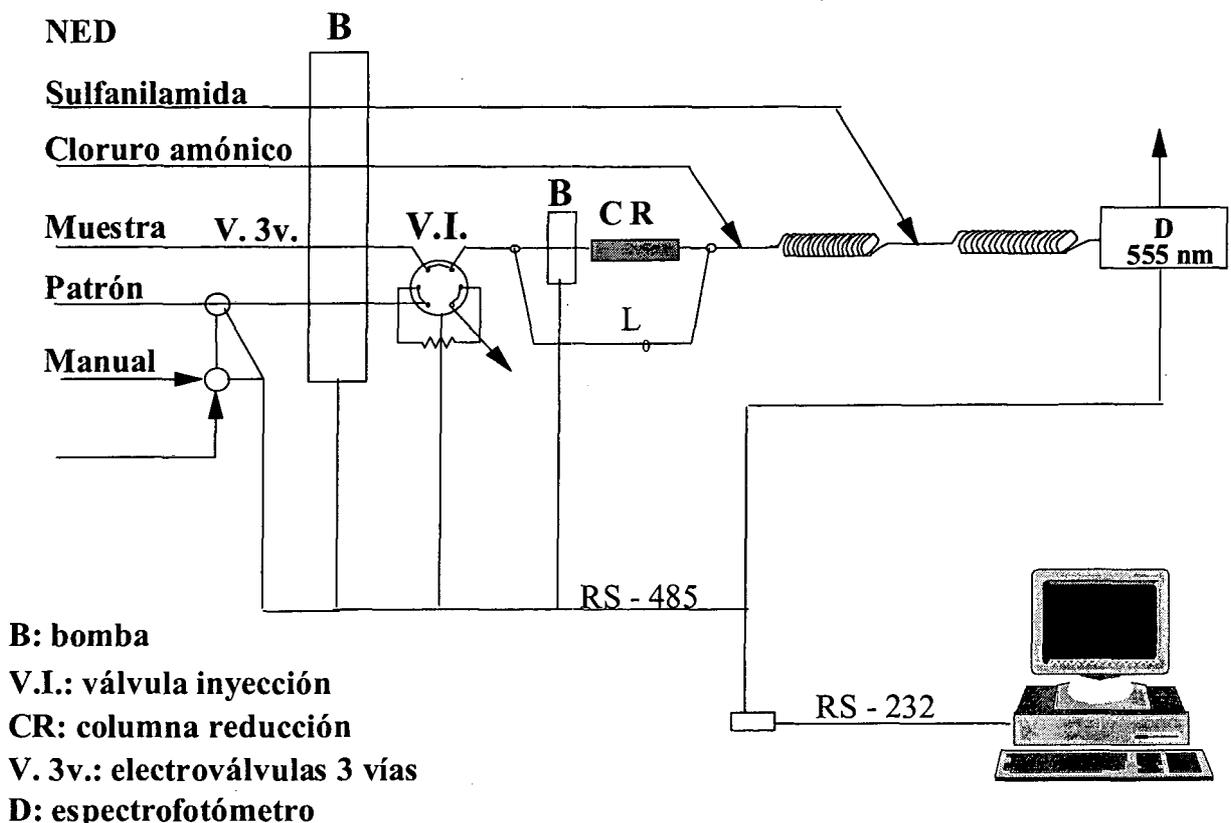


Fig. 3.6. Esquema de funcionamiento del analizador FIA de nitrito y nitrato

3.4.2 AMONIO

Se ha determinado la concentración de amonio utilizando una técnica de análisis de flujo continuo (CFA).

Es una técnica analítica de flujo no segmentado que consiste en la inyección de una corriente de muestra que entra directa y continuamente en el sistema de detección, siendo la propia corriente de muestra el portador.

Se ha utilizado el sistema CFA para el análisis de amonio en aguas residuales desarrollado por Gabriel, (1996). Es un sistema de flujo continuo no segmentado, sin válvula de inyección. A diferencia del sistema FIA, en el momento de la detección debe haberse llegado al equilibrio químico.

La configuración del sistema (figura 3.7) se basa en la basificación de una corriente de muestra utilizando NaOH, de forma que se convierte a amoniaco. El amoniaco acuoso se difunde a través

de la membrana de la celda de difusión y es arrastrado por una corriente de cloruro amónico y cloruro potásico. El amoniaco presente en el sistema es detectado a través de un electrodo combinado conectado a un potenciómetro.

Características del analizador

El rango de detección es de 0.25 a 50 mg NH_4^+/l , que equivale a 0.2 y 39 mg $\text{N-NH}_4^+/\text{l}$, lo que es un rango adecuado para las condiciones típicas de la planta. Al iniciar los análisis es necesario calibrarlo con dos patrones de 5 y 50 mg NH_4^+/l . Puede controlarse manualmente y vía PC.

La lectura de potencial puede realizarse continuamente, pero si el sistema funciona en continuo tarda en estabilizarse unos 20 minutos desde que se cambia el punto de toma de muestras y se obtiene la medida correcta. Esto permite obtener una medida de amonio de los reactores cada 20 minutos. Cuando se monitoriza un solo punto, se toma una medida cada 10 minutos.

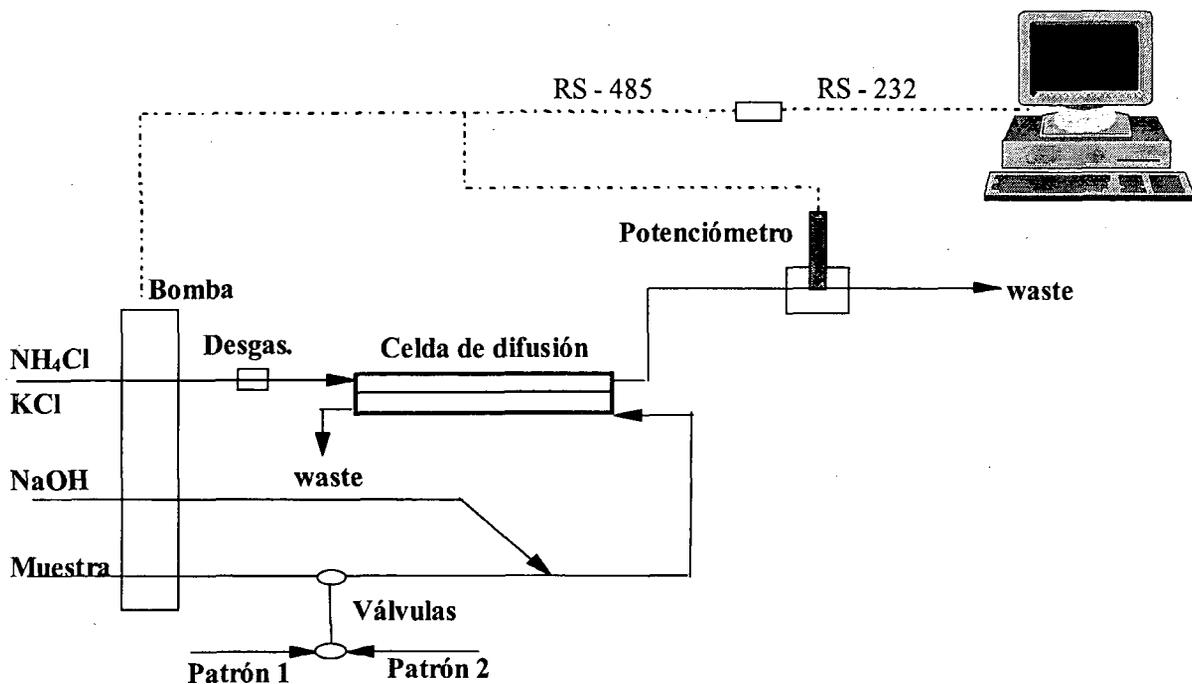


Fig. 3.7. Esquema de funcionamiento del analizador CFA de amonio

3.5 MICROBIOLOGÍA

Se han efectuado observaciones en un microscopio óptico en contraste de fases y con aumentos de 40, 100 y 400 y objetivo de inmersión de 1000.

La metodología utilizada en la observación al microscopio para el análisis microbiológico se comenta a continuación.

3.5.1 TOMA DE MUESTRA Y CONSERVACIÓN

Para realizar el análisis microscópico es suficiente una muestra de 10-20 ml en un recipiente lleno al 50%, para mantener aireada la muestra tomada del cualquier punto del reactor aireado, evitando las zonas cercanas a las paredes o cualquier zona poco aireada.

En general, lo ideal es analizar una muestra fresca, para evitar cualquier modificación de las características del fango. Si el análisis se realiza después de 8-10 horas de tomada la muestra, es conveniente mantener la muestra refrigerada. Muestras de alta carga orgánica pueden ser mantenidas en refrigeración por 3-4 días y muestras de baja carga 8-10 días.

3.5.2 OBSERVACIÓN GENERAL

- En un portaobjetos se coloca una gota con una pipeta Pasteur de una muestra que se encuentre bien aireada y mezclada.
- Se cubre con un cubreobjetos y se coloca en el microscopio.
- Se fija en el microscopio un aumento de 100x y se coloca en contraste de fase.

Sobre la muestra así preparada se realizan las siguientes observaciones:

3.5.2.1 OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLÓCULO

En la observación de la morfología del flóculo se deben determinar los siguientes aspectos:

- a) Forma y dimensión del flóculo. Idealmente regular y redondeada. Puede ser pequeño ($\varnothing < 150\mu\text{m}$), mediano (de 150 a $500\mu\text{m}$), y grande ($\varnothing > 500\mu\text{m}$). La dimensión del flóculo depende de la carga orgánica, de la

calidad del afluente y de la turbulencia del tanque de aireación.

- b) Presencia de zoogleas amorfas.
- c) Presencia de partículas orgánicas e inorgánicas.
- d) Presencia de células libres en la solución.

3.5.2.2 EFECTO DE LOS FILAMENTOS SOBRE LA ESTRUCTURA DEL FLÓCULO

Se puede clasificar en una de las siguientes situaciones:

- a) Ninguno: cuando los filamentos son pocos o cuando se desarrollan libremente en el líquido aireado.
- b) Formación de puentes entre flóculos: cuando los filamentos, debido a su longitud, sobresalen del flóculo.
- c) Formación tipo malla o red: causada por el filamento que se desarrolla en el interior del flóculo.

3.5.2.3 RECUENTO SIMPLIFICADO DE LOS FILAMENTOS

Existen diferentes métodos de recuento para determinar el número de organismos filamentosos. En general, para realizar un seguimiento estos métodos requieren de mucho tiempo para convertirse en un control rutinario, por lo que es posible efectuar una evaluación cualitativa de la abundancia refiriéndose a las siguientes categorías propuestas por Jenkins (tabla 3.1):

Clase	Abundancia	Observación
0	Ninguna	Completa ausencia de filamentos.
1	Poca	Filamentos observados ocasionalmente en algún flóculo.
2	Alguna	Filamentos presentes, pero no en todos los flóculos.
3	Moderada	Filamentos observados en todos los flóculos, pero en baja densidad (1 a 5 filamento/flóculo).
4	Frecuente	Filamentos observados en todos los flóculos, pero con densidad media (5 a 20 filamentos/flóculo).
5	Abundante	Filamentos observados en todos los flóculos, pero con alta densidad (al menos 20 filamentos/flóculo).
6	Excesiva	Más filamentos que flóculos o los filamentos invaden toda la zona entre flóculos.

Tabla 3.1. Categorías de abundancia de los organismos filamentosos (Jenkins, 1993).

3.5.2.4 IDENTIFICACIÓN DE LA MICROFAUNA

En esta primera muestra observada, se escriben en una lista todas las especies que han sido observadas en una cantidad superior o igual a dos individuos. Si bien, muchos microorganismos pueden ser observados frecuentemente en el fango activo, algunas formas, como las amebas sin teca y los organismos protistas (algas, crustáceos e insectos), no son consideradas en este método. Los organismos incluidos en la microfauna son: flagelados pequeños y grandes, ciliados, amebas con teca, rotíferos y nematodos. Dado que la identificación en el ámbito de especies de los flagelados, rotíferos y nematodos es difícil, estos grupos contribuyen cada uno como una sola unidad sistemática.

3.5.3 CUANTIFICACIÓN DE LA MICROFAUNA.

La enumeración de la microfauna se realiza en dos etapas, una para estimar la densidad de la microfauna (excluyendo los flagelados pequeños) y otra para estimar la abundancia de los flagelados pequeños. La primera enumeración se realiza para establecer la abundancia de la microfauna ($< o \geq 10^6$ individuos/l) y para determinar la abundancia relativa (%) entre grupos y especies. Dado que la identificación en el ámbito de especies de flagelados, rotíferos y nematodos es difícil, el método considera que estos grupos contribuyen cada uno como una sola unidad sistemática. Por otra parte, debe recordarse que solo los ciliados bacteriógrafos contribuyen a formar los tres grupos funcionales (nadadores, móviles de fondo y sésiles). Cada especie de ciliado carnívoro contribuye solo a la densidad y diversidad total de la microfauna.

La estimación de la densidad de población de flagelados pequeños requiere de una técnica de recuento apropiada debido a las reducidas dimensiones y a la elevada densidad que frecuentemente alcanza este grupo (10^7-10^8 ind/l). Para esta finalidad la cámara de Fuchs-Rosenthal de $3.2 \mu\text{l}$ es ideal, tiene unas dimensiones de $4 \times 4 \times 0.2$ mm y se subdivide en 256 cuadrados de $250 \mu\text{l}$ de lado.

La metodología seguida en esta etapa es la siguiente:

- Se toma con una micropipeta una muestra de $25 \mu\text{l}$ del fango activo y se coloca sobre un portaobjetos. En este caso, es indispensable cubrir el portaobjetos con un cubreobjetos de 18×18 mm para evitar una evaporación rápida de la muestra durante la enumeración.

- Se fija el microscopio a un aumento de $100\times$ y se coloca en contraste de fase.
- Se coloca el portaobjetos en el microscopio y se recorre toda la superficie de la muestra, contando y anotando en una hoja cada individuo que se observe. Para evitar repetir zonas ya observadas o dejar de observar algunas, se recomienda comenzar en un extremo (A) del cubreobjetos y terminar en el otro (B), siguiendo el recorrido que se muestra en la figura 3.8. Es importante tomar en cuenta, para este análisis, el volumen de muestra que sobresale del cubreobjeto.

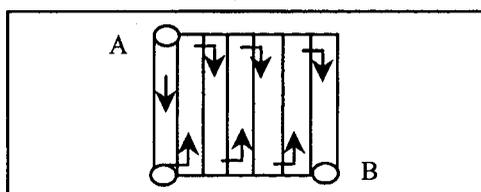


Fig. 3.8. Esquema del recorrido recomendado para el recuento de la microfauna

- Cuando se observan colonias de especies, se deben contar todos los individuos de la colonia.
- Las especies observadas preliminarmente en la identificación de la microfauna, deben ser consideradas presentes en la muestra con densidad de 1 individuo/ $50 \mu\text{l}$ en caso de no observarse durante la enumeración.
- Se realizan nuevamente todos estos pasos, para una segunda enumeración.
- Una vez realizado el recuento de ambas muestras, se suman las diferentes especies y grupos observados y se multiplican por 20000 para obtener la cantidad de individuos/l presentes en el fango activo. Posteriormente se calcula el porcentaje relativo de la abundancia entre especies y grupos.
- Para la estimación de la densidad de flagelados pequeños, se deben contar los flagelados que se encuentran en el interior de los 16 cuadrados que forman una de las diagonales de la cámara Fuchs-Rosenthal con un aumento en el microscopio de $200\times$ y en contraste de fase (figura 3.9).

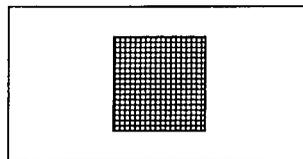


Fig. 3.9. Cámara de Fuchs-Rosenthal

- Cuando los flagelados pequeños contados son menos de 10, su densidad en el fango es muy pequeña (< 50000 ind/l); cuando es superior a 100, estos deben ser considerados como grupo dominante (densidad de 5×10^8 ind/l).

Grupo dominante y densidad de la microfauna que determina la entrada horizontal de la tabla		Número total de unidades taxonómicas que constituyen la microfauna y número de pequeños flagelados (F) contados a lo largo de la diagonal en la cámara Fuchs-Rosenthal							
Grupo dominante	Densidad (ind./l)	> 10		8-10		5-7		< 5	
		F<10	10<F>100	F < 10	10<F>100	F < 10	10<F>100	F < 10	10<F>100
Móvil de fondo + sésiles y/o amebas con teca	< 10 ⁶	10	8	9	7	8	6	7	5
	≥ 10 ⁶	9	7	8	6	7	5	6	4
Sésiles >80%	< 10 ⁶	9	7	8	6	7	5	6	4
	≥ 10 ⁶	8	6	7	5	6	4	5	3
<i>Opercularia spp.</i>	< 10 ⁶	7	5	6	4	5	3	4	2
	≥ 10 ⁶	6	4	5	3	4	2	3	1
<i>V. microstoma</i>	< 10 ⁶	6	4	5	3	4	2	3	1
	≥ 10 ⁶	5	3	4	2	3	1	2	0
Nadadores	< 10 ⁶	5	3	4	2	3	1	2	0
	≥ 10 ⁶	4	2	6	1	2	0	1	0
Pequeños flagelados (>100)	< 10 ⁶	4		3		2		1	
	≥ 10 ⁶	3		2		1		0	

Tabla 3.2. Tabla de dos entradas para el cálculo del SBI

Una vez realizada la cuantificación de la microfauna se procede a determinar el índice biótico del fango activo en estudio (SBI). Este índice se determina mediante la tabla de dos entradas (tabla 3.2). El ingreso vertical se hace considerándose la diversidad específica de la muestra y el número de pequeños flagelados en la diagonal de la cámara Fuchs-Rosenthal. En la columna de la derecha están distribuidos los diversos grupos de la microfauna asociados a una decreciente calidad biológica del fango. Para el ingreso horizontal se toma en consideración el grupo dominante en el reactor aireado y después la densidad total de la microfauna; si dos o más grupos comparten la dominancia de la muestra, se escoge el grupo que ocupe la posición más baja de esta tabla.

El valor del SBI es determinado por la intersección de la columna y la fila seleccionadas, obteniéndose un valor numérico entre 1-10. Estos valores son agrupados en cuatro clases de calidad biológica de los fangos, que permiten a su vez, diferenciar cuatro grados de eficiencia para la evaluación del funcionamiento del sistema (tabla 3.3).

Valor del SBI	Clase	Evaluación
8-10	I	Fango muy bien colonizado y estable, actividad biológica excelente; elevada eficiencia depurativa.
6-7	II	Fango bien colonizado y estable, actividad biológica en descenso; eficiencia depurativa suficiente.
4-5	III	Actividad biológica insuficiente, eficiencia depurativa mediocre.
0-3	IV	Actividad biológica muy pobre, eficiencia depurativa baja.

Tabla 3.3. Conversión del valor de SBI en clases de calidad biológica del fango activo y evaluación de la eficiencia depuradora del tratamiento

3.5.4 IDENTIFICACIÓN DE LOS ORGANISMOS FILAMENTOSOS

Para realizar la identificación de los filamentos, se realiza el siguiente protocolo:

- Se prepara un nuevo portaobjetos, donde se coloca una gota de la muestra que se está analizando y se cubre con un cubreobjetos.
- Se presiona suavemente la muestra preparada con un papel y se coloca en el microscopio.
- Se fija el microscopio en el ocular de inmersión de 100x aumentos y se coloca en contraste de fase.
- Se observan las características morfológicas de los filamentos de la muestra.

En este tipo de análisis se puede recurrir a la ayuda de diferentes tinciones específicas tipo Gram y Neisser, además de las pruebas bioquímicas como el test de acumulación de sulfuro.

Tinción de Gram (Jenkins, 1993)

Solución 1: preparar, separadamente, las siguientes soluciones y luego combinarlas:

A		B	
Cristal violeta	2 g	Oxalato de amonio	0.8 g
Etanol 95%	20 ml	Agua destilada	80 ml

Solución 2:

Yodo	1 g
Yoduro potásico	2 g
Agua destilada	300 ml

Solución de decoloración:

Etanol, 95 %

Solución 3:

Safranina O (2.5 % w/v en 95 % etanol) 10 ml
 Agua destilada 100 ml

Procedimiento:

- 1) Preparar un portaobjetos con una gota de la muestra a analizar secada al aire libre.
- 2) Teñir 1 min. la muestra con la solución 1, lavar 1 seg. con agua.
- 3) Teñir 1 min. la muestra con la solución 2, lavar bien con agua.
- 4) Mantener el portaobjetos inclinado y decolorar con etanol al 95%, añadido gota por gota durante 25 seg. Dejar secar.
- 5) Teñir la muestra con la solución 3, lavar bien con agua.
- 6) Examinar en el microscopio con el ocular de inmersión y con luz directa. Azul violeta es positivo y rojo es negativo.

Tinción de Neisser (Jenkins, 1993)

Solución 1: preparar separadamente y guardar las siguientes soluciones:

A		B	
Azul de metileno	0.1 g	Cristal de violeta (10% w/v en 95% etanol)	3.3 ml
Etanol 95%	5 ml	Etanol 95%	6.7 ml
Ácido acético, glacial	5 ml	Agua destilada	100 ml
Agua destilada	100 ml		

Mezclar 2 partes del volumen de la solución A con 1 parte del volumen de la solución B.

Solución 2:

Bismark marrón,
 $C_{18}H_{18}N_8$ (1% w/v acuoso) 33.3 ml
 Agua destilada 66.7 ml

Procedimiento:

- 1) Preparar un portaobjetos con una gota de la muestra a analizar secada al aire libre.
- 2) Teñir 30 seg. la muestra con la solución 1, lavar 1 seg. con agua.
- 3) Teñir 1 min. la muestra con la solución 2, lavar bien con agua, dejar secar.
- 4) Examinar en el microscopio con el ocular de inmersión y con luz directa. Azul violeta es positivo y amarillo-marrón es negativo.

Tinción con tinta china (Jenkins, 1993)**Reactivo:**

Tinta china (solución acuosa de partículas negras de carbón).

Procedimiento:

- 1) Mezclar una gota de tinta china y una gota de la muestra de fango activo en un portaobjetos.
- 2) Colocar un cubreobjetos y observar a 100x aumentos usando contraste de fases.

Un fango "normal" permite que las partículas de la tinta china penetren en la mayoría de los flóculos completamente, dejando como máximo el centro libre. En fangos que contienen grandes cantidades de polímero exocelular, se observan abundantes zonas claras que contienen una baja densidad de células.

Test de acumulación de sulfuro (Jenkins, 1993)**Reactivo:**

Sulfuro sódico ($Na_2S \cdot 9H_2O$) 1.0 g/l; preparada cada semana.

Procedimiento:

- 1) En un portaobjetos mezclar una gota de muestra y una gota de sulfuro sódico.
- 2) Dejar secar al aire libre durante 10-20 min.
- 3) Colocar un cubreobjetos y presionar suavemente para quitar el excedente de la solución.
- 4) Observar en el microscopio con el ocular de inmersión (1000x). Una respuesta positiva se observa con un alto nivel de refracción, gránulos intracelulares coloreados de amarillo.

La identificación de los filamentos se hace entonces comparando las respuestas a estas tinciones y pruebas, junto a las características morfológicas con las características descritas en la tabla 1.5.

Toda la información recogida de esta manera se organiza y acumula en fichas de datos, donde además se registran las fotografías realizadas durante la observación con una cámara de vídeo acoplada en el tercer ocular del microscopio.

3.6 COMPOSICIÓN ALIMENTO

La planta piloto tiene una capacidad de tratamiento total de más de 400 litros por día, volumen diario de agua residual real difícil de obtener. Para eliminar la necesidad de obtención de aguas residuales externas, se fabrica automáticamente agua sintética, a partir de un concentrado de alimento (aproximadamente de concentración 1:200) diluido con agua de red.

La composición de agua sintética (DQO, especies nitrogenadas, sales) se ha diseñado para que sea similar a la normal que se puede encontrar en una planta depuradora después del sedimentador primario. Para ello se tiene en cuenta la presencia de compuestos de diferente biodegradabilidad.

Se han preparado dos concentrados independientes, uno de fuente de carbono y otro de fuente de nitrógeno, para disminuir el peligro de contaminación y poder efectuar variaciones de concentración automáticas. El resto de componentes (sales) ha sido repartido entre los dos concentrados para facilitar su disolución. La densidad resultante de las disoluciones es de 1.03 kg/l.

Preparación concentrado de fuente de nitrógeno

La composición del concentrado se muestra en la tabla 3.4.

Componente	g/l
Peptona pancreática de caseína	23
Cloruro amónico (NH ₄ Cl)	13.2
Urea (CO(NH ₂) ₂)	1.1
Extracto de levadura	0.2
Cloruro sódico (NaCl)	16.0
Cloruro magnésico (MgCl ₂ ·7H ₂ O)	18.0
Sulfato de hierro (FeSO ₄ ·7H ₂ O)	0.4
Sulfato de manganeso (MnSO ₄ ·H ₂ O)	0.25
Sulfato de zinc (ZnSO ₄ ·7H ₂ O)	0.4
Sulfato de cobre (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	0.2
Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	0.02

Tabla 3.4. Composición del concentrado nitrogenado

Para su preparación se siguen estos pasos:

- Añadir la peptona a un depósito previamente lleno con la mayor parte del agua destilada necesaria.
- Esperar a que se disuelva completamente.
- Añadir el resto de componentes.
- Añadir el agua destilada necesaria para completar el volumen calculado y dejar agitar unos minutos.

El concentrado preparado con esa composición tiene la siguiente composición de nitrógeno teórica:

Nitrógeno amoniacal:	66 %
Nitrógeno orgánico:	27 %
Nitrógeno en forma de urea:	7 %

El análisis del concentrado, realizado en diversas diluciones, proporciona los siguientes resultados:

DQO:	26 g O ₂ /l
Nitrógeno total:	6100 mg/l
Nitrógeno amoniacal:	3600 mg/l
Nitrógeno orgánico:	2500 mg/l

Preparación concentrado de fuente de carbono

La composición del concentrado se detalla en la tabla 3.5.

Componente	g/l
Almidón ((C ₆ H ₁₀ O ₅) _n)	24.0
Sacarosa (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	18.0
D(+)- Glucosa anhidra (C ₆ H ₁₂ O ₆)	18.0
Di-hidrogenofosfato potásico (KH ₂ PO ₄)	6.2
Cloruro cálcico (CaCl ₂ ·2H ₂ O)	8.0

Tabla 3.5. Composición del concentrado de carbono

Preparación:

- Hervir agua destilada. Añadir poco a poco el almidón necesario para preparar un depósito, procurando que el agua no deje de hervir y que se formen el menor número posible de grumos. Remover de vez en cuando.
- Una vez disuelto totalmente el almidón, trasvasarlo al depósito y mantenerlo en perfecta agitación.
- Añadir el resto de componentes.

El concentrado preparado tiene las siguientes características teóricas:

DQO:	60 gO ₂ /l
Composición en azúcares:	30% sacarosa, 30% glucosa, 40% almidón

El análisis de DQO del concentrado, realizado en diversas diluciones, proporciona un valor de DQO = 62 gO₂/l.

Características del alimento diluido

Se han analizado las características del alimento una vez diluido, tal como es alimentado a los reactores en condiciones de entrada constante normal. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.6.

Componente	Valor medido
DQO	400 mg/l
NKT	44 mg/l de nitrógeno
NH ₄ ⁺	25 mg/l de amonio
NO ₃ ⁻	2 mg/l de nitrato
PO ₄ ³⁻	6 mg/l de fosfato
Cl ⁻	169 mg/l de cloruro

Tabla 3.6. Valores analizados del alimento diluido

3.7 COMUNICACIONES

Las medidas detectadas por los instrumentos y las acciones de control sobre los diferentes elementos finales de control, deben ser transmitidas desde el punto de origen al punto donde se requieren. Para la transmisión de señales entre los elementos de control de una industria, se utilizan diferentes medios, que pueden ser divididos en dos grandes grupos, transmisión analógica y transmisión digital.

3.7.1 TRANSMISIÓN ANALÓGICA

Cuando los mecanismos de control e indicadores/registradores de medida estaban localizados cerca del lugar de operación de la planta, no había un problema en la mayor parte de los casos. Con el incremento en el tamaño y la complejidad de las plantas y la consiguiente centralización de los indicadores/registradores y del control, se convirtió en esencial disponer de un método conveniente para transmitir los datos sobre distancias mayores [Borer, 1985]. Esta necesidad llevó al diseño de transductores y transmisores, en forma neumática y electrónica.

