

## Capítulo 2

# Principales tipos de fermentadores

### 2.1 Configuraciones de un fermentador

Las distintas fermentaciones discutidas en el capítulo 1 se llevan a cabo en recipientes denominados **fermentadores**. La disposición geométrica de estos recipientes particularmente en lo que afecta al modelo del flujo líquido, contribuye significativamente a la realización de una fermentación medida en términos de rendimiento y velocidad de producción.

Los distintos tipos de fermentador (figura 2.1) se discuten mejor tomando como base, la terminología establecida en el diseño de reactores químicos (Denbigh y Turner, 1971) a saber:

1. el fermentador intermitente (FI); (batch fermenter: BF)
2. el fermentador continuo de tanque agitado (FCTA); (Continuous stirred-tank fermenter: CSTF);
3. el fermentador tubular (FT); (tubular fermenter; TF)
4. el fermentador de lecho fluidizado (FLF). (Fluidised bed fermenter: FBF).

La influencia preponderante en el desarrollo de estas configuraciones para sistemas microbiológicos ha sido la necesidad de mantener un cultivo estable. Esto ha requerido operar en condiciones asépticas en recipientes de geometría relativamente simple, que puedan ser esterilizados<sup>1</sup> con un alto grado de eficiencia.

La principal influencia en el modo de operar de los reactores microbiológicos deriva de las propiedades físicas de los propios microorganismos. En condiciones normales los microorganismos contienen una cantidad de agua considerable (60-95%) y, en consecuencia, tienen una densidad sólo ligeramente diferente de la del agua. Se requiere pues un empuje hidrodinámico muy pequeño para mantenerlos en suspensión, con el resultado de que si el fluido circundante está en un estado de suave agitación los microorganismos estarán en suspensión.

<sup>1</sup> Dejado libre de microorganismos que puedan crecer.