El transductor es un dispositivo que genera una señal análoga al valor medido en una forma que es conveniente para la transmisión. La representación analógica del valor medido puede realizarse de dos formas, con una señal neumática de 0.2 a 1 bar (3-15 psi) o mediante una señal eléctrica de 4 a 20 mA.

En la señal neumática, los tubos para la transmisión de aire pueden extenderse sobre largas distancias para transmitir esta señal analógica a una localización remota. La transmisión neumática no requiere elevadas presiones y el aire comprimido es relativamente barato, por lo que resulta un método de transmisión barato. Este tipo de transmisión es todavía muy utilizado, sobre todo en zonas con atmósferas con posibilidad de incendio o en ambientes donde la electrónica puede fallar (por calor, frío o alta humedad) [Connell, 1996]. El valor escogido para el cero no es de presión cero, se toma un 20 % de la señal máxima porque sería muy difícil vaciar la línea de transmisión para que la presión fuera exactamente cero.

En la señal eléctrica se utiliza un valor máximo de 20 mA, porque es fácilmente medible en el extremo receptor y no es tan elevada como para requerir cables de elevado grosor y precio. Tampoco ofrece una gran dificultad en conseguir seguridad eléctrica en atmósferas inflamables. La señal mínima en este

caso es de 4 mA. Al igual que en la señal neumática, también es difícil conseguir un cero exacto, pero además esto requeriría proporcionar una fuente de alimentación externa, lo que limitaría la seguridad del transductor ante incendios.

3.7.2 TRANSMISIÓN DIGITAL

Los datos lógicos en los ordenadores están representados por bits (BINARY DIGITS). El bit es una construcción intelectual, representada en el ordenador por un voltaje determinado. Cuando los bits deben enviarse dentro del propio ordenador o hacia el exterior, se transmiten a través de cables como cualquier voltaje.

Los bits se agrupan en unidades determinadas que proporcionan un esquema lógico mayor. Por ejemplo, un byte (octeto) está formado por una serie de ocho bits. Estos ocho bits pueden ser unos o ceros indistintamente, son $2^8 = 256$ combinaciones posibles. Estas combinaciones permiten definir con cada byte un número entre 0 y 255.

La transmisión de varios bits simultáneamente por igual número de cables (más uno de referencia) se denomina transmisión en paralelo. Éste es un tipo de transmisión rápida, pero sujeta a errores provocados por las diferencias de resistencia, capacidad e inductancia que pueden existir durante el trayecto que recorre la señal. Otra desventaja es el elevado coste de los cables en el caso de que deban transmitirse datos a larga distancia. Para la transmisión en paralelo de un byte, son necesarios un mínimo de nueve cables (ocho para datos y uno para el circuito común de referencia). Además serán necesarios más cables para controlar el flujo de datos a través de la conexión.

Otro problema de la transmisión de datos en paralelo viene provocado por la naturaleza del voltaje que representa los bits. Cuando un bit cambia de uno a cero, el voltaje cambia muy rápidamente, en el orden de nanosegundos. A medida que el cable se hace más largo, sus propiedades de resistencia, capacidad e inductancia limitan la rapidez con que un bit puede cambiar de uno a cero, con lo que es posible la degradación de la señal o pérdida de datos. Por este motivo, solamente es utilizado en el interior del ordenador o en un entorno muy cercano a él (por ejemplo impresoras o dispositivos de almacenamiento de datos directamente conectados al ordenador, que necesitan altas velocidades de transferencia).

Para que la transferencia de datos sea menos cara y menos sujeta a errores es necesario otro método de comunicación. La alternativa a enviar los datos simultáneamente es enviarlos separados, uno

después de otro. En el extremo receptor se invierte el proceso y se reconstruye el octeto original. De este modo los datos pueden transmitirse simplemente con dos cables. Este esquema es conocido como transmisión en serie.

La transmisión en serie reduce la complejidad y parte del coste del sistema, pero obteniendo a cambio una menor eficacia: es necesario un intervalo de tiempo ocho veces mayor para transmitir ocho bits individuales que para transmitirlos simultáneamente.

El tiempo necesario para la transmisión de un byte es realmente mayor que el correspondiente a la transmisión de ocho bits individuales. Deben añadirse otros bits suplementarios. El conjunto de bits completo a enviar puede ser el siguiente:

- Bit de inicio.
- Bits de datos (7/8).
- Bit de paridad. Este bit se utiliza para comprobar si los bits de datos han sido bien recibidos. Existen estas variantes:
 - Paridad par. Si la suma de los bits de datos es par, el bit de paridad es 1, si es impar, el bit de paridad es 0.
 - Paridad impar. Si la suma de los bits de datos es impar, el bit de paridad es 1, si es par, el bit de paridad es 0.
 - Sin paridad. No se utiliza el bit de paridad.
- Bit de paro. Pueden ser uno o dos bits.

Como puede observarse, será necesario enviar un mínimo de 10 bits por cada byte. Esto provocará una disminución de velocidad respecto a la transmisión en paralelo, pero es aceptable para los dispositivos externos usualmente utilizados. La menor velocidad es compensada por el incremento de seguridad y alcance de la señal.

Para la comunicación de datos en serie se han establecido diferentes protocolos que especifican las características técnicas de la conexión. A continuación se especifican los más usuales.

3.7.2.1 RS-232-C

En 1969 la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas), conjuntamente con los Laboratorios Bell y los fabricantes de equipos de comunicaciones, formularon el EIA RS-232-C. El propósito inicial fue la conexión entre un Equipo Terminal de Datos (DTE, Data Terminal Equipment) y un Equipo de Comunicación de Datos (DCE, Data Communications Equipment), empleando un intercambio de datos binarios en serie [Campbell 1988].

Actualmente, la conexión RS-232-C es el medio principal mediante el cual se pueden conectar equipos auxiliares a los ordenadores personales, a pesar de que este modelo fue proyectado para resolver únicamente el problema de conexión entre módems (DCE) y ordenadores (DTE). La mayoría de dificultades con este modelo provienen de su utilización para tareas diferentes para las que fue diseñado.

El documento que establecía el estándar constaba de cuatro secciones:

- Características de la señal eléctrica. Definición de los voltajes que representan los ceros y unos lógicos.
- Características mecánicas de la conexión. Establece que el DTE dispondrá de un conector macho y el DCE un conector hembra. También se especifican la asignación de números a las patillas. El tipo y las medidas del conector son establecidas por la organización internacional de estándares (ISO). Los más utilizados son los de 9 pines (DB-9) y los de 25 (DB-25).
- Descripción funcional de los circuitos de intercambio. En esta sección del documento se define y da nombre a las señales que se utilizarán.
- Interfaces para configuraciones seleccionadas de sistemas de comunicación. Son ejemplos de tipos comunes de conexión entre ordenador y módem.

Los tres circuitos principales utilizados para la comunicación son los siguientes:

- Línea 2 (TXD). Salida de datos del DTE.
- Línea 3 (RXD). Entrada de datos al DTE.
- Línea 7 (común). Circuito común, referencia para determinar la polaridad y voltaje de las otras líneas.

El término salida se refiere a la transferencia de datos desde un ordenador a un dispositivo externo. Recíprocamente, la transferencia de datos desde un dispositivo externo al ordenador se conoce como entrada. Estos procesos reciben el nombre genérico de entrada/salida (E/S).

Hay que considerar el sentido físico correspondiente a los conceptos de entrada y salida. La salida de datos se realiza cambiando la diferencia de potencial entre la línea 2 y la 7. Si disponemos de dos cables conectados respectivamente a las patillas 2 y 7 del conector, esta diferencia de potencial se transmitirá a largo de ellos, ya que se trata de materiales conductores. La entrada de datos corresponde al proceso inverso, generación por una fuente externa de una serie de diferencias de potencial y detección

de dichas diferencias entre las patillas 3 y 7 del conector.

Los voltajes correspondientes a los niveles lógicos existentes en la conexión RS232 se esquematiza en la figura 3.10.

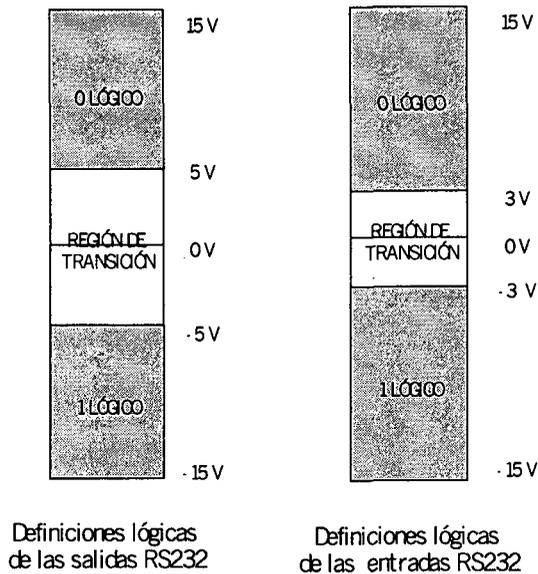


Fig. 3.10. Definición de los voltajes que representan los niveles lógicos en el RS-232-C

Como puede observarse, la conexión RS-232 no opera con la misma fuente de alimentación de 5 voltios de otros circuitos electrónicos integrados en el ordenador. Sus voltajes pueden oscilar entre +15 y -15 voltios. Además, los datos son transmitidos al contrario de las convenciones lógicas de uso corriente: un voltaje positivo en la conexión representa un 0, mientras que un voltaje negativo representa un 1.

La única diferencia entre la definición de salida y de entrada es el ancho de la región de transición, de -3 a +3 V en la entrada y de -5 a +5 V en la salida. Esta diferencia entre las definiciones de voltajes mínimos permisibles se conoce como el margen de ruidos del circuito. Este margen de seguridad es de gran utilidad cuando los cables deben pasar por zonas cercanas a elementos que generan interferencias eléctricas: motores, transformadores, reguladores, equipos de comunicación... Estos elementos, unidos a la longitud del cable pueden hacer disminuir la señal hasta en voltios, sin que se afecte adversamente al nivel lógico de la entrada.

Si aumentamos la velocidad de transmisión, las señales de datos se vuelven susceptibles a pérdidas de voltaje causadas por la capacidad, resistencia e inductancia del cable. Estas pérdidas son conocidas como efectos de alta frecuencia, y aumentan con la longitud del cable. El ancho de la zona de transición (-3V a +3V en la entrada) determina el margen de ruidos, que limita directamente la velocidad máxima

a la que se pueden transmitir datos sin degradación. Entre dos equipos RS-232 esta velocidad es de 19200 bits por segundo, para longitudes de cable inferiores a 15 metros, pero disminuyendo la velocidad pueden utilizarse longitudes mayores de cable.

Puede ser necesario que el sistema que transmite datos necesite conocer el estado del sistema que los recibe, es decir si puede recibir datos o no. Para este propósito existe el control interactivo de dispositivos, conocido también como acoplamiento (handshaking). El acoplamiento es el modo en que se regula y controla el flujo de datos a través de la conexión.

El acoplamiento por software existe cuando un dispositivo controla al otro por medio del contenido de los datos. Por ejemplo, si debemos mandar información a otro elemento podemos incluir caracteres de control al inicio y final de la comunicación, para indicar la longitud del mensaje y un chequeo de todo el conjunto de datos enviados.

Con el acoplamiento por hardware se trabaja a un nivel más fundamental, electrónico. Un dispositivo puede regular el flujo de datos simplemente cambiando el voltaje de un cable. La incorporación de este acoplamiento hace necesaria la adición de un hilo para transportar la señal.

Teniendo en cuenta que para cada señal transmitida puede ser necesario un mínimo de un acoplamiento, y que los dispositivos pueden transmitir y recibir, podemos observar que serán necesarios más de los tres circuitos básicos antes mencionados (común, entrada y salida).

Los nombres dados en el modelo oficial RS-232-C para las señales de datos y acoplamiento, así como su asignación a las diferentes patillas (pines) del conector, aparecen en la tabla 3.7.

Pin DB 25	Pin DB 9	Nombre	Función
2	3	TXD	Transmisión de datos (salida)
3	2	RXD	Recepción de datos (entrada)
4	7	RTS	Peticion de envío (salida)
5	8	CTS	Dispuesto para enviar (entrada)
6	6	DSR	Dispositivo de datos listo (entrada)
7	5	COMÚN	Común (referencia)
8	1	DCD	Detección de portadora de datos (entrada)
20	4	DTR	Terminal de datos listo (salida)
22	9	RI	Indicador de llamada (entrada)

Tabla 3.7. Disposición de los pines en un dispositivo RS-232-C DTE.

Podemos observar que pueden llegar a ser necesarios un total de nueve cables:

- 1 para enviar datos (TXD).
- 1 para recibir datos (RXD).
- 1 común a todos los circuitos.
- 4 señales de acoplamiento para poder enviar datos (CTS, DSR, DCD, RI).
- 2 señales de acoplamiento para poder recibir datos (RTS, DTR).

Algunas de las señales (DCD, RI) provienen de características necesarias para poder detectar el estado de un módem, pero no suelen ser necesarias para aplicaciones normales.

Por ejemplo, para conectar dos ordenadores personales (dispositivos DTE) con señales de acoplamiento, sería necesario efectuar las conexiones descritas en la figura 3.11. En estos esquemas, la dirección de las flechas indica realmente el sentido en que se mueve la información, es decir, el emisor y el receptor de la señal.

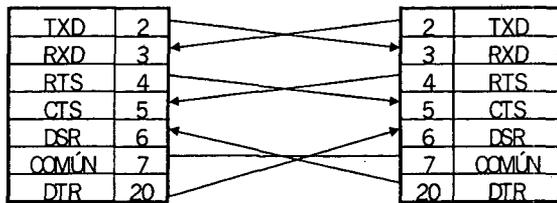


Fig. 3.11. Conexión estándar entre dos equipos RS-232-C DTE

En el caso de no desear utilizar estas señales de acoplamiento, puede optarse por proporcionarlas por un medio físico, pues algunos programas de comunicación pueden requerir su presencia. Un posible esquema para esta conexión, puede ser el indicado en la figura 3.12. Se trata de un esquema más sencillo, pero puede funcionar en una gran parte de equipos, siempre que no se desee trabajar al límite de la capacidad de los dispositivos.

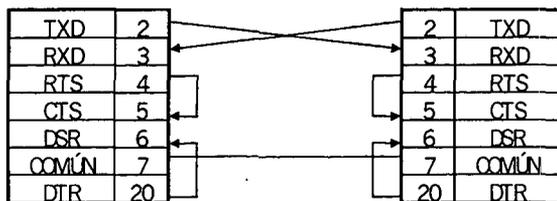


Fig. 3.12. Conexión entre dos equipos RS-232-C DTE sin utilizar acoplamientos

Con lo expuesto hasta el momento es posible realizar la conexión física entre la mayor parte de

dispositivos RS-232-C, aunque en ocasiones existen algunas excepciones y particularidades que impiden la correcta conexión. En estos casos es necesario un estudio detallado de las características de los dos dispositivos, para encontrar una solución particular a los problemas encontrados.

Es conveniente remarcar que la comunicación RS-232-C fue originalmente diseñada para establecer una comunicación punto a punto, es decir, entre dos únicos elementos. Al ser solamente dos elementos era posible efectuar los acoplamientos necesarios. En el momento que eliminamos los acoplamientos por hardware, estamos abriendo la posibilidad a conectar varios equipos simultáneamente al mismo canal RS-232-C. En este caso tendremos que utilizar algún tipo de acoplamiento por software, que indique con cual elemento estamos comunicando, sin que intervengan los restantes.

Una última cuestión a resolver son los programas necesarios para transferir los datos entre los dispositivos. Este ya no es un problema asimilable estrictamente a la conexión RS-232-C, sino a su modo de utilización, por lo que debe ser tratado como un problema aparte.

3.7.2.2 RS-422-A

La conexión RS-232-C suele ser suficiente para la conexión de equipos cercanos, o que no están sujetos a importantes interferencias electromagnéticas. En otras ocasiones la presencia de motores, generadores o las largas distancias a las que se encuentran los dispositivos (por ejemplo en ambientes industriales), resta eficacia a la transmisión de datos por esa conexión. Para estas situaciones la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas) desarrolló y formuló en 1975 otro estándar de transmisión de datos más robusto, el RS-422-A.

El modo de aumentar la eficacia de transmisión se consigue utilizando circuitos balanceados, es decir, no utiliza un único hilo para transmitir cambiando la polaridad con referencia a un circuito común, sino que utiliza dos hilos para cada señal. Las condiciones de 0 y 1 lógico son determinadas por cambios en la polaridad de los dos hilos, por referencia del uno con el otro.

Este cambio del sistema permite un incremento notable de las prestaciones; utilizando cable trenzado apantallado es posible alcanzar distancias de 1200 metros y velocidades de transmisión cercanas a 1 megabit por segundo (1Mbps).

Pero con este modelo de comunicación prácticamente se duplica el número de conexiones necesarias, entre señales de datos y de acoplamiento.

Al igual que en el caso del RS-232-C, si no queremos utilizarlas, podemos optar por proporcionarlas por un medio físico, conectando las salidas de acoplamiento con las entradas del mismo dispositivo.

El paso siguiente a la conexión de las señales de acoplamiento entre ellas es su eliminación, cosa que sucede en buena parte de los dispositivos RS-422 comercializados. En alguno de ellos podemos observar que sólo utilizan uno de los acoplamientos posibles: RTS/CTS o DTR/DSR. En otros únicamente se mantienen los pares de cables de transmisión y recepción. Esta tendencia hacia la simplificación, unida a la limitación del estándar del sistema RS-422, al estar pensada únicamente para establecer una conexión punto a punto, hizo buscar nuevos diseños que aumentaran sus posibilidades.

3.7.2.3 RS-485

La Recomendación Estándar RS-485 del EIA es la única que permite que múltiples nodos se comuniquen bidireccionalmente sobre un único par de cables. Ningún otro estándar combina esta capacidad con un equivalente rechazo de ruido, tasa de datos, longitud de cable y, en general, robustez. Por esta razón se usa RS-485 para las más variadas aplicaciones. La amplia aceptación del estándar es el resultado de su enfoque genérico, que únicamente determina los parámetros eléctricos de la interfaz. RS-485 no especifica un conector, cable o protocolo a utilizar. Los estándares de más alto nivel como SCSI imponen estos parámetros y hacen referencia para las especificaciones eléctricas al RS-485.

La EIA confeccionó el estándar RS-485 en 1983. La Asociación de Industrias de Telecomunicación (TIA) es la actual responsable de las actualizaciones. Actualmente RS-485 está siendo revisado, revisión que dará como resultado el futuro ANSI TIA/EIA-485-A.

El incremento en el uso de líneas de transmisión de datos para la distribución de datos entre varios elementos centrales y periféricos sobre líneas relativamente largas trajo la necesidad de combinar múltiples drivers y/o receivers en un único par trenzado. En su forma más simple, RS-485 es un bus diferencial, half-duplex y bidireccional que consta de un transceiver (driver y receiver) localizado en cada extremo de un cable de par trenzado. Los datos pueden fluir en ambas direcciones pero en un solo sentido cada vez. Por otra parte, un bus full-duplex soporta el flujo simultáneo de datos en ambas direcciones. Aunque RS-485 soporta transferencias de datos bidireccionales no se trata de un bus full-duplex y para la transferencia bidireccional simultánea se requieren dos pares de cables de datos.

El modelo EIA-RS-485 permite características no previstas en el estándar RS-422. Mantiene ventajas del RS-422, al permitir velocidades de transmisión cercanas a 1 megabit por segundo, así como longitudes de la línea de hasta 1200 metros. Además permite el alargamiento de la red en otros 1200 metros al insertar un repetidor RS-485 en la línea.

También tiene otra característica muy importante en ambientes industriales, puede soportar hasta 32 nodos (equipos emisores/receptores) conectados por cada segmento de red. Estos distintivos lo hacen muy adecuado para el trabajo que fue diseñado, aplicaciones industriales.

Dentro del estándar RS-485 existen diferentes variantes, una de las cuales es la conocida como 4D-RS-485. En este caso se mantienen por separado los pares de cables de recepción y conexión. Las únicas señales que son necesarias para transmitir se muestran en la tabla 3.8.

Nombre	Función
TXD (+)	Transmisión de datos (salida +)
TXD (-)	Transmisión de datos (salida -)
RXD (+)	Recepción de datos (entrada +)
RXD (-)	Recepción de datos (entrada -)
TIERRA	Tierra

Tabla 3.8. Señales utilizadas en la conexión 4D-RS-485

De este modo el sistema de conexión queda simplificado respecto al RS-422, además de permitir la presencia de más de dos equipos, como se describe en la figura 3.13.

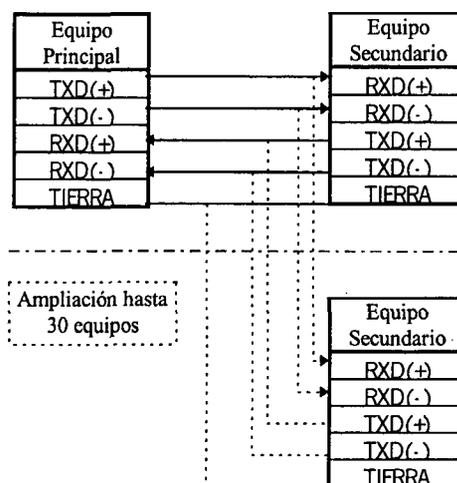


Fig. 3.13. Conexión entre equipos 4D-RS-485

El siguiente paso en simplificación es el estándar 2D-RS-485, el más comúnmente conocido por estándar RS-485. En este caso se elimina uno de los pares transmisión/recepción. Se utiliza una sola línea

de transmisión balanceada bidireccional. Las características físicas de la línea se mantienen (longitud y velocidades de transmisión admisibles). La diferencia con el anterior es que los dispositivos deben conmutar entre modo receptor y modo transmisor, para evitar que varios dispositivos emitan simultáneamente.

Las señales necesarias en este caso son las mostradas en la tabla 3.9.

Nombre	Función
TXD / RXD (+)	Transmisión de datos (salida +)
TXD / RXD (-)	Transmisión de datos (salida -)
TIERRA	Tierra

Tabla 3.9. Señales utilizadas en la conexión 2D-RS-485

El esquema de interconexión entre equipos debería establecerse como muestra la figura número 3.14.

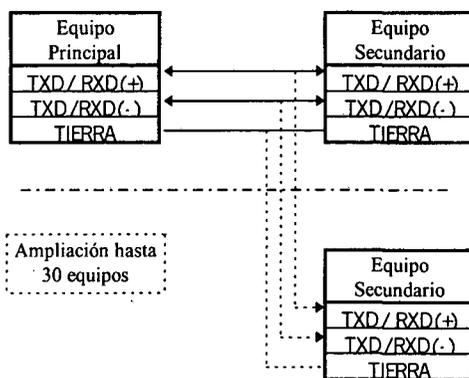


Fig. 3.14. Conexión entre equipos 2D-RS-485.

En ambos modos RS-485 la tierra es opcional, debería utilizarse en conexiones donde puedan existir interferencias.

Comparación del modo de comunicación RS-422 / 4D-RS-485 / 2D-RS-485

Con el protocolo RS-422, cualquiera de los dos puntos puede iniciar una comunicación, pues las líneas de enviar/recibir están separadas.

Con el modelo 4D-RS-485, no puede mantenerse

esta característica, pues existen hasta 32 equipos diferentes conectados, que no pueden ocupar la línea de envío simultáneamente. En este caso, el equipo principal (master), puede mandar datos en cualquier momento, mientras que los equipos secundarios (slaves), únicamente deben responder cuando el mensaje va dirigido a ellos.

Por último, en el modelo 2D-RS-485, los equipos deben estar siempre en modo receptor, excepto en el momento que deban transmitir, que pasan a modo de envío. El equipo principal debe cambiar a modo de envío cuando mande datos a un equipo secundario. Una vez finalizados el envío de datos, el principal pasará a modo recepción y esperará a que el equipo secundario le devuelva la respuesta a su mensaje.

3.7.2.4 CONVERSIÓN RS-232-C / RS-485

Las ventajas del estándar de conexión RS-485 son evidentes respecto al RS-232C. El mayor problema en su implementación general es el precio. Este es el motivo por el que se sigue manteniendo generalmente el estándar RS-232-C en la fabricación de ordenadores personales.

En el caso de desear utilizar un ordenador personal como elemento principal de la red, es muy común encontrarse con el problema de la conversión entre los dos estándares. Si estamos en un ambiente de laboratorio puede ser suficiente con utilizar una placa de comunicación que se pueda configurar como un puerto estándar de PC. En el caso de encontrarnos en la industria, estos elementos suelen ser poco resistentes a interferencias o sobrecargas provocadas por la proximidad de elementos eléctricos.

La solución para estos casos es la utilización de un convertidor optoaislado (aislado de corrientes externas mediante un sistema basado en diodos), que transforma la señal generada por el RS-232-C a RS-485, aislando totalmente las dos redes y con la posibilidad de soportar sobrecargas inducidas superiores a los 500 voltios.

Las señales necesarias para conectar el ordenador al convertidor y el convertidor al resto de elementos de la red suelen ser las especificadas en la figura 3.15.

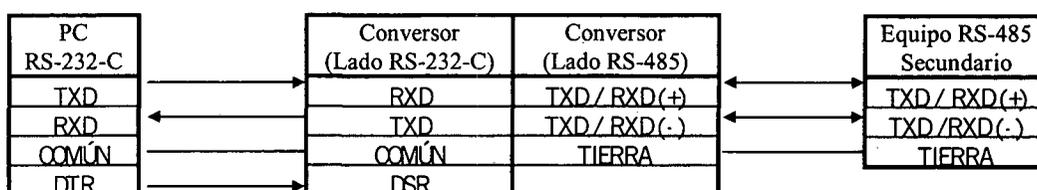


Fig. 3.15. Conexión entre un PC y un dispositivo RS-485 utilizando un convertidor

La señal DTR/DSR entre el ordenador y el conversor es utilizada por el elemento principal (en este caso el PC) para indicar al conversor que cambie de modo receptor a emisor. Como se ha comentado anteriormente, en el modelo 2D-RS-485, los equipos deben estar siempre en modo receptor, excepto en el momento que deban transmitir, que pasan a modo de envío. La forma que tiene el equipo principal de indicar este cambio de recepción a envío es mediante esa señal de acoplamiento DTR/DSR. En otros conversores se utiliza otra señal de acoplamiento, como RTS/CTS, aunque la función es la misma.

3.7.2.5 RED LOCAL. ETHERNET

En sistemas donde se transmiten grandes cantidades de información, los sistemas de comunicación anteriores presentan desventajas. Es necesario un sistema que permita el requerimiento de información y la respuesta a la orden en cualquier momento y a velocidad elevada. Las redes locales se desarrollaron para cumplir esos objetivos.

Existen varios modelos de redes locales, cuyas características están definidas por su topología y arquitectura.

La topología de la red se define como la configuración geométrica resultante de la interconexión de los distintos elementos que la conforman. Su diseño tiene principalmente en cuenta los siguientes factores:

- Seguridad de la red ante el fallo de cualquier estación conectada (fiabilidad).
- Facilidad para añadir o eliminar estaciones (ordenadores conectados a la red).
- Flujo de información sin interferencias.
- Reducción de los tiempos de espera.
- Cumplir todos los requisitos anteriores de la manera más económica posible.

La topología de red implementada en el departamento es la conocida como Topología de Red en Bus. En ella existe un único canal de comunicación, denominado bus, al que están conectadas todas las estaciones. Este canal está formado físicamente por un cable coaxial.

Este tipo de Topología de Red en Bus tiene unas características especiales:

- Son fáciles de instalar, expandir y reconfigurar. Permiten introducir una nueva estación o cambiarla de lugar sin afectar al resto de la red.
- Los fallos en el bus pueden ser difíciles de localizar, pero no de reparar.
- Las transmisiones se efectúan cuando el bus está libre, las estaciones deben tener elementos dedicados a detectar que el canal está libre.

- La longitud máxima de la red está limitada a 500 metros, aunque con la ayuda de repetidores puede aumentarse hasta los 2500 metros.
- El sistema tiene una buena respuesta cuando existe poco tráfico en el bus. La existencia de colisiones en la transmisión puede afectar a su eficiencia.

La arquitectura de la red local que utilizamos es Ethernet. La velocidad de transmisión en una red Ethernet es cercana a los 10 megabits por segundo, por lo que necesita 100 nanosegundos para enviar un bit. Las señales eléctricas se propagan por el cable coaxial aproximadamente a la mitad de la velocidad de la luz. En consecuencia, un bit puede propagarse por un segmento de red de 500 metros en el orden de microsegundos.

El sistema Ethernet fue desarrollado por Xerox a comienzos de los años setenta, y utiliza como protocolo de acceso a red el CSMA/CD (Acceso múltiple por detección de portadora con detección de colisión). El control de la red Ethernet es distribuido, no existe ningún nodo o estación que regule el acceso a la red, dicho control debe efectuarse por las propias estaciones.

Cuando una estación desea transmitir información a otra estación, en primer lugar escucha el canal de comunicación para comprobar si está ocupado. Si no lo está, transmite inmediatamente. Si dos estaciones intentan transmitir simultáneamente se produce una colisión. En este caso, ambas estaciones interrumpen su emisión, esperando un intervalo de tiempo aleatorio para comenzar de nuevo el proceso.

Cada mensaje enviado lleva la dirección de la estación receptora. El mensaje llega a todas las estaciones conectadas al bus, pero sólo debe ser aceptado por aquella a la que va dirigido. Toda estación debe disponer de los medios necesarios para poder reconocer en cada mensaje la dirección a la que va dirigido.

El formato utilizado para la transmisión de información entre dos estaciones se denomina trama. El esquema de los elementos que forman la trama se muestra en la tabla 3.10.

Tamaño en bytes	Campo
8	Sincronización relojes emisor-
1	inicio de trama
2 - 6	dirección emisor y destinatario
2	longitud del campo de datos
0 - 1500	datos
0 - 64	relleno de trama
4	código de redundancia de la trama

Tabla 3.10. Esquema de los elementos de la trama

Este formato de la trama es el modo en que se organiza la información físicamente para viajar dentro de una red ethernet. Si se desea intercambiar información entre estaciones pertenecientes a diferentes redes, es necesario un tipo diferente de organización de los datos, que no esté limitado al acceso a las estaciones físicamente unidas por el mismo bus.

Para ese propósito se desarrollaron los protocolos TCP e IP.

TCP / IP

Es un conjunto de protocolos desarrollados para permitir a los ordenadores compartir recursos de una red. Fue desarrollado alrededor de ARPAnet, sistema creado en 1969 por la Agencia de la Defensa para Proyectos de Investigación Avanzada (DARPA) de los Estados Unidos [Cerf, 1991].

Internet (INTERconnected NETworks) es un conjunto de redes interconectadas, incluyendo Arpanet, redes regionales, redes locales, universidades, instituciones de investigación y redes militares. El término Internet se aplica al conjunto completo de redes. Todas las redes están interconectadas, los usuarios pueden comunicarse con cualquier otro, excepto si existen restricciones de seguridad. Los protocolos son estándares adoptados por Internet para su propio uso.

El protocolo IP (Protocolo Internet) define el tipo de reparto de paquetes (conjuntos de datos independientes) entre estaciones. Las tres principales funciones del protocolo son las siguientes:

- Definición del datagrama, unidad básica de transferencia de datos.
- Efectuar el enrutamiento de los datagramas entre dos nodos.
- Incluir las reglas necesarias para indicar a las estaciones y las pasarelas (routers) el modo de procesar los paquetes, como y cuando generar mensajes de error y las condiciones para descartar los paquetes.

Dentro del datagrama se incluye información sobre el tipo de servicio, prioridad de la transmisión, dirección de origen IP, dirección de destino IP, opciones del datagrama y por último los datos a transmitir.

Para transmitir el datagrama entre dos estaciones es necesario efectuar el proceso de encapsulado. Este proceso consiste en introducir el datagrama dentro del campo de datos de la trama física. Si el datagrama es de mayor tamaño que el campo de

datos, es necesario su fragmentación y posterior reensamblaje para formar el datagrama original.

Si el datagrama a transmitir es entre dos nodos no conectados físicamente al mismo bus, el datagrama encapsulado en la trama debe ser tratado por un elemento de la red llamado pasarela (router). La pasarela se encarga de extraer el datagrama de la trama, comprobar que esa dirección no pertenece a la misma red, volver a encapsularlo y enviarlo externamente para llegar a su destino. Las pasarelas tienen una tabla con las correspondencias entre direcciones IP y direcciones físicas de las estaciones externas donde enviar los datagramas. El proceso de enrutamiento se realiza hasta conseguir la conexión.

El protocolo TCP (Transfer Control Protocol) establece el formato de los datos, el tipo de confirmación que las estaciones intercambian y los procedimientos que utilizan las máquinas para asegurarse que los datos han sido recibidos correctamente.

Reside sobre el protocolo IP y considera la conexión como un circuito virtual entre dos aplicaciones. Los programas de aplicación son considerados como puntos finales (endpoints), cada uno de ellos definido mediante un entero de cuatro bytes (long int) y un entero de dos bytes (short int). Estos dos enteros corresponden a la dirección IP y al puerto utilizado (host, port). La dirección IP especifica la localización de un ordenador y el puerto especifica uno de los más de 30000 posibles canales de comunicación previstos para cada ordenador en la implementación del protocolo.

Una conexión TCP/IP ejemplo puede ser la siguiente:

158.109.13.66, 3201 \leftrightarrow 158.109.13.2, 32323

La conexión puede ser descrita del siguiente modo: Una aplicación de la estación 158.109.13.66 ha establecido una conexión mediante el puerto TCP 3201 con otra aplicación que utiliza el puerto TCP 32323 de la estación 158.109.13.2

El protocolo TCP requiere que los dos puntos finales estén de acuerdo en establecer una conexión antes de comenzar el intercambio de datos. Para conseguir este propósito, el punto de destino de la comunicación debe efectuar una apertura pasiva, indicando que aceptará la conexión por un puerto determinado. El punto origen de la comunicación debe efectuar una apertura activa en el momento que desea establecer la conexión. Una vez establecida la conexión, ya puede comenzar la transmisión de datos.

3.8 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

3.8.1 PLC (LENGUAJE CLIPCAT)

Las características técnicas del PLC utilizado aparecen en la tabla 3.11.

Elementos del PLC	Numeración interna
8 salidas relé	Q0 - Q7
16 salidas 24 V	Q10 - Q27
8 entradas 220 V	I0 - I7
8 entradas 24 V	I10 - I17
240 relés internos	M0 - M297
16 relés internos especiales	M300 - M317
80 temporizadores	T0 - T79
45 contadores	C0 - C44

Tabla 3.11. Características técnicas del PLC IZUMI FA-2J

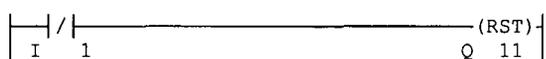
La programación del PLC se efectúa mediante la creación de un diagrama de relés en un programa llamado CLIP (Control Logic Input Program), el cual transforma el diagrama en código máquina que puede ser transferido al PLC [IDECA, 1992].

Realizando interconexión entre estos dispositivos es posible efectuar un control encendido/apagado en función de la detección de algunas señales de encendido o apagado de los equipos. Cuando surgieron los microprocesadores, los incómodos cuadros de relés fueron substituidos por relés imaginarios de programa en la memoria del microprocesador, "relés internos". Esto permitió la mejora de la programación y de la fiabilidad de los cuadros de relés. Para entender la programación de los diagramas de relés es conveniente recordar cuál es su origen, del que se deriva toda la nomenclatura utilizada.

A continuación se muestran unos ejemplos de las instrucciones básicas utilizadas en la programación de los diagramas lógicos para la planta piloto, con la lectura correspondiente.



Si la entrada I 1 está encendida, la salida Q 10 se encenderá.



Si la entrada I 1 está apagada, la salida Q 11 se apagará.

La programación con diagramas de relés proviene de la antigua automática, cuando no existían microprocesadores. La automatización de ciertos procesos podía generarse utilizando cuadros de relés interconectados.

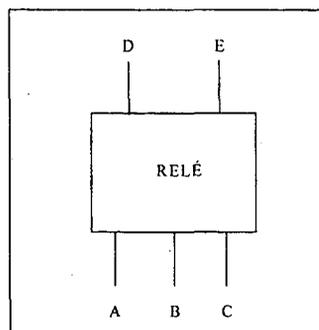


Fig. 3.16. Esquema eléctrico de un relé

Un relé es un dispositivo eléctrico que permite la conmutación entre dos circuitos diferentes, en función de si tiene alimentación eléctrica o no. Tal como puede observarse en la figura 3.16, en el caso de que entre los extremos D y E exista una corriente eléctrica, el circuito BC quedará cerrado y el AB abierto. Si desaparece la corriente, el circuito AB quedará cerrado y el BC abierto. Esto permite elegir una acción (cerrar el circuito AB o BC) en función de si existe señal eléctrica o no en DE.



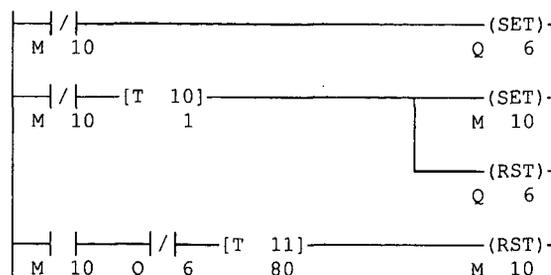
Si la entrada I 1 o I 2 está encendida, la salida Q 10 se encenderá (OR lógico).



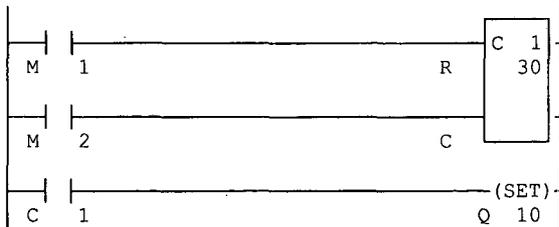
Si las entradas I 1 y I 2 están encendidas, la salida Q 10 se encenderá (AND lógico).



Si la entrada I 1 está encendida y la I 2 apagada, la salida Q 10 se apagará (AND lógico).



Temporizador. Cuando el relé interno M 10 esté apagado, encenderá la salida Q 6. En la instrucción siguiente, cuando el relé interno M10 esté apagado esperará 1 intervalo de 100 milisegundos, encenderá el relé interno M 10 y apagará la salida Q6. Por último, cuando el relé interno M 10 esté encendido y la salida Q 6 apagada, esperará 80 intervalos de tiempo de 100 milisegundos (8 segundos en total) y apagará el relé interno M 10. Con un diagrama de este tipo conseguimos que la salida Q6 se encienda cada 8 segundos durante 100 milisegundos.



Contador. Con este esquema, cada vez que se encienda el relé interno M 2 el contador C 1 añadirá una unidad. Cuando llegue a 30 unidades activará C 1 y se encenderá la salida Q 10. Si se enciende el relé interno M1, el contador hará una reinicialización (“reset”) y se pondrá a cero.

La elaboración de un programa para el PLC consiste en escribir un conjunto de diagramas sobre la base de las anteriores instrucciones. La capacidad del PLC viene determinada por el módulo de memoria EPROM disponible, con capacidad de programa de 1024 pasos.

El procedimiento que tiene el PLC para ejecutar un programa es efectuar secuencias de exploración de todas de las entradas y salidas utilizadas en intervalos de milisegundos. En función de los valores leídos de esas variables en cada periodo de exploración, va efectuando las acciones especificadas en las líneas de programa.

3.8.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C

Los precedentes más importantes del lenguaje C fueron los siguientes:

- UNIX desarrolló en 1969 el lenguaje ensamblador (lenguaje muy cercano al código máquina, las instrucciones básicas que entiende el procesador) DEC PDP-7.
- Utilizando ese lenguaje ensamblador, se desarrolló el BCPL, un potente sistema operativo con importantes utilidades de desarrollo.

- En 1970 se desarrolló un nuevo lenguaje, el “B”, ya que programar en el lenguaje ensamblador era largo y muy sujeto a errores.
- En 1971 se creó otro lenguaje totalmente nuevo, el “C”.
- En 1973 se desarrolló el sistema operativo UNIX, casi totalmente escrito en “C”.

Inicialmente, el estándar de la programación en C fue un conjunto de normas establecidas por Brian Kernighan [Kernighan, 1988]. Para hacer el lenguaje más internacionalmente aceptable, fue desarrollado en 1983 un estándar internacional, ANSI C (American National Standards Institute). En él se formalizan las construcciones como estructuras y enumeraciones, se establece una nueva forma de declaración de funciones y se especifica la biblioteca estándar con las funciones básicas del lenguaje.

Características técnicas

Las construcciones fundamentales de control de flujo en los programas en C son las siguientes:

- Forma de agrupación de las proposiciones.
- Toma de decisiones (if - else).
- Selección de un caso entre un conjunto (switch).
- Iteración con condición de paro al principio (while, for) o al final (do).
- Terminación prematura de ciclos (break).

Entre las ventajas principales del lenguaje C se encuentra la posibilidad de generar códigos fuente de pequeño tamaño, basándose en las características siguientes:

- Pueden hacerse uso extensivo de las llamadas a funciones, incluso llamadas recursivas, de una función a si misma.
- El formato para escribir código fuente es muy poco rígido.
- Se trata de un lenguaje estructurado.
- Puede programarse a bajo nivel.
- Tiene implementado el uso de punteros (direccionadores) para memoria, estructuras y funciones.

El lenguaje C se ha convertido en un lenguaje muy utilizado profesionalmente por varias razones:

- Permite la utilización de muchos tipos de variables, incluso la definición de nuevos tipos.
- Tiene construcciones de alto nivel.
- Puede manejar actividades de bajo nivel.
- Produce programas eficientes.
- El código programado puede ser compilado en muchos tipos de ordenadores, genera código portable.

Su mayor desventaja es que tiene una pobre detección de errores de programación, que puede complicar al principiante. El compilador que transforma el código fuente a ejecutable, sólo comprueba la corrección de la sintaxis de las instrucciones, no si su ejecución puede provocar algún problema o inestabilidad al sistema. Aquí viene la potencia y la debilidad del lenguaje C: permite trabajar a bajo nivel, lo que aumenta su capacidad, pero simultáneamente le vuelve más vulnerable a los errores de programación.

3.8.3 G2

G2 es una herramienta de Gensym Co. para el desarrollo de sistemas expertos en tiempo real, en aplicaciones complejas que requieren un gran seguimiento, diagnóstico o control inteligente [Gensym, 1995a]. Esta herramienta de desarrollo ha sido validada en un número importante de aplicaciones reales industriales. Ejemplos de su utilización están descritos en la bibliografía [Thompson, 1993; Szafnicki, 1996, 1998].

Entre las aplicaciones que pueden realizarse en G2, destacan la monitorización en tiempo real, detección de fallos, diagnóstico y control, planificación en tiempo real, optimización de procesos, entrenamiento del operador mediante simulación y rediseño de sistemas.

G2 es un sistema en tiempo real, puede trabajar con el tiempo y el tiempo está incluido en su diseño. Los valores pueden tener hora de adquisición e intervalos de validez, puede razonar sobre históricos/tendencias/patrones de datos en el tiempo. También posee funciones para el tratamiento del tiempo. G2 está construido para responder a eventos en tiempo real y para realizar aplicaciones eficientes con el tiempo.

G2 es un entorno de desarrollo orientado a objeto. Incluye utilidades para definir clases de objetos y métodos para implementar el comportamiento de clases. También se puede implementar herencia mediante una jerarquía de clases y usar relaciones y conexiones asociadas a objetos.

G2 soporta reglas (conocimiento heurístico) y una amplia variedad de estrategias de inferencia (camino para aplicar esas reglas):

- 'Forward Chaining' / razonamiento dirigido por datos o sucesos. Las reglas responden a nuevos datos o nuevos eventos; obteniendo conclusiones o iniciando otras actividades.
- 'Backward Chaining' / razonamiento dirigido por objetivos. Las reglas buscan evidencias para confirmar conclusiones.

- También puede explorar en áreas clave, y centrarse en problemas potenciales.

Dispone de un lenguaje, parecido a Pascal, para programar procedimientos en tiempo real. Se pueden realizar bucles, ramificaciones y esperas. Los procedimientos pueden ejecutarse simultáneamente, incluso copias del mismo procedimiento.

G2 dispone de una interfaz de desarrollo con utilidades como 'Inspect' y 'Describe', editor de texto con gramática guiada, editor de iconos y una utilidad de depuración de aplicaciones.

G2 permite la organización de un SE en Bases de Conocimiento (BC), un lugar donde se reúne y organiza un conjunto de conocimiento acerca de entidades reales o virtuales. Una BC puede contener una o más hojas de trabajo (workspaces), las páginas en blanco 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.

La representación del conocimiento en G2 se mantiene y extiende mediante clases. Las clases tienen atributos, que definen las propiedades de la clase heredadas y definidas localmente. G2 mantiene los atributos de las clases dentro de tablas de atributos. Cada objeto es una instancia de una clase, que se define mediante una definición de objeto.

La interfaz de usuario gráfica dispone de menús, botones, gráficas y otros elementos para mostrar datos. Los sistemas desarrollados pueden aportar información y responder a las preguntas de los usuarios.

Las aplicaciones desarrolladas en G2 son fácilmente portables, pueden ejecutarse en diferentes sistemas operativos: UNIX, VAX VMS, Windows NT. Los programas son guardados como ficheros ASCII, por lo que la transferencia entre ordenadores es sencilla. Por último, la apariencia de G2 y de sus aplicaciones son iguales en todos los sistemas operativos

G2 está desarrollado para la comunicación con otros sistemas. Puede comunicarse con sistemas externos mediante la herramienta de desarrollo GSI, pueden realizarse aplicaciones distribuidas mediante el uso de Telewindows y puede comunicarse con otros sistemas desarrollados con G2 muy fácilmente.

Para la comunicación del sistema experto con aplicaciones externas, es necesario utilizar la interfaz GSI (Gensym Standard Interface) [Gensym 1992, 1995b]. Esta es una aplicación que permite el desarrollo de programas para la comunicación del

sistema experto con otras aplicaciones ejecutándose en el mismo ordenador.

GSI establece el nombre de una serie de funciones que serán llamadas por el sistema experto cuando necesite efectuar alguna de las siguientes acciones:

- Conocer el puerto TCP/IP utilizado para la comunicación entre G2 y GSI.
- Inicializar el sistema externo.
- Definición o actualización de un objeto G2.
- Obtener valores de variables externas.
- Establecer valores para variables externas.
- Controlar al sistema externo para que comience a adquirir datos o que deje de tomarlos.
- Recibir mensajes de sistemas externos.
- Enviar mensajes a sistemas externos.
- Aceptar datos no requeridos por G2 pero enviados por la aplicación externa.
- Registro de funciones externas que pueden ser ejecutadas desde G2.

GSI únicamente establece el nombre de esas funciones y el formato de los datos a devolver. Para la comunicación con un sistema externo será necesario el desarrollo de cada una de esas funciones.

Pero ese no es el único esfuerzo necesario. Como se ha comentado anteriormente, GSI permite la comunicación del sistema experto con otras aplicaciones ejecutándose en el mismo ordenador. Es importante remarcar este hecho, pues este no es el caso habitual. Además de las funciones GSI, debe diseñarse un sistema capaz de obtener los datos de un ordenador externo y posteriormente dejarlos a disposición de esas funciones. Para implementar este diseño óptimamente debe trabajarse en un sistema multiproceso, como se comenta en la descripción del sistema operativo UNIX (apartado 3.9.2).

En el diseño del sistema de adquisición de datos externos, también debe considerarse la forma en que G2 puede efectuar peticiones. El sistema experto desarrollado sobre G2 puede necesitar un valor determinado en cualquier momento. El sistema de adquisición debe tener disponibilidad de los datos en todo momento, para evitar retrasos en proporcionar los datos pedidos por G2, lo que podría ralentizar al sistema experto. El concepto clave a cumplir en este sistema es el Tiempo Real, el sistema experto implementado sobre G2 debe ser capaz de responder a los acontecimientos cuando éstos tienen lugar.

3.8.4 HTML Y PERL

HTML es el estándar de Internet para la transmisión de textos con formato. Inicialmente se utilizaba la red Internet para la transmisión de datos a través de

servidores FTP o a través de correo electrónico, sin ninguna clase de formato específico, ya que estaba proyectada para investigación científica y militar. En 1989, se introdujo el primer estándar HTML ante la necesidad de incorporar un formato gráfico tanto a la transferencia como al acceso a los datos, surgiendo las actuales páginas Web, gracias a las cuales Internet se comercializó y empezó a adquirir un carácter más general, aumentando exponencialmente en número de usuarios.

El HTML (HyperText Mark-up Language), lenguaje de marcas de hipertexto, es un sencillo sistema de marcas que, insertadas en un texto, permiten el enlace de determinados elementos del mismo con sonidos, gráficos, con otras zonas del documento, con otros documentos dentro del servidor y con otros servidores WWW. La flexibilidad que permite es tal, que sus características pueden aprovecharse para generar documentos multimedia, incluso si no se utilizan en un servidor Web.

Se le llama hipertexto al conjunto de palabras, enlaces a otras páginas (o a la misma), a ficheros, a servicios de correo electrónico, etc. que se encuentran en una página Web.

El paso de unos elementos a otros se realiza gracias a una serie de zonas activas dentro del texto, que son las puertas de acceso al material al que se refiere. El HTML es un lenguaje que permite definir cuáles son esas zonas, cómo son y qué características tienen, para crear así las llamadas páginas Web. Estas, puestas en un servidor, serán requeridas por los programas de lectura de páginas, que además interpretan los mandatos contenidos en el texto y lo muestran en pantalla.

El estándar HTML ha ido evolucionando con el paso del tiempo en diferentes versiones, desde la 1.0, hasta la más novedosa, la 4.0. A medida que han ido surgiendo, se han introducido nuevos comandos o marcas que ayudan a ordenar de manera más óptima el texto y cualquier elemento para su visualización (tablas), que proveen de una mayor interactividad con el usuario (formularios), o que facilitan la navegación por grandes sistemas Web ("frames"). Todas estas mejoras, además de las hojas de estilo y la inclusión en una Web de casi cualquier cosa, con Java, CGI, sonidos, imágenes complejas y vídeo a través de programas auxiliares ("plug-ins") que desempeñan esta función, están llegando a convertir el HTML en un lenguaje que, utilizándolo correctamente, puede conseguir grandes resultados con unas cuantas marcas sencillas.

En las páginas Web desarrolladas se utilizan llamadas a programas escritos en lenguaje PERL. Estos programas permiten el envío de datos de formularios mediante correo electrónico al sistema experto.

PERL

PERL (Practical Extraction and Report Language, Lenguaje Práctico de Extracción e Informes) es un lenguaje interpretado optimizado para la exploración arbitraria de archivos de texto, la extracción de información de esos textos y la impresión de informes basados en ellos.

Es también un buen lenguaje para muchas tareas de administración de sistemas. El lenguaje está diseñado para ser práctico (fácil de usar, eficiente y completo) más que bonito (pequeño, elegante mínimo). Combina, en opinión del autor, algunas de las mejores características de C, sed, awk y sh, por

lo que personas familiarizadas con esos lenguajes deberían tener poca dificultad con él. La sintaxis es bastante cercana a C. PERL no limita arbitrariamente el tamaño utilizado de memoria si se dispone de suficiente, al contrario de la mayor parte de utilidades UNIX. Es capaz de tratar un fichero completo como una simple cadena de caracteres. También utiliza técnicas sofisticadas de reconocimiento de patrones para explorar grandes cantidades de datos rápidamente.

Los programas escritos en PERL son más seguros que en C, gracias a un mecanismo de trazado del flujo de datos que previene algunos problemas de seguridad.

3.9 SISTEMAS OPERATIVOS

Un sistema operativo es un programa que trabaja a bajo nivel y permite la utilización de elementos del hardware (el ordenador considerado físicamente) por otros programas. Sirve de enlace entre el ordenador y los programas que queremos utilizar. El sistema operativo se compone principalmente de un programa básico que se encarga de las tareas más comunes. Esta base del sistema es la que se carga en memoria del ordenador cuando lo encendemos. También existen una serie de complementos para permitir otras acciones, como por ejemplo copiar un archivo de un disquete a un disco duro, crear directorios en los que organizar los archivos, cambiar la configuración y las opciones del sistema, permitir el uso de dispositivos como el ratón...

Actualmente se dispone de diversos sistemas operativos, cada uno con sus características diferenciales. Un aumento de las prestaciones de un sistema operativo suele traer consigo un aumento de su complejidad. De este modo, es conveniente escoger un sistema que se adapte a nuestras necesidades actuales o posibles en un futuro cercano. No es necesaria la máxima complejidad para obtener las máximas prestaciones, si después en la aplicación real no vamos a utilizarlas.

En nuestro caso hemos utilizado dos sistemas operativos diferentes para adecuarnos a los equipos que disponemos y las necesidades que requerimos: DOS y UNIX.

3.9.1 DOS

Los sistemas operativos más comúnmente utilizados son los que podemos encontrar en los ordenadores compatibles tipo PC. Estos ordenadores han utilizado generalmente sistemas operativos tipo DOS (Disk Operative System). Este sistema operativo se desarrolló para adecuarse a los ordenadores personales compatibles desarrollados por IBM. El sistema creado se adaptaba a las necesidades del momento, permitía aprovechar al máximo las características del ordenador: monitor, impresora, periféricos compatibles RS-232, unidades de almacenamiento... El modo de relación con el ordenador estaba basado en la utilización de órdenes introducidas mediante un teclado y respuestas del ordenador mediante caracteres por pantalla y/o impresora.

Posteriormente se han realizado mejoras en el sistema operativo, pero siempre con la premisa

fundamental de mantener la compatibilidad con las anteriores. Esta condición, que a priori es considerada adecuada, ha contribuido a mantener las limitaciones del sistema operativo inicial.

El DOS es un sistema operativo de 16 bits monoproceso. No permite ejecutar varios programas simultáneamente. Cuando el sistema operativo ejecuta un programa, pierde el control del ordenador, el programa ejecutado es el encargado de ello. El sistema operativo sólo recupera el control cuando el programa termina.

El aumento de la utilización de los ordenadores, su aumento de prestaciones y su disminución en el precio conllevaron un intento de hacer al ordenador más accesible a todos los usuarios potenciales. Basándose en el DOS se desarrolló una interfaz gráfica (Windows) que permitía una utilización más sencilla de las posibilidades del sistema operativo.

En sus primeras versiones, Windows era un sistema multitarea con bastantes limitaciones. Se podían ejecutar programas simultáneamente, pero lo que realmente sucedía es que Windows daba el control a los diferentes programas. El programa ejecutado en ese momento era el que devolvía el control una vez terminada la tarea que estaba efectuando. Este modo de multitarea era poco robusto y poco optimizado. La pérdida del control en un programa podía provocar la desestabilización de todo el sistema. En posteriores desarrollos (Windows 95, Windows 98, Windows NT) se ha mejorado el funcionamiento y cambiado el tipo de multitarea. Actualmente, Windows NT está empezando a introducirse en el campo del control, donde hasta ahora existía una amplia mayoría de equipos con sistemas operativos tipo UNIX.

Teniendo en cuenta las características anteriores, puede optarse por un sistema totalmente dedicado a ejecutar un sólo programa sobre el sistema operativo DOS, o utilizar un programa que funcione sobre Windows y que permita la utilización del ordenador para otras tareas. Si un objetivo importante es la robustez del sistema de control, puede ser aconsejable la utilización del sistema operativo más sencillo que tenga las características requeridas, en nuestro caso el DOS.

3.9.2 UNIX

Cuando se dispone de ordenadores potentes de los que se quiere utilizar todas sus características, es necesario disponer de un sistema operativo más completo que los comúnmente utilizados.

Un sistema operativo muy utilizado en estaciones de trabajo es el UNIX. Fue desarrollado inicialmente en

1973, y está casi totalmente escrito en el lenguaje de programación "C". Existen diversas versiones que permiten utilizarlo en ordenadores personales, estaciones de trabajo o grandes sistemas.

El UNIX es un sistema operativo con diferentes variantes, todas ellas de 32 bits y multitarea. Los programas ejecutados generan un conjunto de operaciones que son encomendadas al sistema operativo. Éste se encarga de administrar el tiempo de proceso adecuado a cada programa, es decir, el número de operaciones a efectuar de cada proceso en cada momento. En el diseño del programa pueden establecerse las prioridades de acceso a los subsistemas del ordenador, indicando al procesador central la jerarquía de ejecución y las condiciones en las que ejecutar los procesos. Estas opciones dan una gran potencia al sistema, pero también complican la creación de programas.

Los sistemas UNIX tienen multitud de características añadidas que ofrecen grandes posibilidades en su programación. Podemos disponer de herramientas para efectuar comunicación entre procesos, comunicación entre equipos UNIX conectados mediante red, sistemas de control y supervisión sobre cada proceso que ejecuta el ordenador y sistemas para monitorizar el estado de las conexiones de la red.

En nuestro caso utilizamos un sistema UNIX - SunOs 5.4 (Solaris 2.4) para una estación de trabajo SPARCstation 10. Bajo este sistema operan los programas utilizados para la comunicación entre el PC y la estación de trabajo, donde reside el sistema experto supervisor. Esta comunicación no sería posible efectuarla con un ordenador personal gobernado por un sistema operativo DOS, pues en este caso el multiproceso es una característica imprescindible.

4 DESARROLLO E IMPLEMENTACION
DEL SISTEMA SUPERVISOR

4 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SUPERVISOR

En este capítulo se presenta el desarrollo e implementación de un Sistema Experto en Tiempo Real (Real Time Expert System, RTES) para la supervisión y el control de una EDAR con eliminación biológica de materia orgánica y nutrientes. La arquitectura física contiene diferentes niveles de supervisión, incluyendo dos ordenadores de proceso autónomos (para el control de la planta y de los analizadores) y un PLC (Programmable Logic Controller), siendo el RTES el nivel supervisor del sistema de control del proceso. El RTES ha sido desarrollado utilizando una HDSE (Herramienta de desarrollo de Sistemas Expertos) comercial e industrialmente validada G2TM [Gensym, 1995]. Este sistema actúa como el control principal en un esquema de control supervisor mediante cambios de consignas (Supervisory Setpoint Control, SSC) y está basado en una arquitectura distribuida. El conocimiento está organizado en diferentes módulos, representando el conocimiento disponible para cada uno de los subprocesos de la EDAR. Además de los módulos independientes, un módulo supervisor actúa como el control principal del sistema multimódulo distribuido.

4.0 INTRODUCCIÓN

Las tendencias actuales en el control de procesos están determinando un incremento en la complejidad en cada uno de los niveles de control. La utilización de analizadores automáticos, autómatas programables y ordenadores industriales se incrementa continuamente. La aplicación de la tecnología de los ordenadores al control y supervisión de procesos tecnológicos a llevado a un espectacular incremento en la información adquirida por estos sistemas. Pero el incremento en la frecuencia, calidad y diversificación de los datos de proceso no a conllevado a una mejora equivalente del sistema. La cantidad de información es tan amplia que hace imposible su estudio con profundidad. Los resultados de esta tecnología son sistemas de adquisición de datos, con el único propósito de mostrar una visión superficial del

proceso. Para mejorar esta situación se ha propuesto la utilización de la Inteligencia Artificial [Serra, 1993; Serra, 1997; Patry, 1992].

Por otro lado, la monitorización de las sustancias de interés en los procesos de depuración es una característica importante para asegurar su control, particularmente cuando se incluyen la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo de forma simultánea. La complejidad de estos sistemas, debido al importante número de procesos biológicos implicados, hace necesario el desarrollo de instrumentación "on-line" fiable. Además, un sistema de toma de muestras robusto y reproducible es un factor crítico para proporcionar datos del proceso fiables. Las medidas "in-line" y "on-line" obtenidas continuamente del proceso, combinadas con un modelo y diferentes estrategias de control implementadas, permiten un funcionamiento más eficaz de las EDAR.

Un Sistema Experto Basado en el Conocimiento (SEBC o Knowledge-Based Expert System, KBES) es un posible marco donde las medidas, reglas y modelos pueden ser integrados. Barnett [1992] presenta una recopilación de las aplicaciones de los SEBC para los sistemas de lodos activos. La mayor parte de los sistemas allí resumidos son SEBC "off-line", principalmente herramientas de diagnóstico y de consejo para ayudar a los operadores [Gall, 1989; Ozgur, 1994; Stenstrom, 1994]. Algunos SEBC han sido diseñados con el objetivo principal de la supervisión "on-line" del proceso [Verheijen, 1997], aunque no es frecuente el énfasis en el control supervisor en tiempo real. Estos desarrollos previos están basados en arquitecturas de SEBC monolíticas. Estos sistemas son útiles cuando se aplican a EDAR no demasiado complejas, pero son difíciles de manejar cuando la complejidad del problema aumenta. La utilización de Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) [Moulin, 1996; Bond, 1992; Shoham, 1993] puede mejorar la situación. En la literatura, hay varias aplicaciones de dichos sistemas [Jennings, 1992; Morley, 1993; Jennings, 1994; Parunak, 1996].

La IAD abarca la investigación, análisis y desarrollo de "comunidades inteligentes" que integran un conjunto coordinado de procesos basados en el conocimiento, usualmente llamados agentes, que interactúan mediante cooperación, coexistencia o competencia, para alcanzar objetivos comunes [Sánchez, 1996]. Las razones para aplicar esta arquitectura son la distribución geográfica en el dominio de aplicación, la descomposición funcional, modularidad y extensibilidad, para controlar la creciente complejidad de los sistemas de IA e incrementando el poder del sistema resultante.

En el presente capítulo se muestra la arquitectura de hardware y el desarrollo de programas de un sistema inteligente de control distribuido para la supervisión de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales urbanas con eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Este desarrollo puede ser definido como un sistema con conocimiento distribuido. Esto significa que se aplica todo el conocimiento posible en cada subsistema del proceso, tal como en la tendencia actual de control y supervisión en tiempo real de procesos. En este esquema de control supervisor, cada elemento supervisa los elementos situados jerárquicamente bajo su control. Este hecho incrementa la complejidad del sistema pero, a cambio, se obtienen algunas ventajas. En primer lugar, se aumenta el control del fallo del proceso para asegurar la seguridad del sistema. Con esta arquitectura es fácil

obtener un sistema tolerante a fallos. En segundo lugar, el control de más alto nivel puede ser utilizado en la supervisión y control del sistema global. En nuestro caso, este nivel superior está ocupado por un sistema experto (SE) construido con G2.

Los principales aspectos de este sistema se presentan en las siguientes secciones. La sección 4.1 presenta la arquitectura de la planta piloto, con las diferentes configuraciones implementables. En la sección 4.2 se realiza una descripción física y de funcionamiento de los diferentes subsistemas de la planta piloto. La sección 4.3 describe el funcionamiento de los programas de gestión local (programa de monitorización y control de la planta piloto y programa de control de los analizadores). En la sección 4.4 se muestra el funcionamiento del sistema de transmisión de datos "on-line" y "off-line". Finalmente, en la sección 4.5 se describe la implementación y el funcionamiento del sistema experto multimódulo.

La arquitectura del sistema inteligente de control distribuido se representa en la figura 4.1. El sistema completo puede ser dividido en cinco bloques: la planta piloto, su sistema de monitorización y control, el sistema analítico, el servidor de datos y el SE.

En esta arquitectura, las diferentes dinámicas de control que aparecen en una EDAR real están reflejadas. La dinámica más rápida es la operación

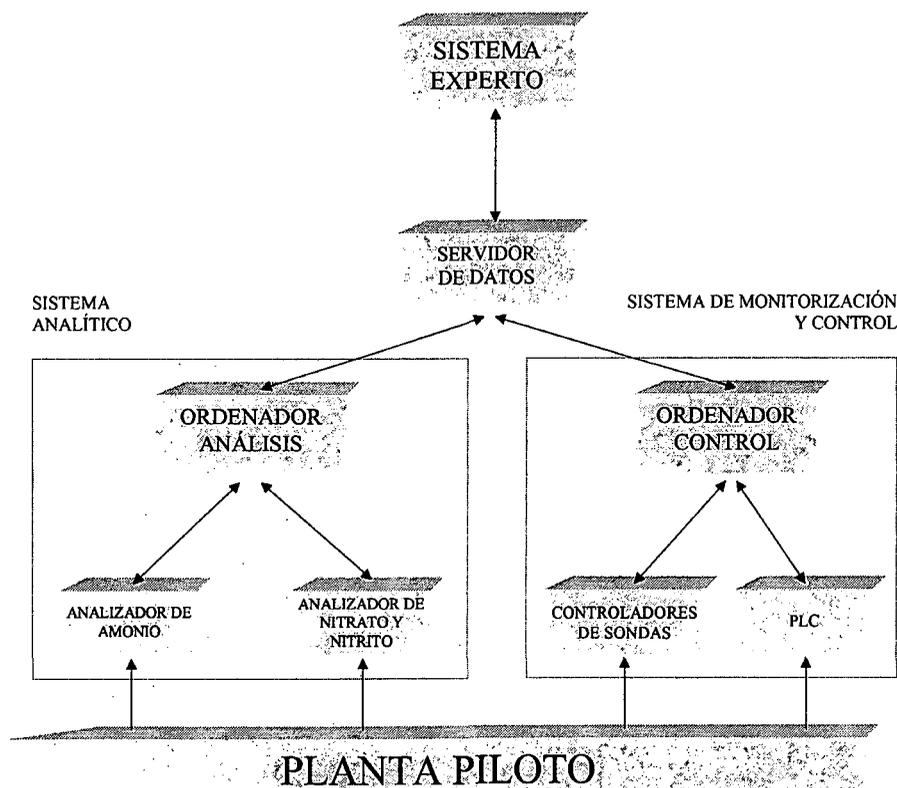


Fig. 4.1. Esquema de la arquitectura del sistema de control distribuido

del control de oxígeno. Este parámetro debe ser controlado en una dinámica muy rápida, por lo cual puede ser necesaria la utilización de un controlador independiente, como por ejemplo un PID. La frecuencia de actuación necesaria depende del sistema de aireación utilizado, pero en nuestra planta es de alrededor de 10 segundos. Otros parámetros rápidos son los diferentes caudales de la planta, la velocidad de agitación, etc. Todos estos parámetros deben ser controlados directamente con lazos de control locales. En nuestra planta, esto se realiza mediante la utilización de un sistema independiente de monitorización y control.

Con el objetivo de adquirir más información sobre el proceso de la planta piloto, otro subsistema independiente del sistema de monitorización y control ha sido diseñado e implementado. Este es el sistema automático de análisis, y está controlado por otro ordenador.

Los dos subsistemas son físicamente independientes, pero están unidos mediante el servidor de datos, que permite la transmisión de datos entre estos ordenadores y el SE. La independencia de cada subsistema asegura su funcionamiento si aparece algún problema en el otro subsistema.

El subsistema de monitorización y control es capaz de mantener el funcionamiento correcto de la planta en condiciones normales, pero este control actúa con un conjunto de consignas prefijadas. Cuando aparecen condiciones anormales, este subsistema puede no ser capaz de llevar la planta a un buen funcionamiento. Es en esas condiciones cuando aparece la necesidad de un control supervisor de mayor nivel. Estas situaciones, que los sistemas de control clásico no son capaces de manejar, son las que un sistema experto puede ser capaz de controlar adecuadamente.

4.1 PLANTA PILOTO

El objetivo principal de una planta piloto es disponer de un sistema de experimentación que permita realizar pruebas de funcionamiento y operación que no pueden realizarse en una planta real, tanto por motivos económicos como por riesgos medioambientales. Existen multitud de referencias sobre plantas piloto de depuración de aguas residuales por medios biológicos [Givens, 1991; Lo, 1994; Pedersen, 1990; Vanrolleghem, 1995; Wareham, 1993]. La primera gran diferencia entre ellas es el tamaño. Éste vendrá determinado por el volumen de aguas residuales a tratar. No es la misma situación disponer de una planta piloto en un laboratorio que en una planta depuradora real. El volumen disponible a tratar puede ser muy diferente.

Las características a desarrollar en la planta piloto vendrán determinadas principalmente por la utilización a la que se va a dedicar. En nuestro caso van a estudiarse diferentes esquemas de operación implementables para la eliminación de nitrógeno y fósforo. Para el control de estas variables es necesario disponer del mayor número de medidas posibles, aunque para algunas de ellas es necesario un mayor desarrollo o un abaratamiento de los costes para poder implementarlas a escala real.

En primer lugar se ha procedido al diseño de la planta piloto, basándose en la premisa fundamental de la versatilidad. El objetivo principal ha sido construir un prototipo de planta depuradora de aguas residuales urbanas capaz de admitir diferentes configuraciones, efectuando los mínimos cambios físicos posibles. Este objetivo viene impuesto por la necesidad de poder efectuar diferentes experiencias asimilables a situaciones en una planta depuradora real. En la planta piloto han sido tenidas en cuenta las posibles configuraciones de trabajo; en primer lugar se trataba de ofrecer un sistema que pudiese adoptar la misma configuración que la EDAR de Manresa, para poder obtener resultados extrapolables. Cumplido el primer requisito era necesario que además pudiera trabajar de otros modos, los requeridos para la nitrificación y desnitrificación de las aguas residuales (sección 1.2.4).

4.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Estas necesidades del sistema debían ser cumplidas de un modo implementable y utilizable posteriormente sin grandes dificultades. El objetivo era conseguir una planta piloto versátil y fácilmente utilizable por el usuario final. Para cumplir el objetivo se han utilizado los elementos descritos en la sección 3.2. Las características generales son las siguientes:

- Se han construido tres reactores iguales, con la posibilidad de trabajar con un volumen de 18 ó 28 litros en cada uno de ellos. Se trata de reactores cuadrados de 30 x 30 x 40 cm, sin baffles internos y agitados cada uno por un motor de 0.5 Cv controlado por un variador de frecuencia, comandable desde el PC.
- Se ha construido un cuarto reactor, con una capacidad de 9, 13.5 ó 18 litros, cerrado herméticamente y equipado con un agitador de velocidad regulable (0-120 rpm) mediante un variador de frecuencia.

- Se ha construido un sedimentador de 60 litros, que permite recircular la biomasa a los tanques y obtener un agua depurada sin apenas sólidos en suspensión. Se dispone de un segundo sedimentador de 30 litros.
- Para la conexión hidráulica entre los reactores se han utilizado tubos de silicona, que proporcionan un bajo mantenimiento y una rápida reconfiguración de la planta.
- El trasiego de líquidos entre los reactores se efectúa mediante la acción de bombas peristálticas, dosificadoras y neumáticas. El tipo de bomba utilizado en cada caso depende de la configuración con la que se trabaje.
- La configuración de la planta se consigue mediante la actuación de electroválvulas comandadas por un PLC, conectado al PC donde se efectúa la monitorización y el control. Esto permite poder efectuar cambios de configuración de la planta de manera automática.
- Para el aporte de oxígeno se han utilizado tres válvulas de control neumáticas, controladas desde el PC por los respectivos bucles de corriente de 4-20 mA, que a su vez controlan los transductores intensidad/presión correspondientes a cada válvula.
- Se ha desarrollado un sistema para permitir la utilización de alimento sintético en lugar de utilizar agua residual real. Para ello se utilizan dos bombas dosificadoras, alimentadas de respectivos concentrados de fuente de carbono y nitrógeno, y diluidos en línea con el agua de la red que es regulada por una válvula de control neumática (sección 4.2.8).

En el diseño de la planta se ha optado por la instrumentación eficiente de cada reactor, para poder efectuar el estudio detallado de los procesos biológicos, físicos y químicos que confluyen en el proceso de la depuración biológica de aguas residuales urbanas. Desde el ordenador de proceso se pueden controlar los siguientes equipos:

- Los variadores de frecuencia (Danfoss VT) que manejan los motores de los agitadores.
- Los módulos de medida (Crison pHrocon18), sobre los que se centralizan las medidas de cada bioreactor: oxígeno disuelto, potencial de redox, temperatura y pH.
- Las electroválvulas y bombas, comandadas por un autómatas programable (PLC), que permite realizar su trabajo independientemente del PC.
- Las válvulas de control de aire y las bombas dosificadoras de recirculación son manejadas mediante bucles de corriente de 4-20 mA

directamente desde una placa (PCL 726) situada en el PC.

Para la toma de datos de las sondas y para el manejo de los elementos de control se ha desarrollado un programa (apartado 4.3) en lenguaje C que permite el funcionamiento autónomo de la planta piloto.

Los tipos de comunicación utilizados entre el ordenador de proceso y cada uno de los instrumentos son los indicados en la tabla 4.1.

Elementos		Comunicación	
Ordenador	↔	PLC	RS-232-C
Ordenador	↔	Crison	RS-485-2D
Ordenador	↔	Danfoss	RS-232-C
Ordenador	↔	SUN	Ethernet
Ordenador	↔	Bombas D.	4-20mA
Ordenador	↔	Válvulas	4-20mA

Tabla 4.1 Tipos de comunicación entre los equipos de la planta y el ordenador de proceso.

El esquema hidráulico general de la planta piloto, en una configuración habitual, se muestra en la figura 4.2.

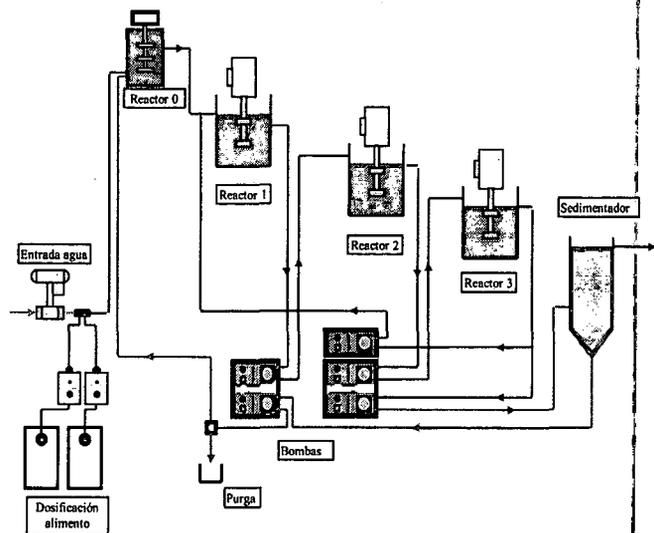


Fig. 4.2. Esquema hidráulico de la planta piloto

4.1.2 ESQUEMAS DE OPERACIÓN IMPLEMENTABLES EN LA PLANTA PILOTO

Utilizando el esquema hidráulico de la figura 4.2 y el sistema de electroválvulas, la planta piloto puede funcionar con diferentes configuraciones de operación. Es posible trabajar con los reactores en serie o en paralelo, con diferentes configuraciones, resultado de la combinación de las recirculaciones externa e interna y de la alimentación distribuida con el esquema de operación principal.

Se puede modificar el sistema de recirculación externa; los lodos activos concentrados por el sedimentador pueden ser introducidos a cualquiera de los tres reactores.

Mediante la recirculación interna se puede aprovechar el alto contenido de nitratos en los reactores aeróbicos, para aportar material oxidante en los reactores anóxicos, tal como se hace en la configuración habitual de la planta (figura 4.3).

Una tercera posibilidad es el paso de parte del alimento al segundo o al tercer reactor de la serie (alimentación escalonada, figura 4.4). Esto puede favorecer por ejemplo la eliminación de nitratos en un esquema de eliminación de nitrógeno por nitrificación y post-desnitrificación, porque permite la presencia de fuente de carbono fácilmente biodegradable en el reactor post-desnitrificante. Esta configuración permite la disminución o la eliminación de la recirculación interna de nitratos.

La planta también puede operar en paralelo, con los

tres reactores tratando en continuo una parte proporcional de la carga de entrada (figura 4.5). Si se mantiene una operación aeróbica, esta configuración sólo será útil para eliminar materia orgánica. Si se alternan las condiciones entre aeróbicas y anóxicas, la planta podrá eliminar nitrógeno por nitrificación y desnitrificación.

También pueden efectuarse experiencias del tipo SBR, (Sequential Batch Reactor), en las cuales las condiciones de tratamiento son modificadas siguiendo un esquema temporal determinado (figura 4.6). En este caso se puede operar de modo que no sea necesario el sedimentador, se pueden realizar ciclos aeróbicos, anóxicos y de sedimentación en el mismo reactor. La disponibilidad de los tres reactores permite el tratamiento en continuo de la entrada, distribuyendo la introducción del influente en los tres reactores, y coordinando adecuadamente la duración de cada ciclo.

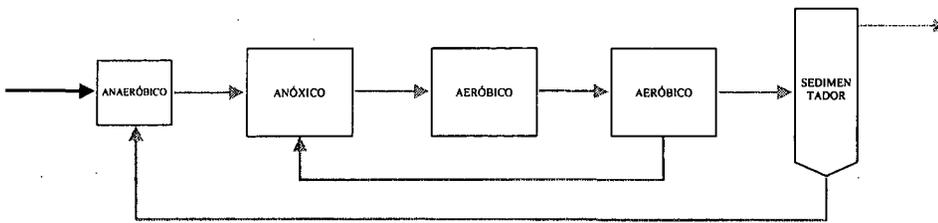


Fig. 4.3. Esquema de operación habitual de la planta piloto

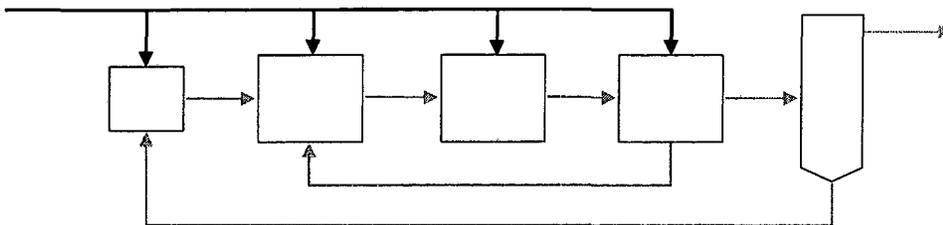


Fig. 4.4. Esquema de operación con alimentación escalonada

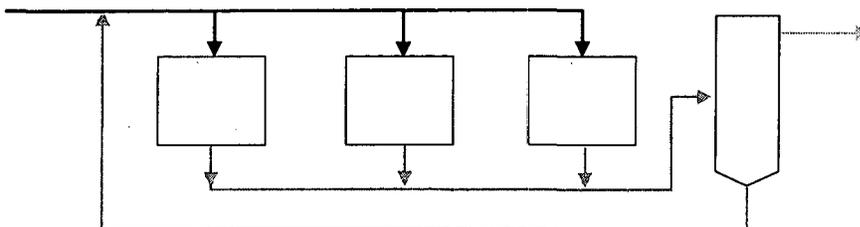


Fig. 4.5. Esquema de operación en paralelo

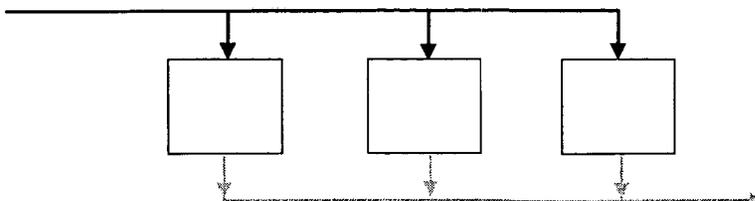


Fig. 4.6. Esquema de operación SBR

4.2 SENSORES Y ACTUADORES

En esta sección se realiza una descripción física y de funcionamiento de los diferentes subsistemas de la planta piloto. Estos sistemas permiten la obtención de información del proceso y permiten la actuación sobre él.

4.2.1 SONDAS

El sistema de adquisición de datos para las sondas del proceso se muestra en la figura 4.7

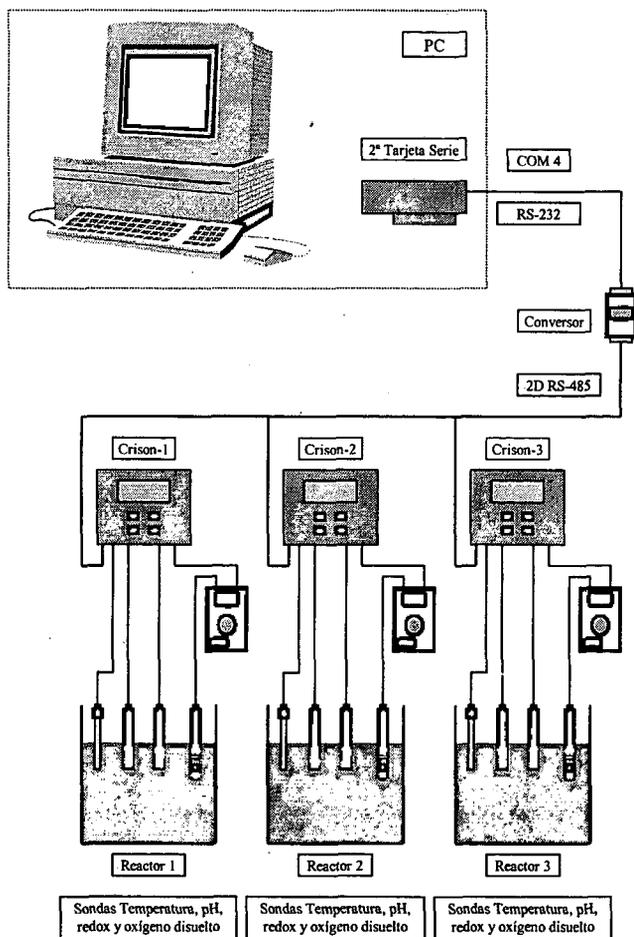


Fig. 4.7. Esquema del sistema de adquisición de datos de la planta piloto

El sistema está constituido por los siguientes elementos:

- El ordenador de proceso, encargado de centralizar la información.
- Un convertidor RS-485 / RS-232 que permite el enlace de datos entre el puerto serie RS-232-C del ordenador con la interfaz RS-485 disponible en los controladores de sondas pHrocon-18.

- 3 oxímetros portátiles Crison Oxi-92, con salida a registrador de aproximadamente 30 mV/(mg/l).
- 3 controladores de sondas pHrocon 18 para la lectura de las sondas y la transmisión de datos al PC mediante su interfaz RS-485. Permiten el control de pH utilizando una bomba externa.
- Sondas de temperatura, potencial de oxido-reducción, pH y oxígeno para los reactores 1, 2 y 3.

Con este sistema implementado se permite la adquisición de información de temperatura, pH, redox y oxígeno disuelto. Cada uno de los parámetros proporciona información sobre el proceso:

Temperatura. Los procesos de depuración biológica son influenciados por la temperatura, ya que el calor afecta directamente al metabolismo celular. Esta es una de las variables que influyen al rendimiento de depuración del sistema. Algunos procesos se ven más influenciados por la temperatura, por ejemplo los procesos de digestión anaerobia de lodos, o la eliminación de nitrógeno mediante los sistemas de nitrificación / desnitrificación. La cinética de la nitrificación es muy lenta a temperaturas bajas, por lo que esta variable deberá ser considerada para calcular el tiempo de residencia celular mínimo en la planta.

pH. Éste es un parámetro muy importante en plantas depuradoras. Una variación de pH del influente a la planta (motivado por alguna descarga industrial) puede desestabilizar el proceso y hacerle perder eficacia de depuración. Los lodos activos son microorganismos, que necesitan unas condiciones adecuadas para poder crecer. Si las condiciones ambientales no son adecuadas, o son muy variables, se puede provocar mortandad celular o un menor crecimiento.

La medida pH obtenida es dependiente de la temperatura, por lo que es necesario realizar la compensación automática utilizando una sonda de temperatura Pt-100.

Oxígeno. Las sondas de oxígeno son utilizadas en las plantas depuradoras para conocer la situación óxica de los bioreactores. Dependiendo de la concentración de oxígeno, la planta tiene una eficacia de depuración determinada, y se pueden dar unos procesos u otros. Por ejemplo, para la eliminación de materia orgánica puede ser suficiente una concentración de 1 mg/l, pero para conseguir nitrificación en una planta a escala real, será necesaria generalmente una concentración mayor a 2 g/l. Es deseable la presencia de un lazo de regulación del oxígeno disuelto en el medio, para generar las condiciones idóneas para el consumo del sustrato por los microorganismos al menor coste posible.

Redox. Mide la presencia de elementos oxidantes y reductores en el medio, que reaccionan mediante procesos electroquímicos, de intercambio de electrones. Se mide utilizando un electrodo de platino u oro para que no reaccione con el medio.

Las sondas de potencial de óxido reducción corresponden a un tipo de instrumentación disponible pero que presentan dificultad en la interpretación de sus resultados. La validez de los resultados es cuestionable porque se mide el potencial de oxido-reducción en el medio, que puede ser diferente al de la célula. No se trata de un equilibrio tan rápido como el de pH. Otro inconveniente es su fuerte dependencia del pH y de la temperatura.

En fermentaciones aeróbicas el potencial redox está relacionado con el nivel de oxígeno disuelto del medio, por lo que no proporciona información adicional a la de una sonda de oxígeno. Se ha propuesto su utilización en sistemas de depuración en condiciones anóxicas, sin presencia de oxígeno. Por debajo de los límites de detección de la sonda de oxígeno, la medida de redox puede dar información del estado oxidativo del sistema, por ejemplo puede darnos idea de la presencia de nitratos en el medio.

4.2.2 ANALIZADORES

Los analizadores automáticos FIA y CFA desarrollados por Gabriel (apartado 3.4), permiten el análisis automático de nitrato, nitrito y amonio. Pero estos equipos no tendrían utilidad para el control del proceso si no dispusieran de un sistema de toma de muestras automático. Para este propósito se ha desarrollado un sistema, basado en la utilización de una bomba, un filtro tangencial de 0.45 μm Millipore® y un conjunto de ocho electroválvulas de tres vías, que permite la toma de muestras en los cuatro reactores del proceso y en el efluente. En la figura 4.8 se muestra el sistema implementado.

El ordenador de control de los analizadores se encarga de la comunicación con todos los módulos independientes de los analizadores y de la actuación sobre la placa PCL-711 que permite la configuración de las electroválvulas.

La bomba del sistema se encuentra siempre en funcionamiento, tomando muestra de un punto de la planta, determinado por la posición de las electroválvulas. Esta bomba proporciona un caudal de 1 l/min, necesario para que el filtro tangencial funcione correctamente.

La muestra aspirada por la bomba se hace pasar a través del filtro tangencial, que divide el flujo de entrada en dos corrientes, una libre de biomasa y de muy pequeño caudal, que se utiliza en los

analizadores, y otra con el resto de la corriente de entrada, que es devuelta al mismo punto donde fue tomada mediante un circuito, paralelo al de toma de muestras, determinado por el sistema de electroválvulas. Tomando la muestra de este modo se impide la pérdida de biomasa y se evita la mezcla entre los diferentes puntos del sistema.

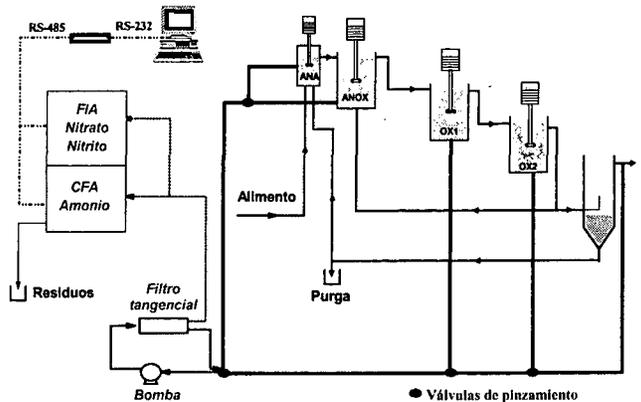


Fig. 4.8. Sistema automático de toma de muestras

El filtro tangencial y el pequeño caudal utilizado por los analizadores provocan un tiempo de respuesta lento en el sistema ante un cambio en el punto de muestreo. A pesar de ello, el sistema es capaz de hacer un análisis de amonio y dos de nitrato y nitrito en un punto del sistema cada 20 minutos. Si se monitorizan los cinco puntos posibles, el sistema analítico es capaz de obtener un perfil de toda la planta en 1 hora y 40 minutos. En el caso de monitorizar un único punto, al no tener que renovar el líquido del sistema de filtración, se puede realizar un análisis de cada parámetro cada 10 minutos.

4.2.3- VÁLVULAS

La entrada de agua del sistema de alimentación y la de aire para la aireación, están comandadas por una placa PCL-726 situada en el ordenador de proceso. Dispone de convertidores digital - analógico que permiten la actuación analógica de las válvulas de control mediante consignas digitales. Los elementos que componen el sistema aparecen representados en la figura 4.9.

La placa PCL-726 proporciona una señal de control 4-20 mA, que es transformada mediante transductores I/P a una señal neumática de 0.2 a 1 bar (equivalente a 3 - 15 psi). La válvula reguladora de agua dispone de un posicionador, mientras que las de aire únicamente tienen transductor.

En las válvulas de aire, la señal neumática modifica la posición del obturador de la válvula, lo que hace variar el caudal de aire a través de ella. Este caudal

periodicidad de toma de medidas y actuación cada 10 segundos, aunque este valor es configurable fácilmente.

4.2.5.2 ACTUACIÓN DEL CONTROL DE OXÍGENO

Puede disponerse de dos actuaciones diferentes. En primer lugar es posible utilizar los agitadores, gracias al efecto de unas hélices superficiales tipo Sabre. También se puede regular la aireación mediante el aporte de aire de los difusores. Para implementar el control se ha optado por el mantenimiento de la agitación a una velocidad determinada y la utilización del aporte de aire por los difusores como variable de actuación. La hélice Sabre se utiliza sumergida para aumentar la homogeneización y minimizar su aporte de oxígeno.

El ordenador dispone de una tarjeta de conversión digital/análogica con la que efectuar salidas analógicas de 4-20 mA. Mediante el programa de monitorización y control es posible manejar la tarjeta, determinando la señal necesaria en cada momento. Esta señal 4-20 mA generada es utilizada como entrada al transductor I/P que transforma la señal eléctrica en neumática. El elemento final es una válvula de regulación que recibe la señal neumática generada por el transductor.

Teniendo en cuenta la dinámica del sistema y las posibles perturbaciones que pueden afectarle se decidió la implementación de un control feedback (por retroalimentación) tipo PID (Proporcional Integral Derivado). Se han desarrollado y comprobado diferentes variantes de controladores, todas ellas basadas en la ecuación del controlador analógico más utilizado, el PID, cuya forma general es la siguiente:

$$C(t) = C_s + K_c \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$

PID analógico

De la ecuación del controlador PID analógico es fácil desarrollar una aproximación discreta. Puede utilizarse una aproximación al término integral mediante una integración rectangular y una diferencia de primer orden para el término derivativo. El resultado es el conocido por la forma posición del PID digital [Stephanopoulos, 1984].

$$C_n = C_s + K_c \left[\varepsilon_n + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k + \frac{\tau_D}{\Delta t} (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \right]$$

PID digital posición

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- C_n : valor de la variable manipulada
- C_s : actuación del controlador para error nulo (valor de C para $\varepsilon = 0$)
- K_c : ganancia proporcional del controlador
- τ_I : constante de tiempo integral
- τ_D : constante de tiempo derivada

Una alternativa del algoritmo de control PID de posición es la denominada forma de velocidad. En ella no se calcula el valor de la señal de salida del controlador (como en el caso de posición), sino el cambio respecto al valor anterior.

$$C_n = C_{n-1} + K_c \left[(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \varepsilon_n + \frac{\tau_D}{\Delta t} (\varepsilon_n - 2\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_{n-2}) \right]$$

PID digital velocidad

La ventaja de esta formulación se encuentra en que no necesita inicialización (C_s) como requiere el PID de posición. También está protegido contra la saturación del controlador ("windup"), ya que puede volver de la saturación en un solo periodo de muestreo. Otra cualidad del PID velocidad es la especial facilidad para ser adaptado al cálculo por el ordenador, únicamente es necesario almacenar en memoria los valores del error de las tres últimas medidas para obtener el valor exacto de la expresión. Debido a la idoneidad de esta variable de PID para el cálculo por ordenador, ésta ha sido la variante utilizada.

Estimación de parámetros

La sintonización del controlador puede realizarse utilizando un método empírico conocido como el método de la curva de reacción del proceso, desarrollado por Cohen y Coon [Seborg, 1989]. Este método está basado en la respuesta de un sistema a un cambio en escalón de la entrada. La respuesta de la mayor parte de procesos suele poder representarse como la respuesta de un sistema de primer orden más un tiempo muerto.

De la respuesta obtenida de la perturbación del sistema, es posible estimar los siguientes parámetros:

- K: ganancia del sistema (salida del sistema / entrada al sistema)
- τ : constante de tiempo del sistema (salida del sistema / pendiente de la respuesta en el punto de inflexión de la curva sigmoideal)
- θ : tiempo muerto de la respuesta

Basándose en los resultados de Cohen - Coon pueden calcularse los parámetros del controlador PID, utilizando las siguientes expresiones:

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right] \quad \tau_I = \frac{\theta [32 + 6(\theta/\tau)]}{13 + 8(\theta/\tau)}$$

$$\tau_D = \frac{4\theta}{11 + 2(\theta/\tau)}$$

En la estimación realizada se obtuvieron los siguientes resultados:

$$K_c = 4.2 \text{ mA} / (\text{mg/l})$$

$$\tau_I = 100 \text{ s}$$

$$\tau_D = 16 \text{ s}$$

Estos valores pueden ser tomados como una primera aproximación, sobre la cual realizar experimentalmente los cambios necesarios. En nuestro caso, han resultado ser una buena aproximación, pues los parámetros actualmente utilizados se asemejan en gran medida. La mayor diferencia aparece en la constante de tiempo derivada, pues se detectó la necesidad de disminuir la acción provocada por los cambios rápidos, ya que producían un exceso de oscilaciones en la respuesta del sistema. El resto de parámetros han proporcionado una acción correcta del controlador en las condiciones normales de trabajo.

Un ejemplo de aplicación lo podemos observar en las figuras 4.12 y 4.13, donde se muestra la estabilidad de este control para unos periodos de una hora y de un día. Puede observarse la variable controlada (mg/l de oxígeno), con un punto de consigna de 5 mg/l, y la variable de actuación (mA de la válvula de control). En las gráficas puede observarse el comportamiento del control en el caso de trabajar en estado estacionario.

También se ha podido comprobar la fiabilidad del control en otras situaciones, como por ejemplo el arranque de la planta. El procedimiento de puesta en marcha de la planta ha sido monitorizado y controlado por el programa del ordenador. Para ello se han mantenido ciclos de aireación de cuatro horas, con el punto de consigna de 5 mg/l de oxígeno, y ciclos sin aporte de aire de dos horas, con el punto de consigna del oxígeno de 0 mg/l. Este forma de operación se ha establecido así para permitir el crecimiento tanto de bacterias nitrificantes como de desnitrificantes (sección 1.2.4).

El controlador ha sido programado para que al comienzo de un ciclo cambie automáticamente su punto de consigna. Los resultados de monitorización del proceso durante un día para el tercer reactor son los que aparecen en la figura 4.14.

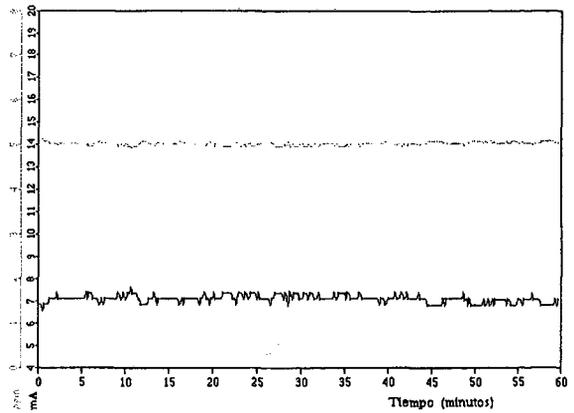


Fig.4.12. Evolución del oxígeno disuelto y la actuación durante una hora

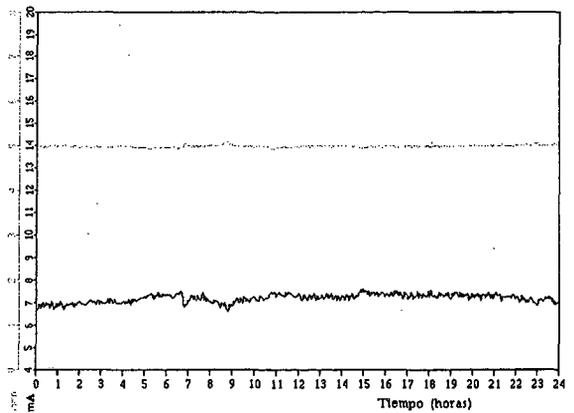


Fig. 4.13. Evolución del oxígeno disuelto y la actuación controlado durante 24 horas

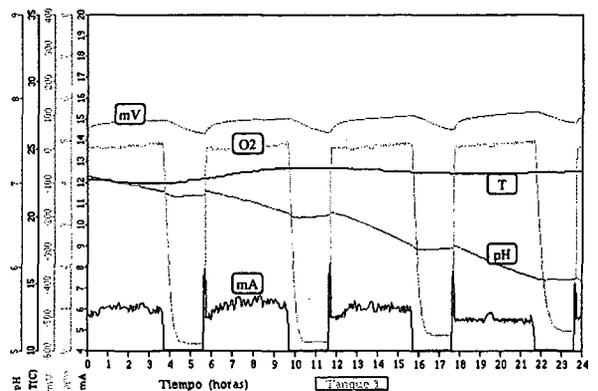


Fig. 4.14. Evolución de las variables del reactor a lo largo de 24 horas en la fase de aclimatación de la biomasa

En la figura 4.14 podemos observar cómo varía la actuación del control sobre la válvula (los mA de la salida de control) en función del punto de consigna. También puede observarse la influencia de la variación de oxígeno sobre el resto de parámetros monitorizados: pH, temperatura y potencial de óxido-reducción.

4.2.6 OUR

Para la estimación de la velocidad de consumo de oxígeno (OUR, Oxygen Uptake Rate) se utilizan los subsistemas de aireación y agitación comentados en los apartados anteriores. El procedimiento utilizado se basa en evitar el aporte de oxígeno por el sistema de aireación y la medida de la bajada del oxígeno disuelto en el reactor.

El procedimiento completo es el siguiente:

- Se desactiva el control PID y se cambia la consigna de aireación a 4 mA, lo que cierra totalmente la válvula de aireación del reactor.
- Se cambia la agitación al 25 % (100 rpm), lo que mantiene la agitación del medio necesaria y disminuye el posible aporte de oxígeno por la superficie.
- Se aumenta de 10 a 5 segundos la frecuencia de adquisición de datos de oxígeno, para disponer de más medidas en un intervalo corto de tiempo.
- Se realizan 6 medidas de oxígeno, lo que supone un tiempo total de la estimación de 30 segundos.
- Se calcula mediante una regresión lineal la pendiente de la recta ajustada a los datos de oxígeno adquiridos. El programa de control comprueba que el coeficiente de regresión sea

mayor a un límite determinado, normalmente 0.95. Si el valor de OUR estimado supera esta prueba, se almacena en un fichero y se envía al SE.

- Se devuelve el reactor a las condiciones anteriores a la estimación, es decir, se activa el control de oxígeno PID, se vuelve a la última señal de control sobre la válvula y se aumenta la agitación hasta el valor inicial.

Este procedimiento se repite periódicamente, según el tiempo prefijado, si las condiciones en el reactor son aeróbicas.

En las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 puede observarse el proceso de estimación para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente. Se representan la medida de oxígeno, la actuación sobre la válvula de aireación, las medidas de oxígeno utilizadas y la regresión ajustada a esos puntos. En las tres figuras, las escalas de oxígeno y aireación tienen el mismo rango de valores. La escala de tiempo no es la misma en los tres casos; en el reactor 1, es de una hora, pero en los reactores 2 y 3 la escala es de una hora y 45 minutos.

En la figura 4.15, se muestra la estimación de OUR en el reactor 1 durante una secuencia de operación cíclica, con condiciones anóxicas durante 20 minutos y condiciones aeróbicas con consigna 3 mg/l de oxígeno disuelto durante 10 minutos. El

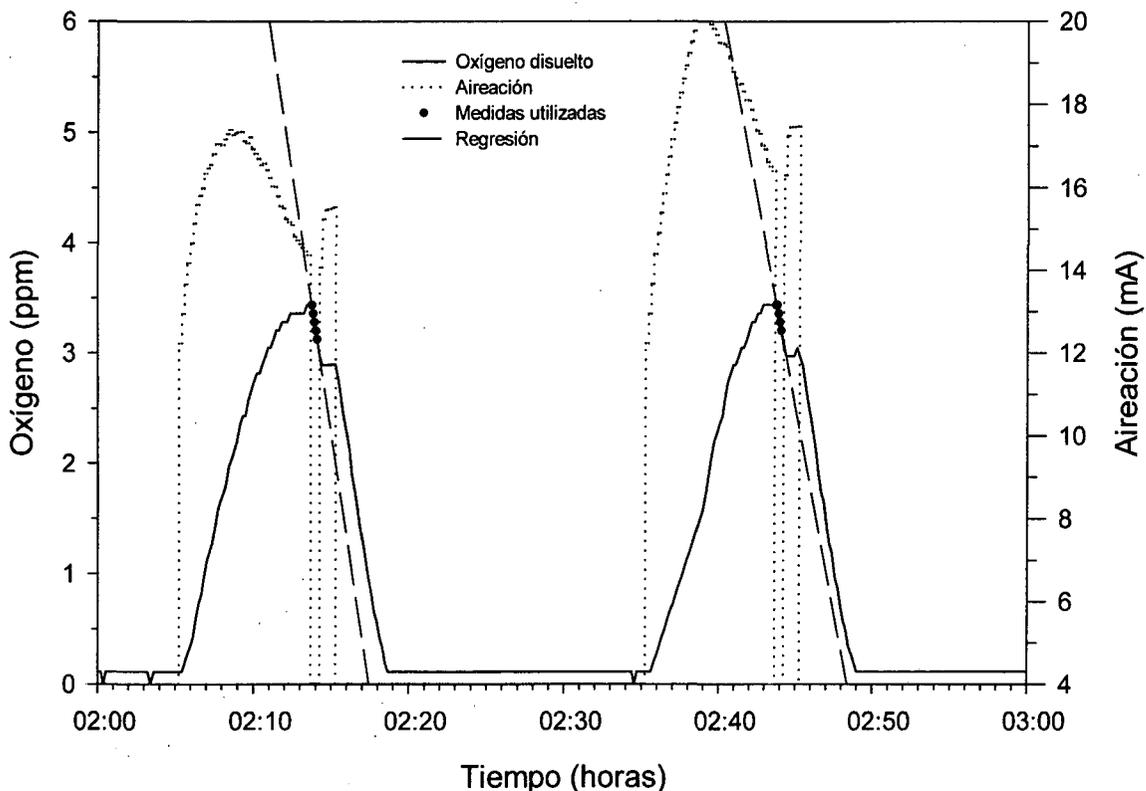


Fig. 4.15. Estimación de OUR en el reactor 1

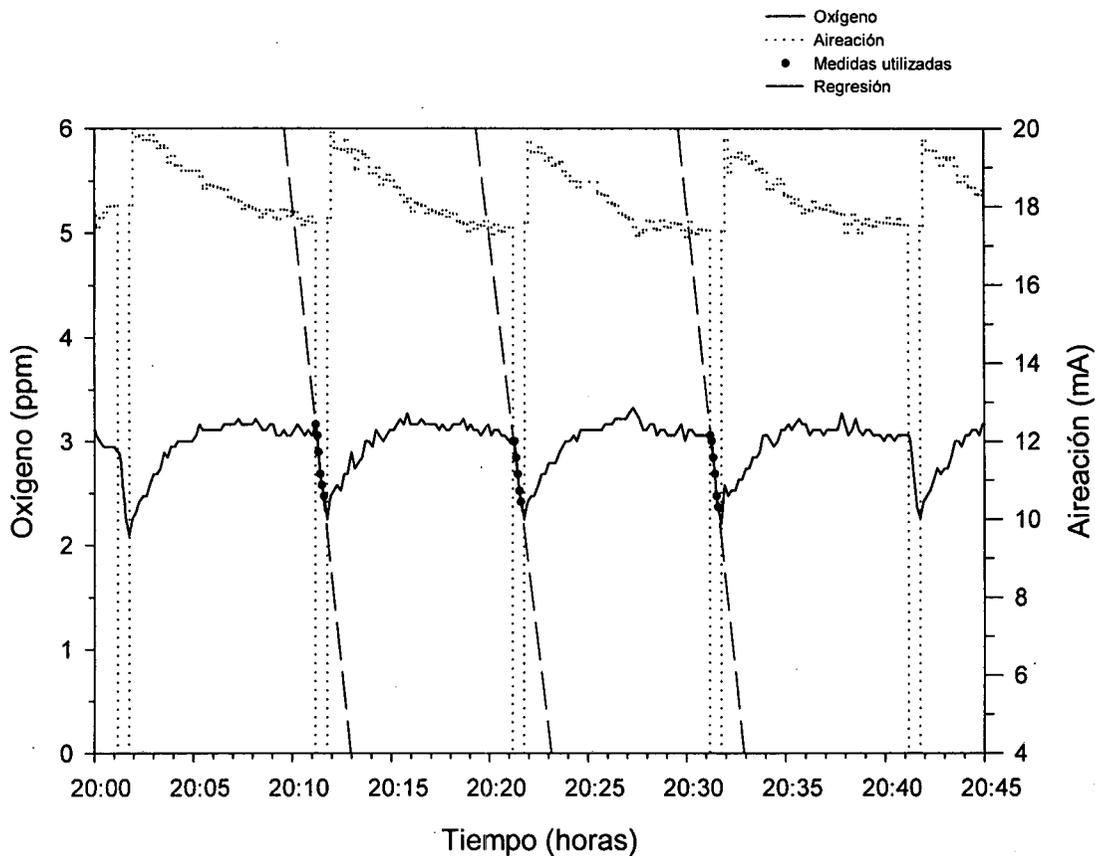


Fig. 4.16. Estimación de OUR en el reactor 2

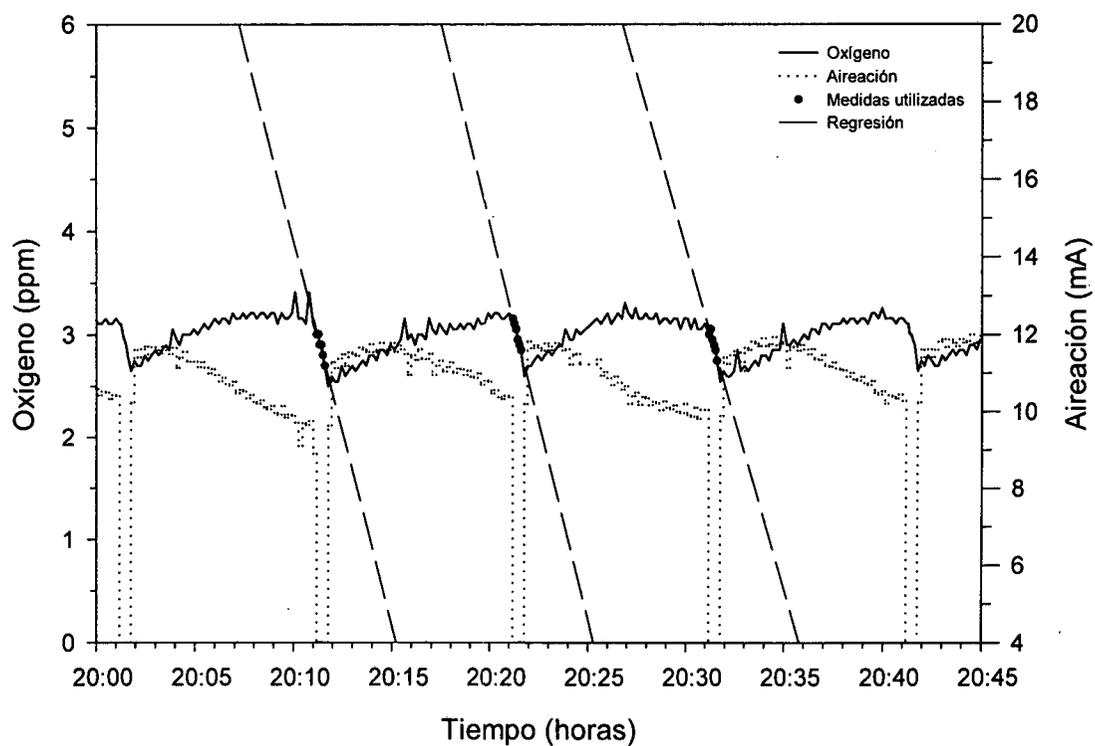


Fig. 4.17. Estimación de OUR en el reactor 3

programa de monitorización y control aprovecha los periodos aeróbicos para realizar la estimación de consumo de oxígeno. En la figura se observa el cierre de la válvula de aireación, la rápida bajada de oxígeno disuelto en el reactor y, una vez pasado el periodo de medida, el restablecimiento de la última actuación del controlador PID y la lenta recuperación del oxígeno disuelto después de la perturbación provocada.

En las figuras 4.16 y 4.17 se puede observar el mismo procedimiento para los reactores 2 y 3. En estos dos reactores se mantienen las condiciones aeróbicas durante todo el periodo, por lo que se obtiene una estimación de OUR cada 10 minutos. En las dos figuras puede observarse una diferente velocidad de consumo para el mismo periodo experimental. En el reactor 2, después del reactor 1 anóxico, el consumo es mayor porque todavía puede quedar algo de DQO, lo que aumenta la actividad de los microorganismos. Esto se refleja en las figuras en dos modos, la elevada actuación del sistema de aireación en el reactor 2 y la mayor pendiente de bajada de oxígeno en la estimación.

En ambos casos, también se observa que el control tarda unos minutos en recuperar los valores de consigna de oxígeno, lo que demuestra la importancia de la perturbación sobre el sistema al realizar la estimación de OUR.

Por último se presenta en la figura 4.18 la relación entre la actuación sobre las válvulas de aireación de los reactores y los valores de OUR medidos. Se representan todas las medidas de aireación, oxígeno y estimaciones de OUR para un periodo de 14 horas.

En la figura 4.18 puede observarse que existe una relación entre la aireación necesaria en el reactor respecto el consumo de oxígeno realizado por los microorganismos, pero que no es una relación directamente proporcional. Esto es debido al comportamiento no lineal del sistema de aireación. Para valores bajos de abertura de la válvula, la presión de entrada a la válvula aumenta, lo que repercute en un aumento del caudal respecto al que correspondería a esa abertura si la presión se mantuviera constante.

Esto podría minimizarse aumentando la presión del manoreductor anterior a las válvulas, pero también tendría efectos negativos. Al aumentar la presión, se obligaría a trabajar a las válvulas en una zona más cerrada, lo que tiene como consecuencia un comportamiento muy poco lineal y por tanto un control de oxígeno más oscilante.

En cuanto a las medidas de OUR, puede observarse que aunque tienen bastante variabilidad, las tendencias detectadas son generalmente correctas.

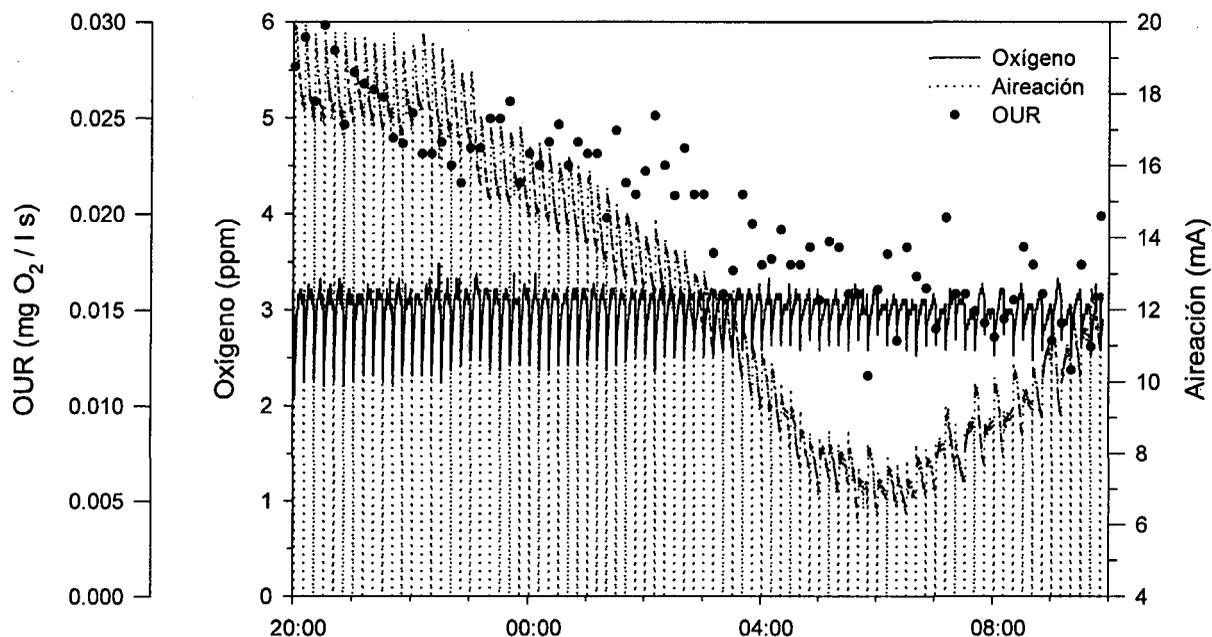


Fig. 4.18. Relación entre la aireación y la velocidad de consumo de oxígeno

4.2.7 PLC

Para el control de los elementos con funcionamiento encendido / apagado de la planta piloto se ha dispuesto de un PLC (Programmable Logic Controller, autómatas programables) Izumi FA-2J conectado al ordenador de proceso mediante una interfaz RS-232-C. Este PLC se encarga de la utilización y supervisión de los siguientes elementos de la planta (figura 4.19):

- 11 electroválvulas para la distribución de caudales de recirculación y purga.
- 2 bombas dosificadoras para el sistema de alimentación.
- 4 bombas peristálticas y dosificadoras para el bombeo de fangos.
- 2 bombas neumáticas para el bombeo de fangos.
- Un cuadro de relés para efectuar diferentes actuaciones.
- Lectura de los sensores de nivel.

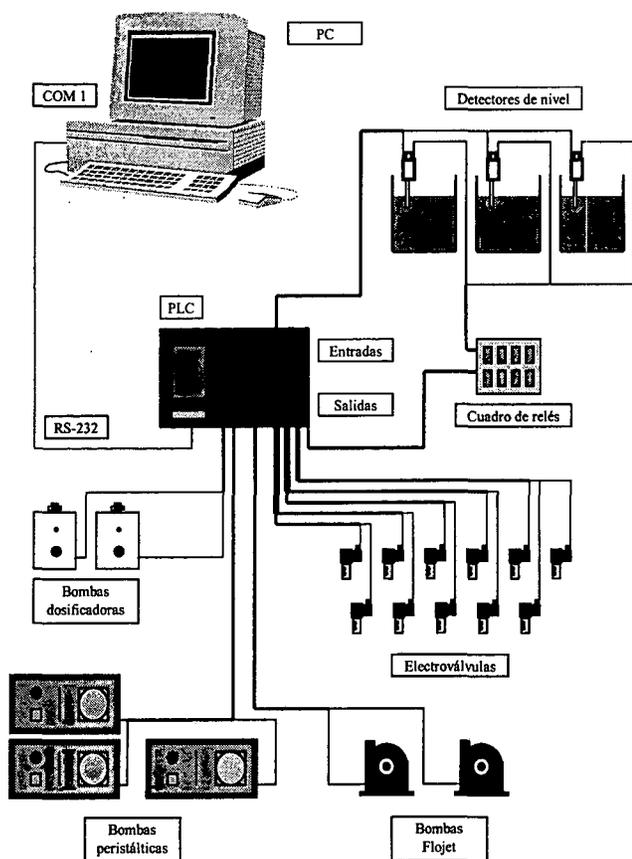


Fig. 4.19. Esquema del PLC con elementos anexos

Mediante este autómatas puede conocerse el estado de entradas y salidas, así como proceder al encendido o apagado directo de salidas, utilizando la conexión RS-232-C con un ordenador personal.

Inicialmente la operación era de modo que la adquisición de datos de los sensores de nivel y la actuación sobre bombas, electroválvulas y relés era efectuada por el PLC, que sólo actuaba como elemento final. El programa de control del ordenador personal era el que efectuaba la toma de decisiones y comunicaba al PLC las acciones a efectuar, en función de los datos obtenidos mediante el PLC.

Este fue el esquema de actuación inicial, un control digital directo (DDC; Digital Direct Control) implementado en el ordenador. El fallo del ordenador podía significar el total descontrol del proceso, tal como ocurrió en algún accidente operacional. Para mejorar el control y aprovechar las características del PLC, se procedió a profundizar en la programación de autómatas. El objetivo era realizar un control digital directo distribuido (DDDC). En este control, el PLC controlaría el proceso tal como lo hacía anteriormente el ordenador, mientras que éste actuaría como supervisor de la operación del PLC, cambiando el modo de operación o substituyéndolo en caso de fallo.

La elaboración de un programa para el PLC consiste en escribir un conjunto de diagramas sobre la base de las instrucciones comentadas en el apartado 3.8.1. El procedimiento que tiene el PLC para ejecutar un programa es efectuar secuencias de exploración de todas de las entradas y salidas utilizadas en intervalos de milisegundos. En función de los valores leídos de esas variables en cada periodo de exploración, va efectuando las acciones especificadas en las líneas de programa.

El programa para manejar los sistemas con funcionamiento encendido / apagado de la planta piloto tiene una longitud total de 118 líneas. Mediante este programa se realizan las siguientes funciones:

- **Control de nivel.** Se activa cada 30 segundos, comprobando el nivel en los tres reactores y el sedimentador y la presencia de algún escape. Se comenta más detalladamente en una sección posterior. Las acciones principales son:
 - Si el nivel en los reactores 1 y 2 supera el nivel prefijado, el PLC señala una alarma y efectúa una parada de la planta para prevenir accidentes.
 - Si el nivel del tercer reactor supera la consigna, enciende la bomba peristáltica, en caso contrario la apaga.
 - Si el nivel del sedimentador sobrepasa un nivel fijado, se enciende una bomba que ayuda a su vaciado.
 - Si detecta un escape de líquido desactiva el programa.

- **Purga.** También se encarga de la purga, activando la electroválvula de purga el tiempo especificado y con la periodicidad programada.
- **Alimentación.** Manda las señales adecuadas a las bombas dosificadoras de concentrado de alimento. Se ha programado una secuencia normal, con dosificación de una pistonada cada cierto tiempo, más una secuencia especial también temporizada, con dosificación múltiple para evitar la acumulación de sólidos y el descebado de las bombas dosificadoras.
- **Control remoto.** Se ha implementado un sistema para poder activar y desactivar el programa del PLC desde el ordenador cuando se desee. También se ha incluido la activación de ciertos relés internos del PLC cuando aparezcan determinados problemas en la planta, por lo que es posible saber desde el ordenador el motivo de la parada de la planta por el PLC. El control remoto también permite la desactivación del programa del PLC y la toma del control directo por el ordenador.

Para que el sistema adquiera ventajas en comparación al control directo desde el ordenador, debe mantenerse un control supervisor sobre el PLC, por lo que las exigencias de comunicación vía RS-232-C prácticamente no disminuyen. Se cambia la lectura de datos y la actuación por sólo la supervisión. También es posible disminuir en gran medida la cadencia de lecturas, pero no es conveniente eliminarlas totalmente.

La ventaja de este esquema de control no sólo se encuentra en la mejora de la seguridad del sistema, sino también la posible mayor dedicación del ordenador a otro tipo de control de más nivel, la supervisión del proceso.

CONTROL DE NIVEL

Los tres reactores están diseñados para poder mantener el nivel de líquido constante. Han sido construidos con dos salidas tubulares laterales a diferente nivel, para poder trabajar con dos volúmenes diferentes dependiendo de las circunstancias.

La diferencia de altura entre los reactores no es suficiente para permitir el trasvase de líquido por gravedad, ya que la pérdida de presión por los tubos de silicona y las posibles electroválvulas intermedias lo impiden. También pueden ser peligrosas las posibles obturaciones de la salida del reactor, por la presencia de acumulaciones de flóculos de lodos activos.

Por todos estos motivos es conveniente forzar la circulación de los fluidos a través de los tubos mediante la utilización de bombas. Gracias a ellas podemos mantener el nivel en los tanques, pero llevan asociado un problema. Para poder mantener el nivel debe utilizarse una velocidad ligeramente superior a la que proporcionaría el caudal justo de líquido. En caso de que la velocidad fuera menor, el líquido introducido se iría acumulando en los reactores y acabaría provocando accidentes.

La consecuencia negativa de la mayor velocidad es que el líquido va acompañado de aire. Esto no es problema cuando el líquido es trasvasado entre los reactores, pero sí que lo es en el caso del sedimentador. La presencia de aire en el líquido que entra en el sedimentador puede provocar la agitación de todo el sedimentador, con la pérdida de la diferenciación entre las zonas de compactación y la de clarificación.

Otro problema relacionado con el nivel de líquido en los reactores es la posible obturación o rotura de un tubo de silicona o de una bomba. Un accidente de este tipo puede provocar el excesivo llenado de un reactor y tener como consecuencia la pérdida de los lodos activos de los reactores.

Para controlar estas situaciones se ha desarrollado un control de nivel que detecta estos sucesos y efectúa las acciones necesarias para evitarlos o en su caso para llevar la planta piloto a un estado seguro que minimice las consecuencias.

Como elementos de control sobre los reactores podemos disponer de los siguientes:

- Elementos sensores:
 - Un detector de nivel para cada reactor y para el sedimentador.
 - Detectores de escape en el suelo.
- Elementos actuadores:
 - Bombas de caudal constante, regulables encendido/apagado desde el ordenador:
 - Bombas neumáticas Flojet
 - Peristálticas

El diagrama de flujo de las acciones que efectúa el control aparece en la figura 4.20.

Como puede observarse en la figura 4.20, se ha establecido un ciclo de acción de 30 segundos, aunque este es un valor fácilmente configurable. El esquema de actuación es el siguiente:

- El programa efectúa la lectura de los sensores de nivel.
- Si la altura del líquido en el tercer reactor es mayor que el nivel consignado, el PLC enciende

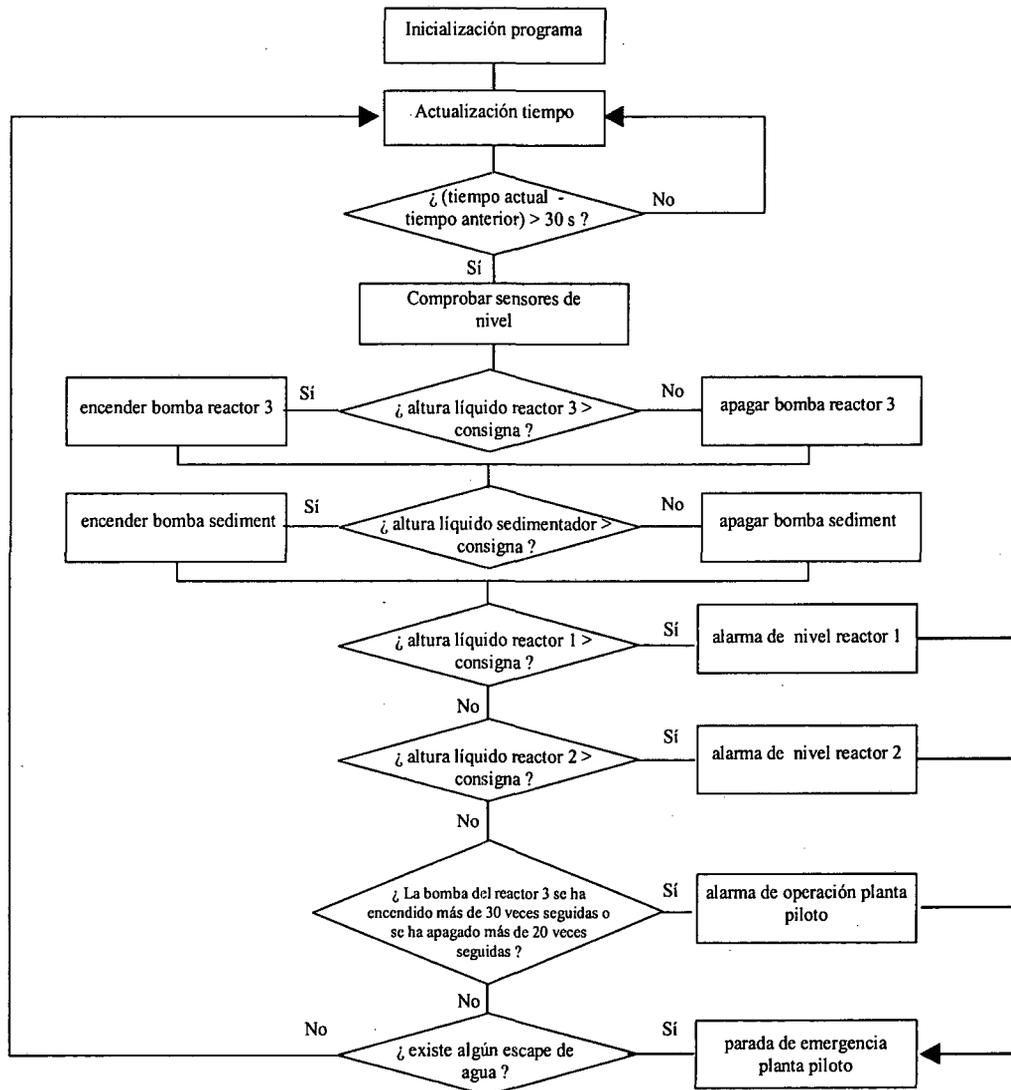


Fig. 4.20. Esquema general del control de nivel

la bomba peristáltica que trasvasa el líquido del tercer tanque al sedimentador. En caso contrario la apaga.

- Si la altura del líquido en el sedimentador es mayor que el nivel consignado, enciende una bomba supletoria para ayudar al vaciado del sedimentador antes de que se produzca un accidente. En caso contrario, apaga la bomba.
- Que la altura de líquido en el reactor 1 o 2 sea mayor que la consigna indica que existe algún problema con las bombas neumáticas Flojet que trasvasan el líquido. Este problema está generalmente motivado porque la bomba se ha bloqueado por algún problema de funcionamiento, o porque ha habido un fallo del compresor general. En este caso se efectúa una parada de emergencia de la planta, para evitar pérdidas de líquido.
- Además de las anteriores comprobaciones, si queremos detectar algún problema como la obturación o la disminución de caudal producida por acumulaciones de biomasa o por el desgaste de los tubos de silicona, es necesario efectuar otro tipo de supervisión. Para ello se crea un registro del número de veces que la bomba del tercer reactor al sedimentador está encendida o apagada. Un registro normal debe llevar una cadencia alrededor de 5 veces encendida y 3 apagada, aunque cuando aparece algún problema como una alarma de nivel en algún tanque, es posible que se aleje de ese margen. Por este motivo se ha experimentado con diferentes valores en el sistema, obteniendo una regla que indica que es muy probable que exista alguna situación problemática no detectada por el control de nivel si la bomba está más de 30 veces seguidas encendida (15 minutos) o más de 20 apagada (10 minutos). Si detecta una situación como las anteriores, se procede a la parada de la planta piloto, incluyendo bombas, alimentación y

entrada de agua, por la sospecha de rotura de algún tubo o mal funcionamiento de alguna bomba.

- Por último se implementó un detector de fugas. Este detector da una señal de alarma cuando existe un escape de agua. El escape puede estar producido por la rotura de algún tubo de silicona de las bombas peristálticas, o la obturación total de alguna bomba Flojet. En este caso también se procede a la parada total de la planta.

Como puede observarse, se trata de un control diseñado basándose en la experiencia adquirida en la utilización de la planta piloto. Puede decirse que es un desarrollo heurístico de un sistema de control.

4.2.8 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para la fabricación del alimento sintético en línea se ha creado un sistema que permite efectuar la dilución de un concentrado de alimento directamente con agua de red. En la figura 4.21 aparecen todos los elementos del sistema de alimentación implementado.

Se han preparado dos concentrados independientes, uno de fuente de carbono y otro de fuente de nitrógeno, para disminuir el peligro de contaminación y poder efectuar variaciones de concentración automáticas. Los dos concentrados se introducen en sendos depósitos de unos 15 litros cada uno, situados en una nevera, para mantenerlos a baja temperatura y minimizar las posibilidades de contaminación.

El alimento concentrado es extraído de los depósitos de la nevera mediante dos bombas dosificadoras de membrana accionadas electromagnéticamente (Modelo DOSAPRO MILTON ROY A773-152M). Estas bombas han sido ajustadas para proporcionar 0.27 cm^3 por cada impulso externo recibido. Los impulsos son proporcionados por el PLC al cerrar las salidas a relé, y desde el ordenador es posible temporizar su cadencia, gracias a lo cual es posible variar la carga orgánica y nitrogenada automáticamente.

Una cadencia normal utilizada es de un impulso para cada bomba dosificadora cada 15 segundos. Además se ha incluido una serie de cinco impulsos cada 5 minutos, con el objetivo de limitar la acumulación de sólidos en los diafragmas de las bombas dosificadoras. Efectuando la suma de esas dosificaciones obtenemos un volumen añadido de unos 1.4 ml de cada concentrado por minuto para cada bomba.

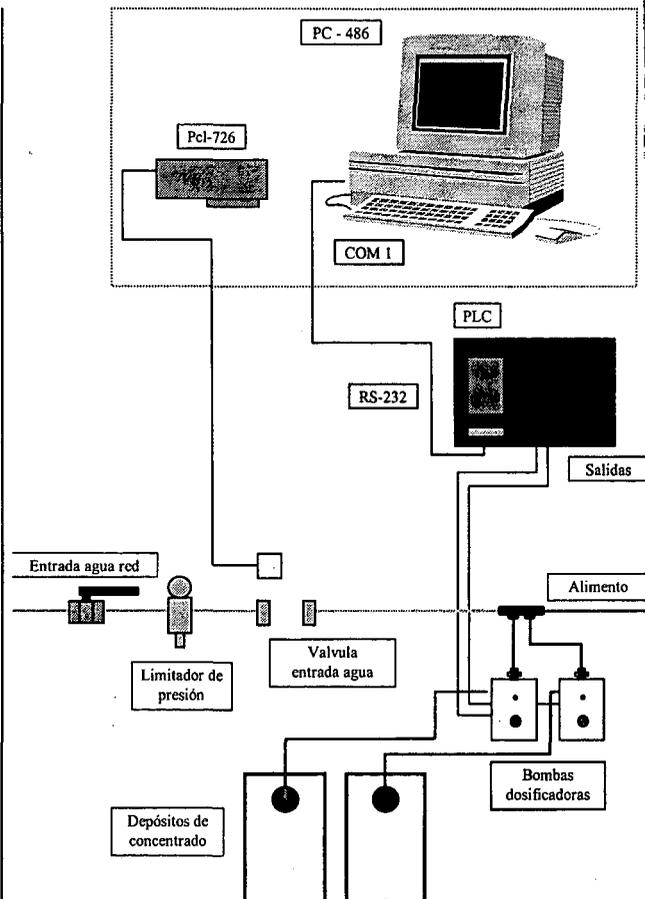


Fig. 4.21. Esquema del sistema de alimentación de la planta piloto

Este concentrado es diluido con agua de red, a razón de unos 300 ml por minuto, lo que produce una dilución aproximada de 1:200. De este modo es posible mantener la planta piloto más de 7 días sin añadir alimento, que en otras condiciones significaría un aporte de agua residual de más de 3000 litros.

El aporte de agua está regulado por una válvula de control, sobre la que se puede actuar mediante una señal de 4 - 20 mA producida por la placa PCL-726 situada en el ordenador. Se ha comprobado experimentalmente la relación existente entre los mA de la señal eléctrica proporcionada a la válvula y el caudal de agua de entrada, obteniéndose un calibrado que indica el caudal de entrada en función de los mA (figura 4.22).

Para evitar oscilaciones a la entrada de la válvula de control se ha situado un elemento inicial, un limitador de presión que atenúa las fluctuaciones de la línea de agua general. Esto permite mantener la validez del calibrado en gran medida.

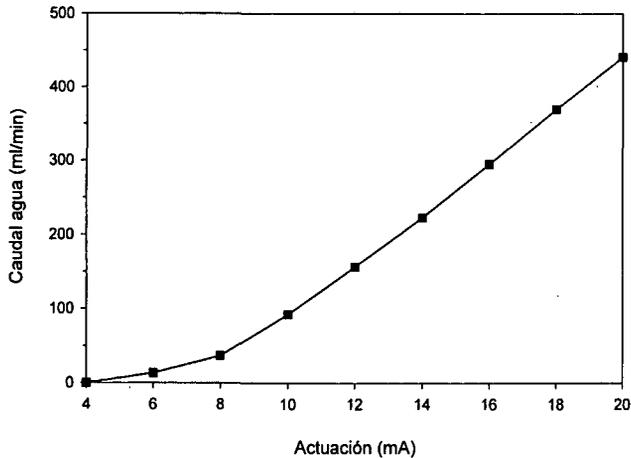


Fig. 4.22. Calibrado mA / (ml/min) de la válvula de entrada de agua

Actualmente se efectúa un control de la alimentación en lazo abierto. Se han calibrado por separado las dos bombas dosificadoras y la válvula de control de agua, y se alimenta regulando estos tres elementos. El sistema completo es comprobado periódicamente, limpiando y calibrando las bombas, así como monitorizando la composición del alimento para que se mantenga dentro del margen previsto.

4.2.9 SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

Para la regulación de los caudales de recirculación externa e interna se utilizan dos bombas dosificadoras regulables desde el ordenador mediante una señal de 4-20 mA.

Para las dos bombas se realiza un calibrado para poder calcular la señal necesaria para obtener el caudal de recirculación deseado. En la figura 4.23 aparecen los dos calibrados para las bombas de recirculación.

Como puede observarse en la figura 4.23, la señal de control permite el cambio de caudal, pero este cambio no tiene una respuesta lineal. Para calcular la señal necesaria para obtener determinado caudal, se toman los dos puntos más cercanos del calibrado y se realiza una estimación lineal entre ellos.

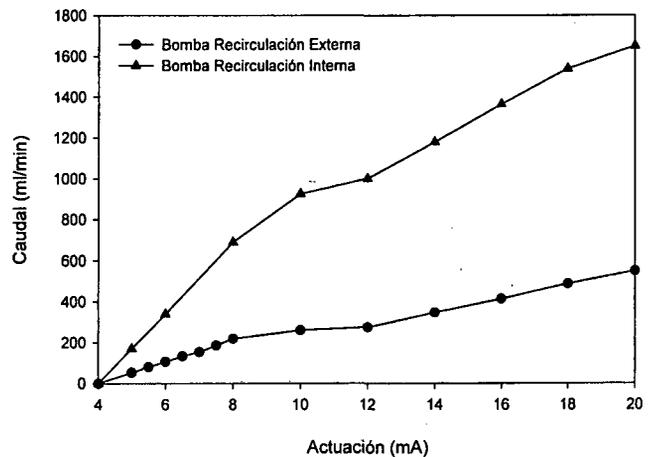


Fig. 4.23. Variación de los caudales de recirculación en función de la señal de control

Los calibrados de estas bombas no son tan estables como los de la válvula de entrada de agua, por lo que se requiere una frecuente recalibración si se desea un valor fiable de caudal.

4.3 PROGRAMAS DE GESTIÓN LOCAL

Para la monitorización y control de la planta piloto y para el control de los analizadores se han desarrollado dos programas con interfaz gráfica, programados en lenguaje C, que permiten la utilización de los elementos antes descritos. Se han programado subrutinas específicas que permiten rápidas implementaciones de cambios en los programas. También se ha implementado un conjunto de gráficos que permiten obtener información directa de las tendencias del proceso. En el caso del programa de la planta piloto se dispone de escalas de 1 hora, 24 horas y 7 días, periodos iguales a los que podemos encontrar en una planta depuradora real. Para los analizadores, se muestra la respuesta del potenciómetro y del colorímetro mediante escalas de 30 a 120 minutos, para mostrar la variación de la respuesta de estos elementos. Estos datos son de gran ayuda para detectar tendencias que anticipen información de los posibles accidentes que aparecen en las depuradoras de aguas residuales o en el funcionamiento de los analizadores. Asimismo se genera un registro de los datos obtenidos, al igual que de las incidencias que acontecen durante el proceso.

Para cada uno de los módulos se ha efectuado un esfuerzo de programación importante, con el objetivo de cumplir los requisitos exigibles a un programa de monitorización y control que debe estar funcionando sin interrupción durante meses [Roffel, 1989]. Existen una serie de características importantes a tener en cuenta en el diseño de un programa de control y monitorización:

- Conviene recalcar que el mundo real y el mundo del software no es el mismo. En el mundo real aparece la concurrencia, muchos sucesos pueden ocurrir simultáneamente. En general, los ordenadores disponen de un solo procesador, por lo que no son capaces de tratar diversos problemas simultáneamente. Para suplir estas limitaciones existen técnicas de programación que intentan tratar este problema.
- En la actualidad, las limitaciones en la potencia de un sistema vienen determinadas por el software disponible. La falta de capacidad del hardware ya no suele ser un problema. El mayor límite en la implementación de un sistema de control está en el diseño y la comprobación de las aplicaciones, tareas que consumen mucho tiempo.

- Son necesarios programas donde sea sencillo implementar una estrategia de control determinada sin demasiada dificultad.
- El sistema debe ser capaz de tomar el valor de los puntos del sistema necesarios y detectar fallos de operación determinados (alarmas). También debe estar protegido contra entradas y salidas de datos erróneos, deben validarse las entradas y las salidas. Debería comprobarse si se encuentran dentro del margen posible de la señal, y si la variación respecto a la última señal registrada ha sido posible.
- Todo sistema debe tener capacidad de puesta en marcha automática, tras un error o fallo de corriente, creando un registro de estas incidencias.
- Control del tiempo de ejecución, monitorización de la carga a que se somete el sistema, detección de sobrecargas y diseño para evitar las sobrecargas que aumenten los retrasos en la ejecución. Alarmas de sobrecarga de la aplicación.
- Documentación del programa. Manuales de software y hardware.

Para el diseño de los módulos de programa es importante tener en cuenta ciertas características:

- Diseño de acuerdo con una estructura jerárquica.
- Limite al tamaño del módulo.
- Cada módulo debe tener una entrada y una salida, salvo caso de error.
- Los módulos entrada/salida y de operaciones no deberían terminar o suspender la ejecución del programa, sino pasar un código de error al programa principal. Éste debe tratar esos errores realizando las acciones correctoras necesarias.
- Limitar el número de funciones por módulo
- Los parámetros del sistema deben ser definibles externamente, no deben introducirse numéricamente en el código fuente.
- Debe utilizarse programación lógica estructurada.
- Es aconsejable la menor dependencia de la máquina.
- El diseño modular permite la creación de código reutilizable con mínimos cambios en otros sistemas.

4.3.1 PROGRAMA DE CONTROL DE LA PLANTA PILOTO

Para la creación de este programa se ha procurado tener en cuenta todas las características anteriores,

obteniéndose un programa que ha demostrado su robustez, capacidad de control y respuesta a accidentes.

El esquema general de este programa, con los módulos que lo componen, se muestra en la figura 4.24. Cada módulo representado tiene su utilidad y sus características concretas que serán brevemente comentadas a continuación:

- **Fichero de configuración.** En este fichero es introducida la configuración básica de funcionamiento de la planta piloto, leyéndose automáticamente al empezar el programa. Todos los parámetros de control de tiempos no han sido introducidos numéricamente en el código fuente, han sido utilizadas variables que toman el valor del fichero de configuración. Esto permite efectuar cambios de operación sin necesidad de recompilar el programa. Los datos de este fichero son los que utiliza la planta por defecto, pero el programa puede recibir nuevos parámetros de operación desde el sistema experto.

Los parámetros variables en este fichero son los siguientes:

- Intervalo de control de oxígeno
- Intervalo de estimación del consumo de oxígeno (OUR)
- Intervalo de dosificación bombas
- Intervalo de limpieza bombas dosificadoras
- Número de dosificaciones de limpieza de las bombas dosificadoras
- Intervalo de supervisión del PLC
- Intervalo de toma de datos en el fichero
- Intervalo de tiempo entre purgas
- Duración de la purga

- Tiempo de actualización de la gráfica en pantalla
- Caudal de entrada de agua
- Caudal de recirculación interna
- Caudal de recirculación externa
- Tiempo bombas Flojet encendidas
- Tiempo bombas Flojet apagadas
- Velocidad de los agitadores
- Parámetros del control de oxígeno
 - Consignas
 - Ganancias controladores
 - Constantes de tiempo integral
 - Constantes de tiempo derivado
 - Activación o desactivación control PID
 - Valor de la aireación si el control PID está desactivado
- Parámetros de la correlación oxígeno - mV

También existe un segundo fichero utilizado para definir el perfil diario de alimentación variable. Este fichero permite definir una carga de entrada variable, para poder simular el comportamiento del influente en una planta depuradora real. En él se introducen, para cada hora, valores de caudal de agua, intervalo de dosificación de carbono e intervalo de dosificación de nitrógeno. También se define un parámetro que permite la utilización de la entrada fija (proporcionada en el fichero anterior) o la entrada variable de este fichero.

- **Monitorización.** Se ha desarrollado un conjunto de funciones gráficas en C para DOS que permite efectuar el seguimiento de las variables monitorizadas y actuadas. Se han desarrollado funciones para representar pH, temperatura, redox, oxígeno disuelto y actuación en mA de las válvulas de control de aire, todo ello con escalas de una hora, un día y una semana.

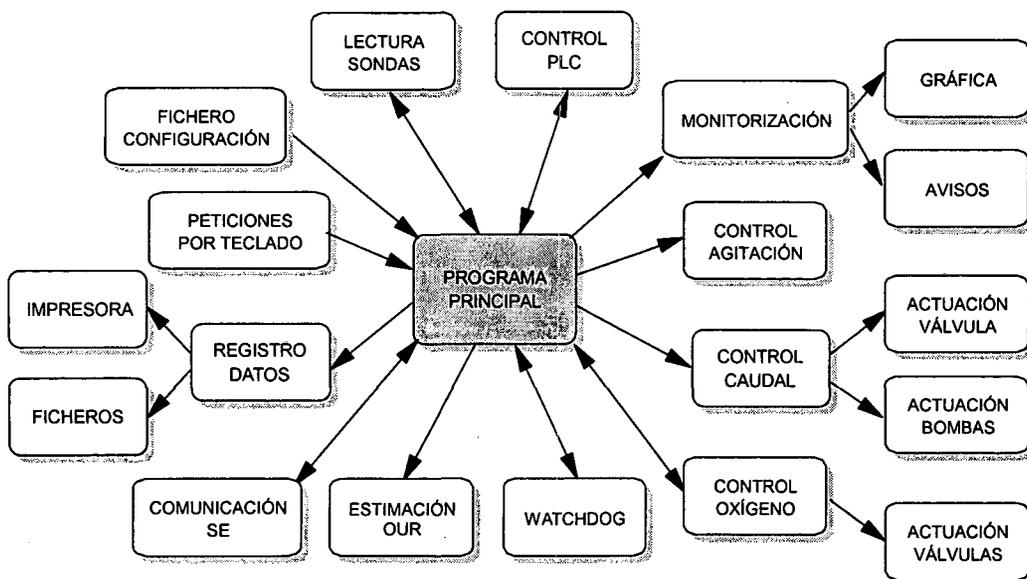


Fig. 4.24 Módulos que componen el programa de monitorización y control

Las opciones que existen para las tres escalas de tiempo son las siguientes:

- Gráfica del pH en los tres reactores
- Gráfica de la temperatura en los tres reactores
- Gráfica del potencial redox en los tres reactores
- Gráfica del oxígeno disuelto en los tres reactores
- Gráfica de la actuación del control de oxígeno disuelto en los tres reactores
- Gráfica de las cinco anteriores variables para cada reactor por separado

Aparte del tratamiento de las variables analógicas, también se ha desarrollado un gráfico para monitorizar las salidas del PLC.

Por último también se ha desarrollado una pantalla de avisos de operación, en la que se indican las acciones de control que se van realizando, los cambios de consigna realizados por el sistema experto y las alarmas de operación de la planta piloto.

- **Lectura sondas.** Se han programado las funciones necesarias para la comunicación con los controladores de sondas pHrocon y el tratamiento de las cadenas de caracteres enviadas en ambas direcciones para convertirlas en medidas utilizables en el ordenador.
- **Control PLC.** Se han desarrollado un conjunto de funciones para la utilización del PLC a bajo nivel. Con ellas es posible monitorizar el estado de las salidas, entradas, relés internos, contadores, así como efectuar el encendido y apagado de salidas. El sistema puede funcionar de dos modos. En el primero, el PLC funciona autónomamente realizando el control de nivel, la dosificación de alimento y la purga, mientras el programa del PC supervisa su funcionamiento. En el segundo modo, el PC realiza todas las funciones anteriores y el PLC únicamente actúa como elemento final del sistema de control.
- **Control de oxígeno.** Se han programado las funciones necesarias para establecer un control digital PID con variable controlada el oxígeno disuelto en los reactores y como variable actuada la abertura de las válvulas de aireación. Se han desarrollado funciones para manejar la placa PCL-726 que controla los lazos de corriente de 4-20 mA que regulan las válvulas de control. El control de oxígeno se explica más detalladamente en el apartado 4.2.5.
- **Registro de datos fichero.** Se ha trabajado en la programación para la generación de registros de datos promediados de las lecturas de las sondas.

Cada lunes a la ocho de la mañana es generado automáticamente un fichero con los datos registrados de esa semana. Además de los datos de las lecturas de sondas, se genera un registro de todas las incidencias ocurridas en la operación, como alarmas de nivel, de operación o cambios de consignas.

También se genera semanalmente un fichero con las gráficas tal como aparecen en pantalla. Este fichero puede ser leído por otro programa desarrollado, versión reducida a las aplicaciones gráficas del programa de monitorización y control. Esto permite efectuar un seguimiento semanal sin necesidad de efectuar un tratamiento gráfico posterior de los datos registrados.

- **Registro de datos impresora.** Para el registro por escrito de las alarmas de operación se han desarrollado funciones para manejar una impresora directamente desde el programa. Estas funciones son utilizadas para avisar al operador de las alarmas detectadas (las mismas que se almacenan en el fichero de alarmas).
- **Control de caudal.** Se han utilizado las funciones creadas para manejar la placa PCL-726 con el objetivo de regular el caudal de agua de entrada y los caudales de recirculación.
- **Control de agitadores.** Se han programado las funciones necesarias para manejar los variadores de frecuencia que regulan la velocidad de los motores de los agitadores. Las funciones desarrolladas permiten variación de velocidad, apagado normal, apagado de seguridad y modificación de otros parámetros de control para cada uno de los agitadores o para los tres simultáneamente.
- **Comunicación Sistema Experto.** Se han desarrollado todas las funciones necesarias para el intercambio de datos entre el programa de monitorización y control de la planta piloto en el PC con el SE mediante protocolo TCP/IP, tal como se explica detalladamente en la sección 4.4.1.
- **Estimación OUR.** Se ha programado un proceso de estimación del consumo de oxígeno en los reactores aeróbicos. Tal como se ha comentado en el apartado 4.2.6, se trata de evitar el aporte de oxígeno durante un periodo de unos 30 segundos y observar la variación del oxígeno disuelto en el reactor.
- **"Watchdog".** Este módulo se encarga de controlar que no se pare la ejecución del programa por algún problema inesperado. En caso de que suceda, reinicializa el sistema.

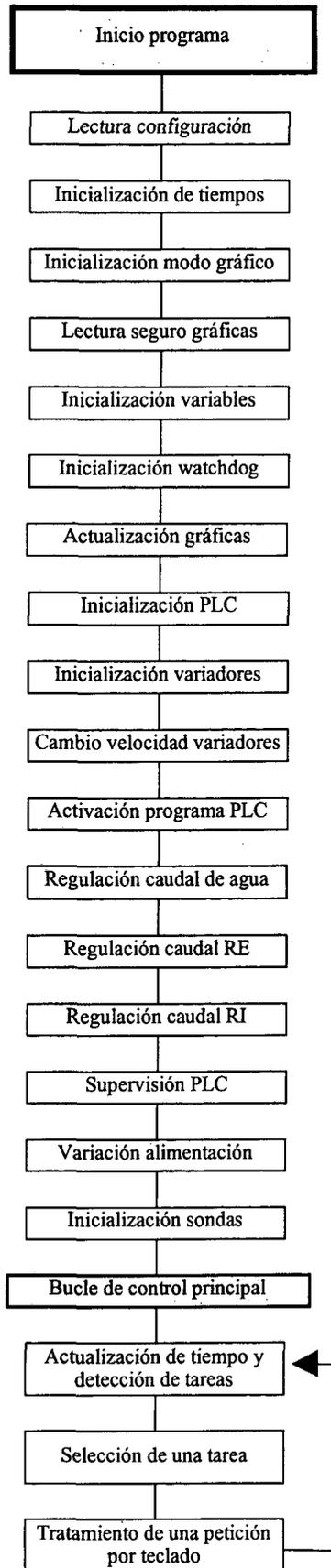


Fig. 4.25. Diagrama de flujo del programa de monitorización y control

- **Tratamiento de peticiones.** También se ha tenido en cuenta la posible actuación manual sobre todos los elementos, por lo que se han programado una interfaz gráfica que permite efectuar el tratamiento de las peticiones de los usuarios finales por teclado.

El programa completo está programado en varios módulos independientes, con un tamaño total de unas 7000 líneas de programa (unas 100 páginas). Se ha programado modularmente para permitir el aprovechamiento de los módulos independientes en la fabricación de otros programas de monitorización y control.

Considerando las diferentes versiones desarrolladas, el programa de monitorización y control ha trabajado más de cuatro años demostrando su utilidad, flexibilidad y fiabilidad.

El diagrama de flujo del programa de monitorización y control está representado en la figura 4.25. En esta figura se remarcan las acciones de inicialización del sistema y se muestra esquemáticamente el funcionamiento del bucle de control principal del programa.

En el módulo de actualización de tiempo y detección de tareas, se comprueba para qué tareas ha transcurrido el tiempo prefijado para cada repetición. Conviene remarcar que estos valores pueden ser modificados fácilmente, editando simplemente el fichero de configuración de la planta piloto o recibiendo nuevos valores desde el SE.

Del conjunto de tareas detectadas por el módulo anterior, el módulo de selección de tareas (figura 4.26), decide cuál de esas tareas es más prioritaria y posteriormente la realiza. Después de ejecutarla, devuelve el control al bucle principal. Éste último llama al módulo de tratamiento de peticiones por teclado (figura 4.27), que ejecuta la petición más antigua y devuelve el control al bucle principal. Este llama de nuevo al módulo de actualización de tiempo y detección de tareas, con lo que repite el ciclo de control principal.

El sistema programado de este modo permite que el programa no funcione de una manera secuencial, sino que ejecute siempre las acciones más prioritarias. Por ejemplo, si ha transcurrido el tiempo consiguado para el control de oxígeno y para redibujar la gráfica de monitorización, el programa siempre realizará el control de oxígeno en primer lugar. Además, el sistema puede llamar más de una vez al mismo módulo antes de llamar al módulo de la otra acción menos prioritaria. Este esquema de operación le hace más robusto y permite un tiempo de respuesta menor para las acciones prioritarias.

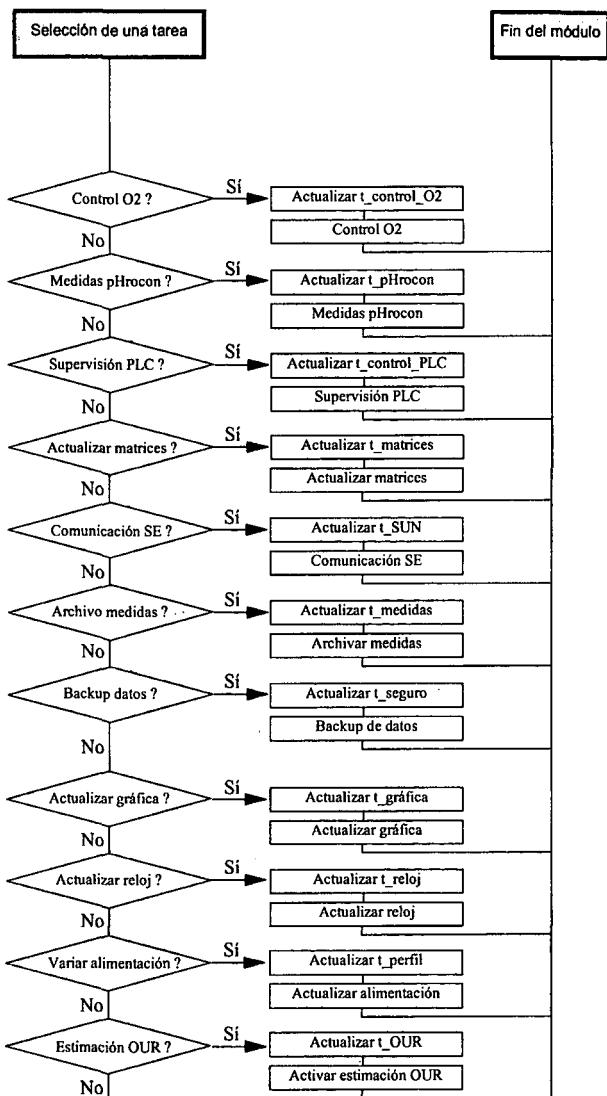


Fig. 4.26. Módulo de selección de tareas

En la página siguiente puede observarse la interfaz gráfica del programa en las figuras 4.28 y 4.29, en dos situaciones diferentes. En la primera se muestra la evolución del potencial redox en los tres reactores a lo largo de una semana, partiendo de una situación inicial con los tres reactores iguales, para posteriormente disminuir de forma progresiva el potencial redox en el primero al aumentar la desnitrificación. En el segundo gráfico puede observarse la evolución de las variables de un reactor en un periodo de 24 horas.

Además de los gráficos del programa es posible acceder a la información de los ficheros de datos y representarlos gráficamente con otro programa externo. Una muestra de los datos registrados, aparece en las figuras 4.30 y 4.31.

En el tratamiento de los datos se ha establecido una numeración basada en los días transcurridos desde el día 17 de marzo de 1995, día en que se comenzaron

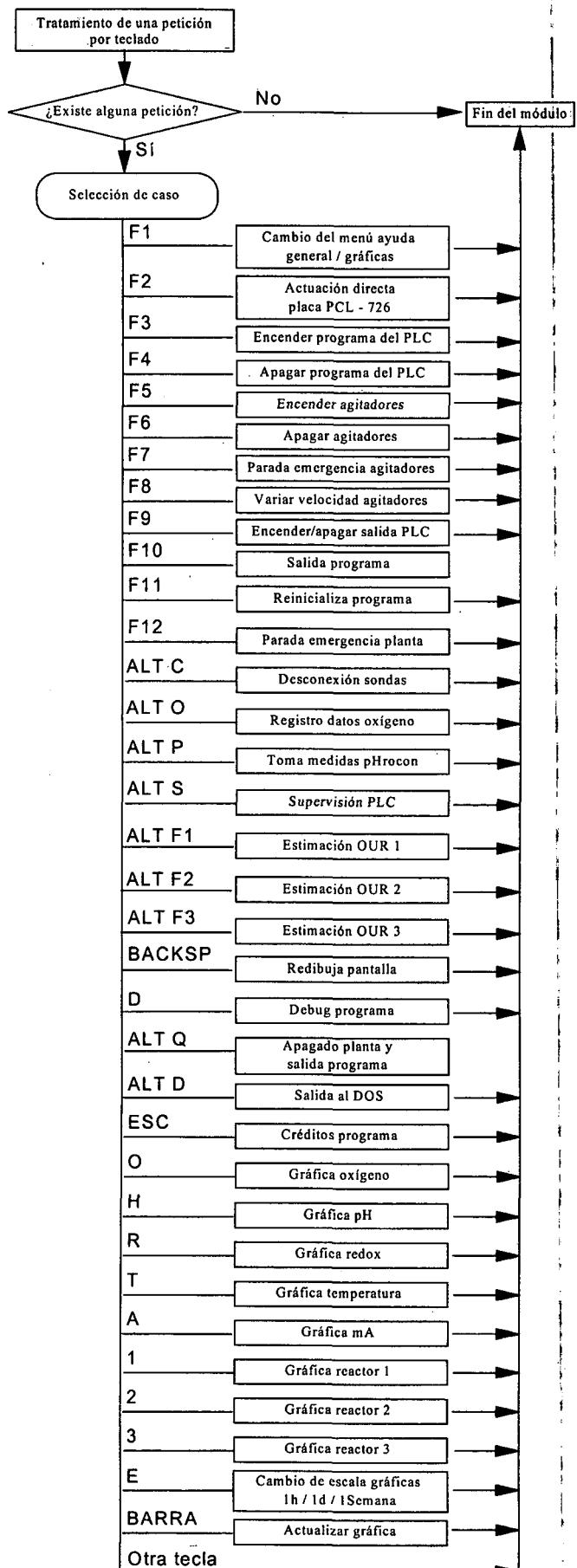


Fig. 4.27. Módulo de tratamiento de peticiones por teclado

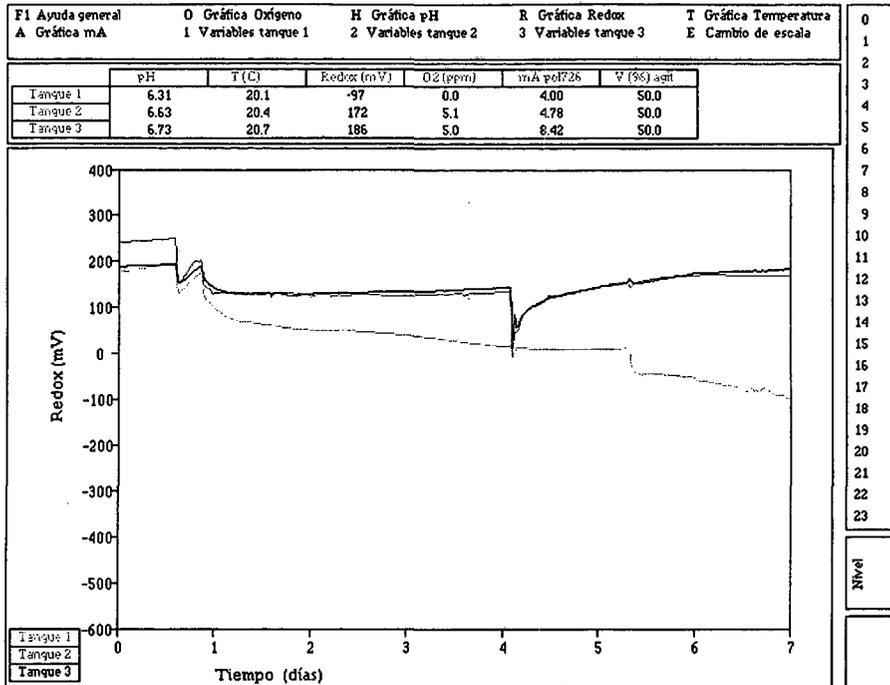


Fig. 4.28. Evolución del potencial redox en los tres reactores durante una semana

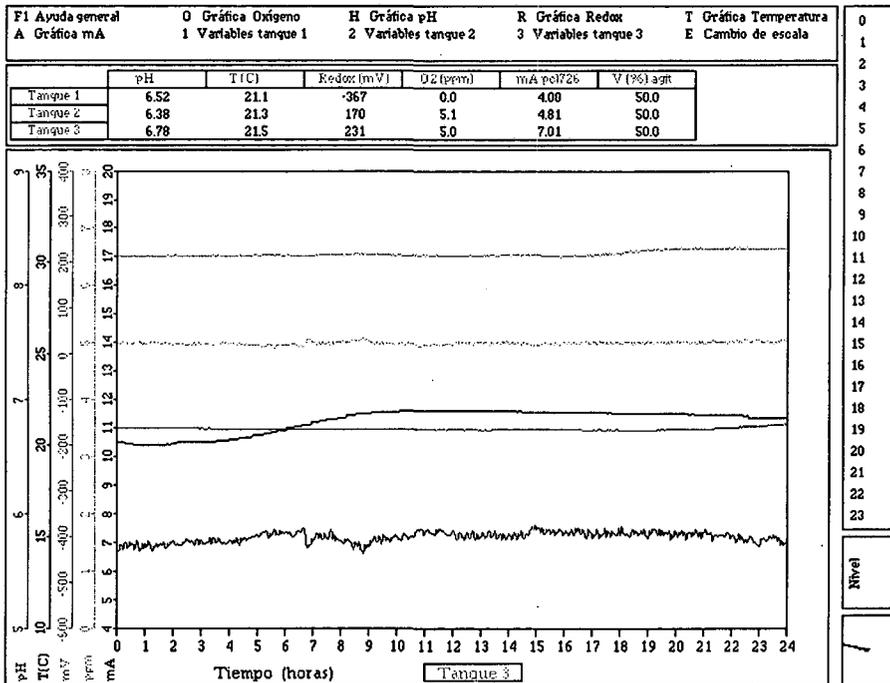


Fig. 4.29. Evolución de las variables de un reactor durante 24 horas

a efectuar las primeras pruebas con lodos activos con la planta piloto instalada en el Departament d'Enginyeria Química de la U.A.B.

Para dibujar las gráficas se ha partido de los datos del fichero, con la situación de la planta cada cinco minutos. Se han efectuado promedios de los valores con el objetivo de obtener medias de la operación de aproximadamente un dato de cada variable cada dos horas. Con los 17.000 datos obtenidos es posible visualizar una evolución de las variables en todo el tiempo de operación de la planta, unos 1400 días.

En la figura 4.30 se representa la variación de la temperatura en el reactor 3 a lo largo de los 4 años de experimentos. Se puede observar la variación

estacional de temperatura, con valores entre 30 °C en verano a 15 °C en invierno. También se observan los dos únicos periodos en que la planta no estuvo en funcionamiento, sobre los 500 y sobre los 700 días de operación.

En la figura 4.31 se representa el pH del reactor 3 durante el mismo periodo. Se aprecian valores entre 6 y 7 para casi todo el periodo de operación de la planta. También se observan algunos problemas de funcionamiento de las sondas, que provocan valores de pH erróneos, provocados generalmente por el deterioro del electrodo. Finalmente, se puede observar el último periodo de operación con control de pH y consigna 7.5, en el que se mantiene el valor fijado adecuadamente durante casi todo el tiempo.

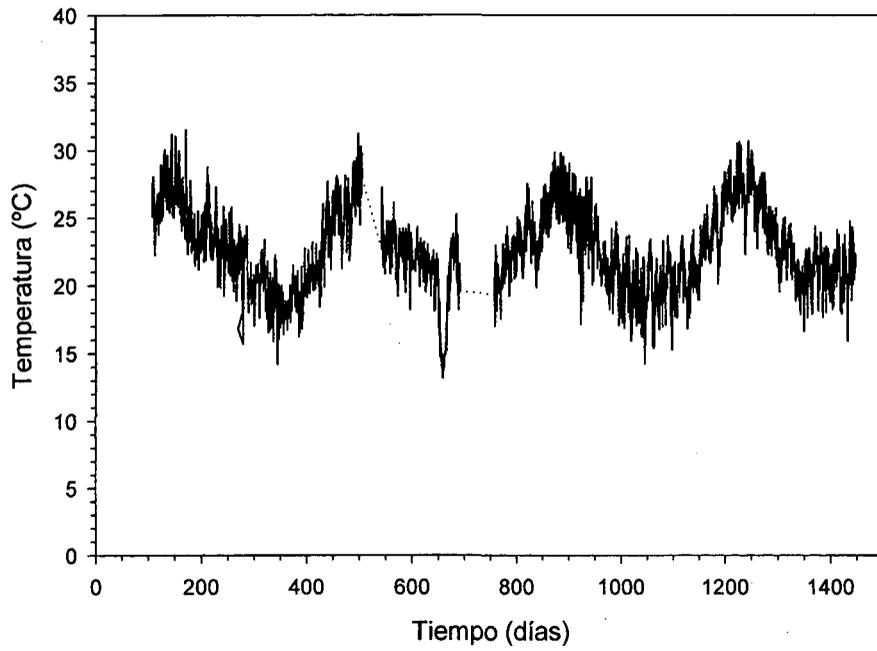


Fig. 4.30. Evolución de la temperatura del reactor 3 a lo largo de 1400 días de monitorización

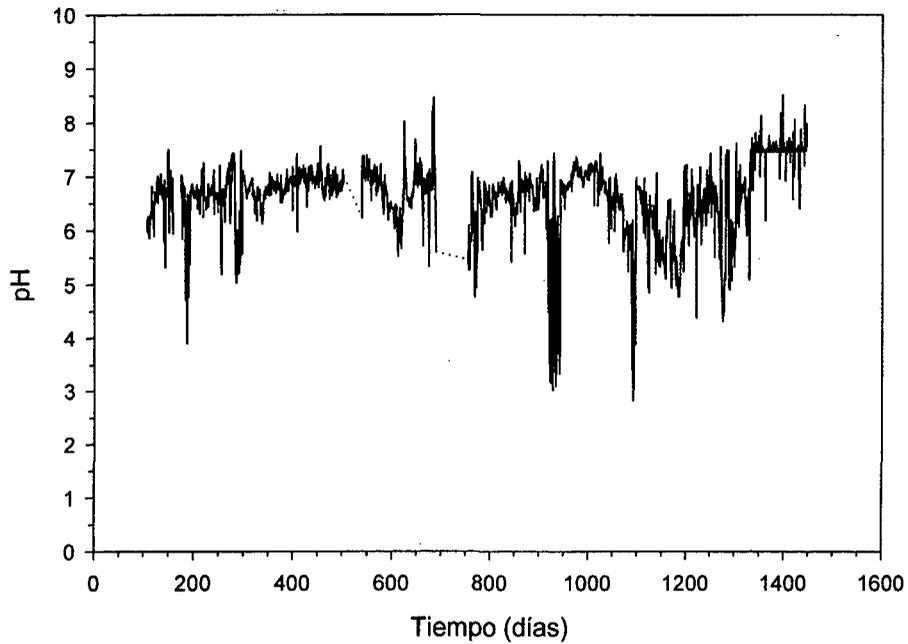


Fig. 4.31. Evolución de pH del reactor 3 a lo largo de 1400 días de monitorización

4.3.2 PROGRAMA DE CONTROL DEL SISTEMA ANALÍTICO

El programa para el control de los analizadores y el sistema de toma de muestras también se trata de un programa modular. En la figura 4.32 se representan sus módulos constituyentes. Cada módulo representado tiene su utilidad y sus características concretas que serán brevemente comentadas a continuación:

- **Fichero de configuración.** En este fichero se introduce la configuración básica de funcionamiento de los analizadores, leyéndose automáticamente al empezar el programa. Al igual que el anterior programa, los parámetros de control de tiempos no han sido introducidos numéricamente en el código fuente, han sido utilizadas variables que toman el valor del fichero de configuración. Esto permite efectuar cambios de operación sin necesidad de recompilar el programa.

Los parámetros variables son los siguientes:

- tiempo de estabilización del sistema
- tiempo de inicio de cálculo de la línea base operación normal
- tiempo de final de cálculo de la línea base
- número de inyecciones entre calibrados de nitrato
- tiempo de inicio de lectura de la detección del pico 1
- tiempo de inicio de lectura de la detección del pico 2
- tiempo de retorno a la posición "load" (carga el loop)

- tiempo de retorno a la posición de inyección
- tiempo entre patrón nitrato 50 ppm y 30 ppm
- tiempo entre patrón nitrato 50 ppm y 15 ppm
- tiempo entre patrón nitrato 50 ppm y 5 ppm
- tiempo entre patrón nitrato 50 ppm y 1 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 3 ppm y 2 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 3 ppm y 1 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 3 ppm y 0.5 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 7 ppm y 5 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 7 ppm y 3 ppm
- tiempo entre patrón nitrito 7 ppm y 1 ppm
- tiempo inicio cálculo línea base en calibrado nitrato
- tiempo final cálculo línea base en calibrado nitrato
- error máximo aceptado entre dos picos consecutivos en el calibrado de nitrato (mUA)
- tiempo para el cambio del punto de muestreo
- tiempo para la lectura de los mV para el cálculo de amonio

- **Monitorización.** Se ha desarrollado un conjunto de funciones gráficas en C para DOS que permite efectuar el seguimiento de la respuesta del potenciómetro del equipo CFA y del colorímetro del equipo FIA, con escalas de media hora a dos horas.

Aparte del tratamiento de las variables analógicas, también se ha desarrollado un gráfico para monitorizar las salidas de la placa PCL-711.

Por último el programa también dispone de una pantalla donde se pueden leer todas las acciones que va realizando el programa.

- **Control de analizadores.** Se han programado las funciones necesarias para el control de los dos

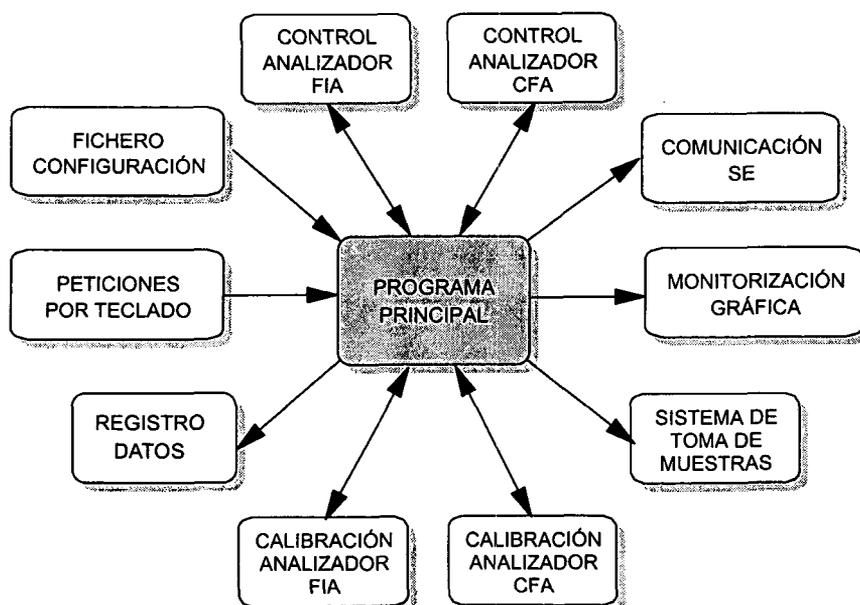


Fig. 4.32 Módulos que componen el programa de control de los analizadores

analizadores EASI. Para ello se ha desarrollado un módulo de comunicación que permite el intercambio de mensajes entre el ordenador y cada uno de los módulos independientes que conforman cada analizador.

- **Calibración analizadores.** Se han desarrollado las funciones necesarias para la calibración de cada analizador. Se pueden calibrar los dos picos del analizador FIA y la respuesta del analizador CFA. Se ha automatizado el calibrado de nitrato y amonio, mediante la utilización de las electroválvulas de los analizadores y de soluciones estándar de nitrato (50 mg/l) y amonio (5 y 50 mg/l). El calibrado puede realizarse por petición manual o automáticamente cada cierto tiempo preprogramado.
- **Sistema de toma de muestras.** Se ha programado un módulo que permite el cambio automático del punto de toma de muestras. El programa enciende o apaga las salidas de la placa PCL-711 necesarias, correspondientes a determinadas electroválvulas, para obtener un circuito de toma de muestras con principio y final en el mismo punto de toma de muestras.
- **Registro de datos fichero.** Se ha trabajado en la programación para la generación de registros de datos de medidas de absorbancia del colorímetro, mV del potenciómetro y las medidas calculadas de nitrato, nitrito y amonio.
- **Comunicación Sistema Experto.** Se han desarrollado todas las funciones necesarias para el intercambio de datos entre el programa de control de los analizadores y el SE mediante protocolo TCP/IP, tal como se explica detalladamente en la sección 4.4.1.
- **Tratamiento de peticiones.** También se ha tenido en cuenta la posible actuación manual sobre todos los elementos, por lo que se han programado una interfaz gráfica que permite efectuar el tratamiento de las peticiones de los usuarios finales por teclado.

El programa completo, programado en varios módulos independientes, tiene un tamaño total de unas 3900 líneas de programa (unas 55 páginas). También se ha programado modularmente para permitir el aprovechamiento de los módulos independientes en la fabricación de otros programas.

El programa de control de los analizadores, en sus diferentes versiones, ha trabajado durante más de dos años demostrando su utilidad, flexibilidad y fiabilidad.

El diagrama de flujo del programa de control de los analizadores está representado en la figura 4.33. En esta figura se remarcan las acciones de inicialización del sistema y se muestra el esquema de funcionamiento del bucle de control principal del programa.

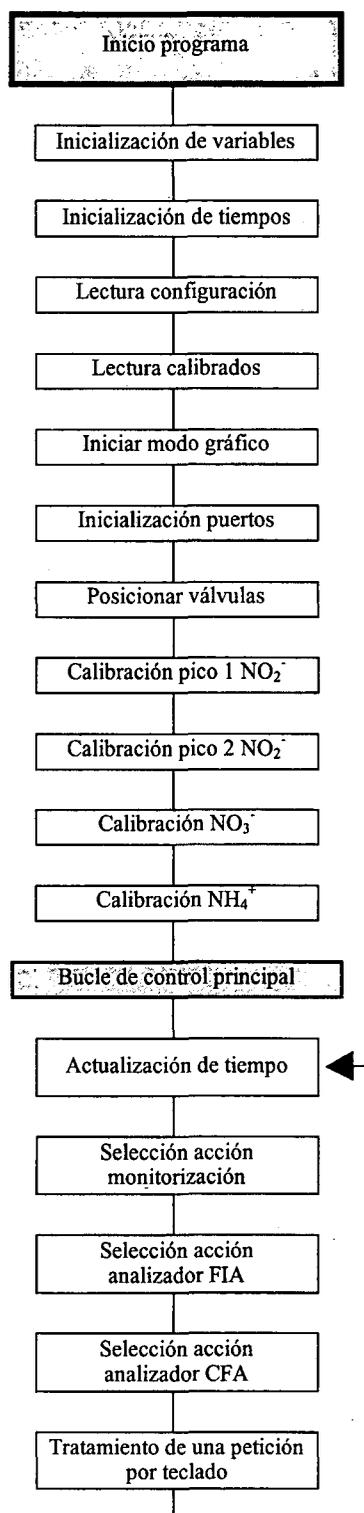


Fig. 4.33. Diagrama de flujo del programa de control de los analizadores

Después de la inicialización del programa y de los analizadores, se puede realizar el calibrado de los equipos. Los procedimientos de calibración no son obligatorios; si no se realizan se toma el último calibrado. Después de la inicialización, se entra dentro del bucle de control principal. En él se actualizan en primer lugar el tiempo de ejecución. Posteriormente se comprueba si es necesaria alguna acción de monitorización tal como la actualización de gráficos o pantallas. Después de las tareas básicas, se procede a la realización de las acciones necesarias para el equipo FIA y posteriormente para el CFA. Por último, se procede al tratamiento de alguna posible petición por teclado (figura 4.34).

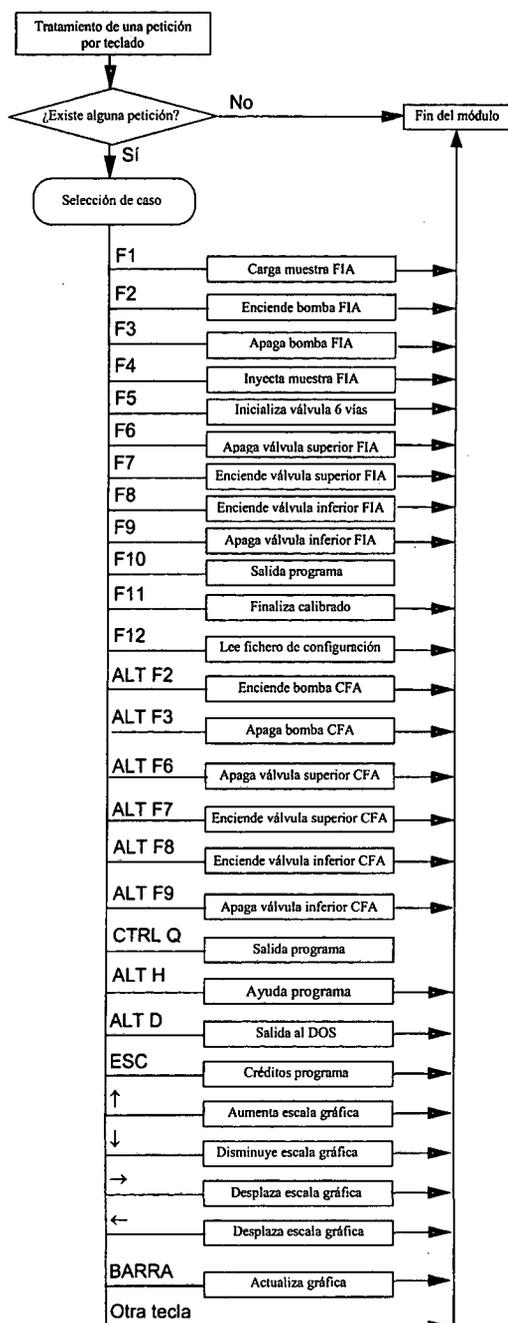


Fig. 4.34. Módulo de tratamiento de peticiones por teclado

La selección de la acción de los analizadores se ha programado de un modo estructurado, para evitar el funcionamiento incorrecto y para clarificar la secuencia de operaciones a realizar.

En la figura 4.35 se muestra la secuencia establecida para el analizador FIA. El procedimiento empieza para un valor de CASO = 0. Al entrar en la selección con este valor, el programa toma un valor de absorbancia para el cálculo de la línea base. Si no ha transcurrido el tiempo fijado para el cálculo de la línea base, el módulo finaliza y se vuelve al control principal. Mientras el tiempo transcurrido es inferior al tiempo de cálculo de la línea base, el programa sigue tomando medidas y calculando el promedio de línea base. Una vez transcurrido ese tiempo, se le suma 1 al valor de CASO, con lo que toma el valor de CASO = 1. La siguiente vez que el bucle de control principal llama a este módulo, éste realiza las acciones necesarias para cargar el "loop" de inyección, y posteriormente incrementa CASO a 2. Con este valor, el módulo únicamente comprueba si ha transcurrido el tiempo necesario para empezar a detectar el primer pico. Cuando esta condición se cumple, CASO se incrementa a 3, y en posteriores llamadas se empieza a buscar el máximo. Una vez detectado, el módulo cambia el valor de CASO a 4, donde se va a comprobar en posteriores llamadas desde el control principal, si ha transcurrido el tiempo necesario para empezar a detectar el segundo pico. Cuando transcurre este tiempo, CASO toma el valor de 5, por lo que se comienza a detectar el segundo pico. En posteriores llamadas del módulo, se detecta el pico, y cuando esto sucede el valor de CASO es modificado, tomando un valor de 6. El módulo mantiene este valor hasta que ha transcurrido el tiempo fijado entre inyecciones consecutivas. Cuando el tiempo es igual al prefijado, el sistema inyecta una nueva muestra, el valor de CASO se inicializa a 0 y el módulo vuelve a realizar los mismos pasos anteriores.

Para el analizador CFA el procedimiento es más sencillo (figura 4.36). En primer lugar (CASO = 0) se permite el cambio de muestra automática a manual, durante un minuto antes del cambio de punto de muestra. Esto permite la medida de una muestra manual en el siguiente ciclo del módulo, ya que la respuesta del sistema es bastante lenta. Cuando transcurre ese tiempo, CASO toma el valor de 1, por lo que en posteriores llamadas al módulo se comprueba si ha transcurrido el tiempo de cambio de punto de toma de muestras. Cuando esto sucede, el sistema cambia el punto de muestreo, siempre que no se halla establecido muestra manual en el punto anterior. El paso siguiente (CASO = 2) comprueba que halla transcurrido el tiempo prefijado para la lectura del potenciómetro, y cuando esto sucede lee ese dato y calcula el valor correspondiente de nitrógeno amoniacal. En el último valor de CASO = 4, el sistema espera que transcurra el tiempo de ciclo total fijado en el archivo de datos, y

cuando así es, reinicializa CASO al valor 0, con lo que se repiten los pasos anteriores.

Fig. 4.35. Módulo de selección de tareas analizador FIA

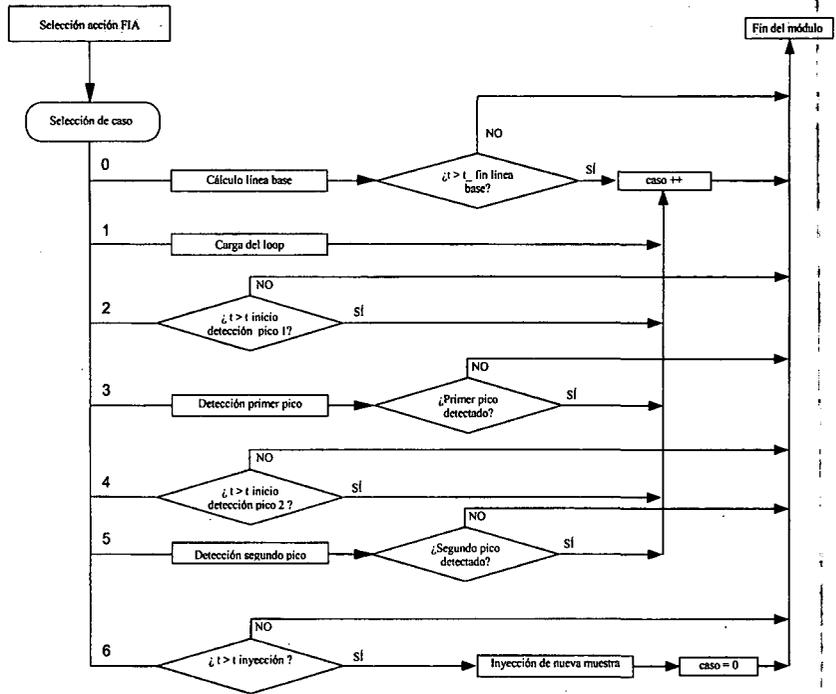
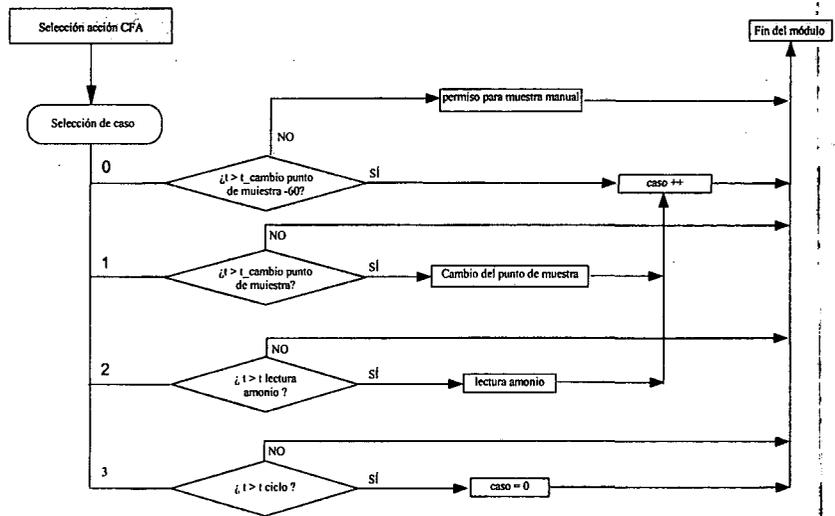


Fig. 4.36. Módulo de selección de tareas para el analizador CFA



Por último se muestra en las figuras 4.37 y 4.38 la interfaz gráfica del programa, en la pantalla de presentación y en el inicio del primer calibrado del analizador.



Fig. 4.37. Interfaz gráfica del programa

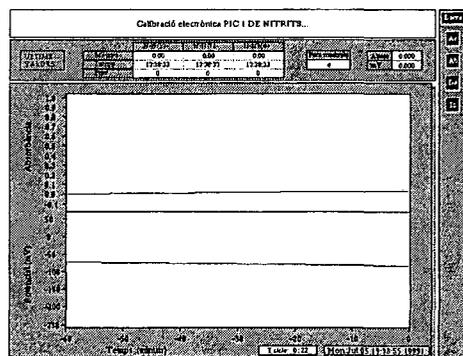


Fig. 4.38. Interfaz gráfica del programa en un calibrado

4.4 GESTIÓN INTEGRADA DE LA INFORMACIÓN. SERVIDOR DE DATOS Y HTML

Para el intercambio de datos entre el SE y los sistemas externos se han desarrollado dos herramientas diferentes: la transmisión de datos TCP/IP y la transmisión de datos mediante HTML. La primera se utiliza para la transmisión de datos en tiempo real entre el SE y los dos ordenadores de control o cualquier ordenador conectado a Internet. La segunda se utiliza para el envío de datos analíticos "off-line" al SE desde cualquier ordenador.

4.4.1 TRANSMISIÓN DE DATOS TCP/IP

Hasta este momento disponemos de una planta piloto depuradora de aguas residuales urbanas, monitorizada y controlada por un ordenador de proceso. Este ordenador puede funcionar independientemente, encargándose de todas las tareas necesarias para su mantenimiento: alimentación, control de nivel, tratamiento de accidentes, monitorización...

Un objetivo de este trabajo es la utilización del sistema experto G2 para la supervisión y el control supervisor de la planta piloto. Para utilizar el sistema experto en tiempo real, éste debe poder recibir los datos del sistema a medida que la planta piloto dispone de ellos. Además debe ser capaz de efectuar determinadas acciones de control sobre ella. Para este propósito es necesario construir un sistema de comunicación bidireccional planta piloto ↔ sistema experto para que ambos dejen de ser sistemas aislados. Este sistema debe permitir a G2 requerir y enviar información en cualquier momento y con el mínimo tiempo de espera posible.

Para solucionar el problema de la comunicación entre ordenadores se ha utilizado el protocolo TCP/IP sobre la red Ethernet instalada. El esquema físico del sistema implementado puede observarse en la figura 4.39.

De este modo se permite la comunicación entre cualquier ordenador unido físicamente a cualquier red conectada a Internet, es decir, puede utilizarse cualquier fuente de datos conectada a Internet, por ejemplo, podría manejarse del mismo modo la planta piloto si estuviera instalada en la Universitat de Girona.

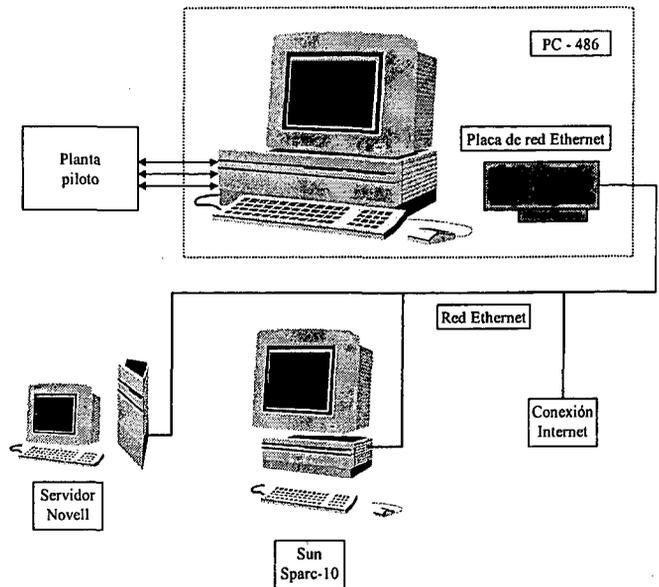


Fig. 4.39. Esquema de la conexión Ethernet entre ordenadores

El procedimiento para la transmisión de datos mediante el protocolo TCP/IP se basará en la arquitectura cliente / servidor implementada del modo representado en la figura 4.39.

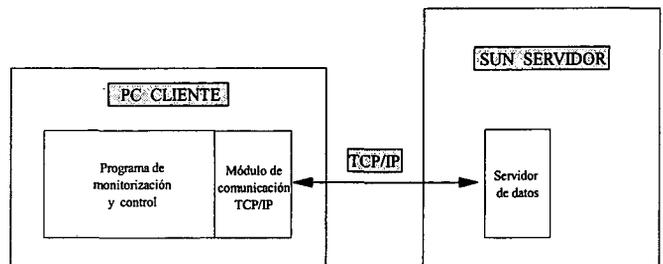


Fig. 4.39. Conexión PC-SUN basada en la arquitectura cliente / servidor

El ordenador que monitoriza y controla la planta piloto (un ordenador personal) será el cliente de los servicios ofrecidos por la estación de trabajo SUN. En la estación de trabajo se ejecutará un proceso que efectuará los servicios que definamos, en nuestro caso la transmisión de datos en ambas direcciones.

En sistemas operativos multitarea se habla generalmente de procesos, en lugar de programas. Un programa sencillo puede tratarse de un solo proceso, pero en programas más elaborados puede ser necesaria la utilización de subprocesos (generados por el proceso inicial), que el sistema operativo trata de igual modo que al proceso inicial. La ventaja de los sistemas operativos multitarea es la posible ejecución simultánea de varios procesos. Por simultánea se entiende que el sistema operativo se encarga de administrar el tiempo de procesador adecuado a cada proceso, es decir, el número de

operaciones a efectuar de cada proceso en cada momento.

4.4.1.1 SOCKETS

El procedimiento para conseguir la comunicación cliente / servidor es mediante "sockets". Los "sockets" son el modelo para comunicación entre procesos del "Berkeley Standard Distribution Unix". Es un mecanismo IPC (Inter Process Communication) de propósito general que puede ser utilizado para la comunicación de procesos, tanto en aplicaciones ejecutándose en diferentes ordenadores como en aplicaciones aisladas, es decir, aplicaciones ejecutándose en un mismo entorno multitarea [Gacot, 1992].

En UNIX, los sockets forman parte del "Kernel" (base del sistema operativo) y son accesibles mediante llamadas al sistema. En sistemas no UNIX (MS-DOS, OS/2, Mac OS) se pueden utilizar los sockets mediante llamadas a funciones de librerías adicionales.

Los sockets permiten generalizar las funciones estándar de entrada/salida (E/S) que se pueden encontrar en las librerías comunes del lenguaje C: *open()*, *read()*, *write()* y *close()*. Aumenta estas funciones con estructuras de datos y métodos que les permiten transmitir datos a través de conexiones de red.

El proceso de creación de un fichero es similar al de creación de un "socket". Para abrir un fichero se utiliza la función de C *open()*, especificando el nombre del fichero. Para crear el socket se utiliza la función *socket()*, indicando el dominio en el que operará, el tipo de socket y el protocolo utilizado para la comunicación. El resultado de *open()* es un número que identifica a un nuevo descriptor de fichero, el de *socket()* es un número que identifica a un nuevo descriptor socket.

4.4.1.2 EL PROCESO SERVIDOR

Para la creación de este proceso es conveniente establecer en primer lugar donde será ejecutado. Existe un motivo principal para situar al proceso servidor en una estación de trabajo con sistema operativo UNIX. En el ordenador servidor es necesario efectuar una apertura pasiva del socket, es decir, debe prepararse un puerto de entrada que únicamente esté esperando el requerimiento de conexión por un cliente. El proceso dedicado a esta cuestión, solamente espera la conexión con un cliente, no puede realizar ninguna tarea más. Tendríamos un sistema dedicado exclusivamente a escuchar por el socket. Es este el motivo por el cual no conviene realizar el proceso servidor en un

ordenador con un sistema operativo monotarea como el MS-DOS.

En esta sección se efectúa un estudio de los pasos necesarios para la transferencia de información mediante sockets entre un proceso servidor y un cliente. En primer lugar se muestra (figura 4.40) un esquema de flujo completo de la transferencia de información orientada a conexión utilizando sockets.

Los pasos mínimos para la creación del socket del servidor son los siguientes:

- Rellenar una estructura con los siguientes datos:
 - el puerto TCP/IP utilizado para la conexión
 - la familia de direcciones utilizada (IP)
 - las direcciones IP desde las que será posible 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 al puerto y rango de direcciones determinado en la estructura de datos anterior, mediante la llamada a la función *bind()*.
- Preparación de una cola de peticiones, mediante la función *listen()*, que indicará el número máximo de conexiones simultáneas de diferentes clientes que pueden existir.
- Esperar al requerimiento de conexión de un cliente, mediante la llamada a la función *accept()*.

El socket de ese modo creado espera hasta que un cliente (cualquiera de las direcciones autorizadas) pida la conexión. El tratamiento de esta conexión requiere una programación avanzada de los procesos de la estación de trabajo.

Cuando un proceso cliente pide una conexión, la función *accept()* escucha esa petición y crea un nuevo socket, que será el canal mediante el cual se efectuará la comunicación cliente - servidor. El socket creado originalmente sólo se utiliza para el requerimiento de conexiones, no para la transmisión de información.

En primer lugar es necesario crear un proceso hijo del proceso servidor. En un sistema UNIX, es posible la creación de un proceso hijo de cualquier proceso ejecutándose; el proceso creado se denomina padre, el creado, hijo. 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

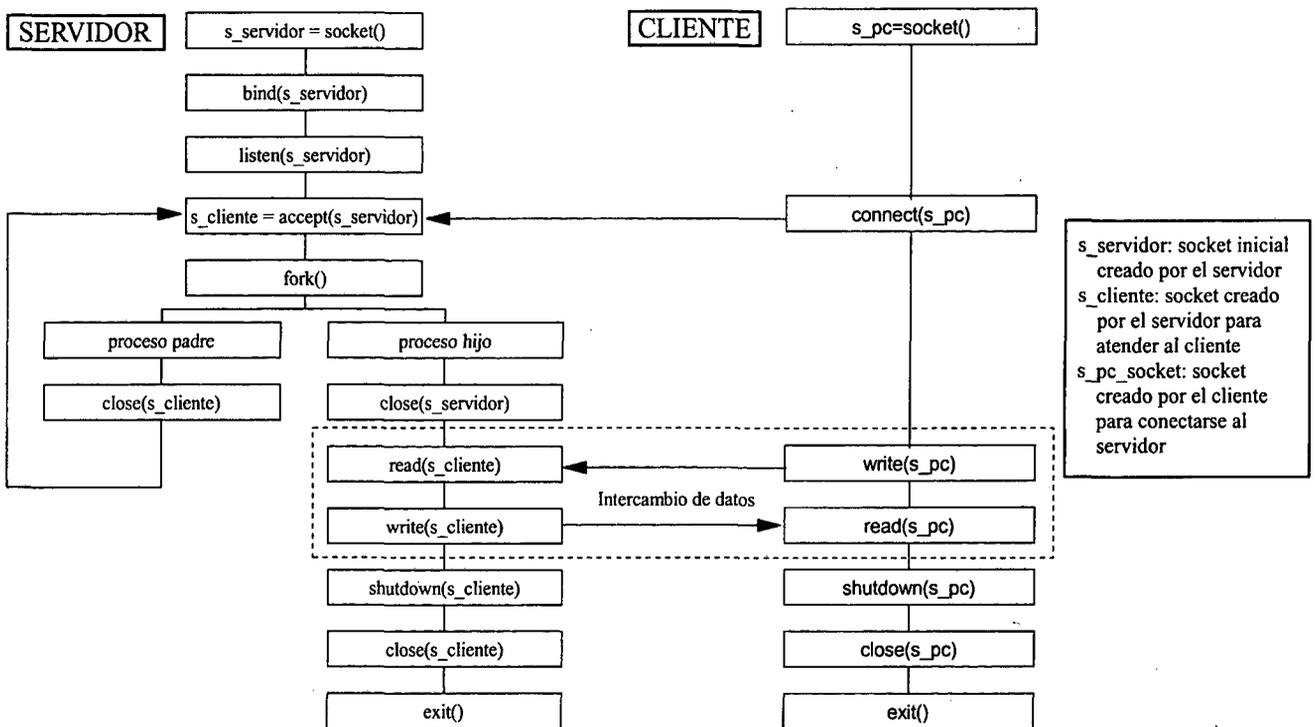


Fig. 4.40. Transferencia de datos mediante sockets

objetivo a cumplir en estos momentos es la creación de un proceso que se ocupe de la conexión requerida por el cliente, y de ese modo liberar al proceso padre para volver al punto de espera de peticiones. Esto es así porque el programa servidor debe ser capaz de atender peticiones de diferentes clientes simultáneamente. La forma de hacer esto es creando los procesos hijos, iguales al padre que se encargan de la comunicación con cada uno de los clientes. La llamada a la función `listen()` anterior permite determinar el número máximo de peticiones que el sistema deberá atender.

La creación de un proceso hijo se efectúa llamando a la función `fork()`. Esta función de C para UNIX devuelve el número de proceso asignado por el sistema operativo al proceso padre, mientras que devuelve un valor 0 en el caso del proceso hijo creado. Esta característica es la que permite diferenciar a ambos procesos, dando el tratamiento adecuado a cada uno de ellos.

Debemos recordar que en este momento de la comunicación existen dos sockets: el creado inicialmente para la aceptación de peticiones y el creado para atender a la petición. Cada uno de los dos procesos (padre e hijo) tiene acceso a los dos sockets por lo que debe efectuarse alguna acción encaminada a evitar las interferencias entre los dos procesos. El tratamiento efectuado a cada socket depende del proceso:

- El proceso padre únicamente cierra el socket de comunicación cliente - servidor creado en

la función `accept()`, ya que él no requerirá utilizarlo de nuevo. Después del cierre vuelve a la posición del `accept()`, a esperar una nueva petición de conexión.

- El proceso hijo cierra en primer lugar el socket utilizado por el servidor para recibir peticiones, ya que no requerirá su utilización. Toda la comunicación será realizada a través del socket creado en la llamada a la función `accept()`.

De este modo tenemos un proceso padre, que ha terminado cualquier relación con el proceso cliente y se encuentra esperando una nueva petición, y un proceso hijo copia del anterior que se va a relacionar con el cliente intercambiando información.

A partir de este momento, el proceso hijo deberá efectuar el trabajo de servidor, es decir, el cliente requerirá unas acciones determinadas y el servidor deberá responder a ellas. Estas acciones podrían ser el envío de unos datos determinados, transmitir órdenes a otros elementos del sistema o cualquier otra acción posible desde un ordenador y que haya sido implementada como una orden. En nuestro caso se ha programado el servidor para que pueda recibir las siguientes órdenes:

- Recibir nuevos datos de un cliente, en nuestro caso la planta piloto.
- Recibir un mensaje en formato texto de un cliente.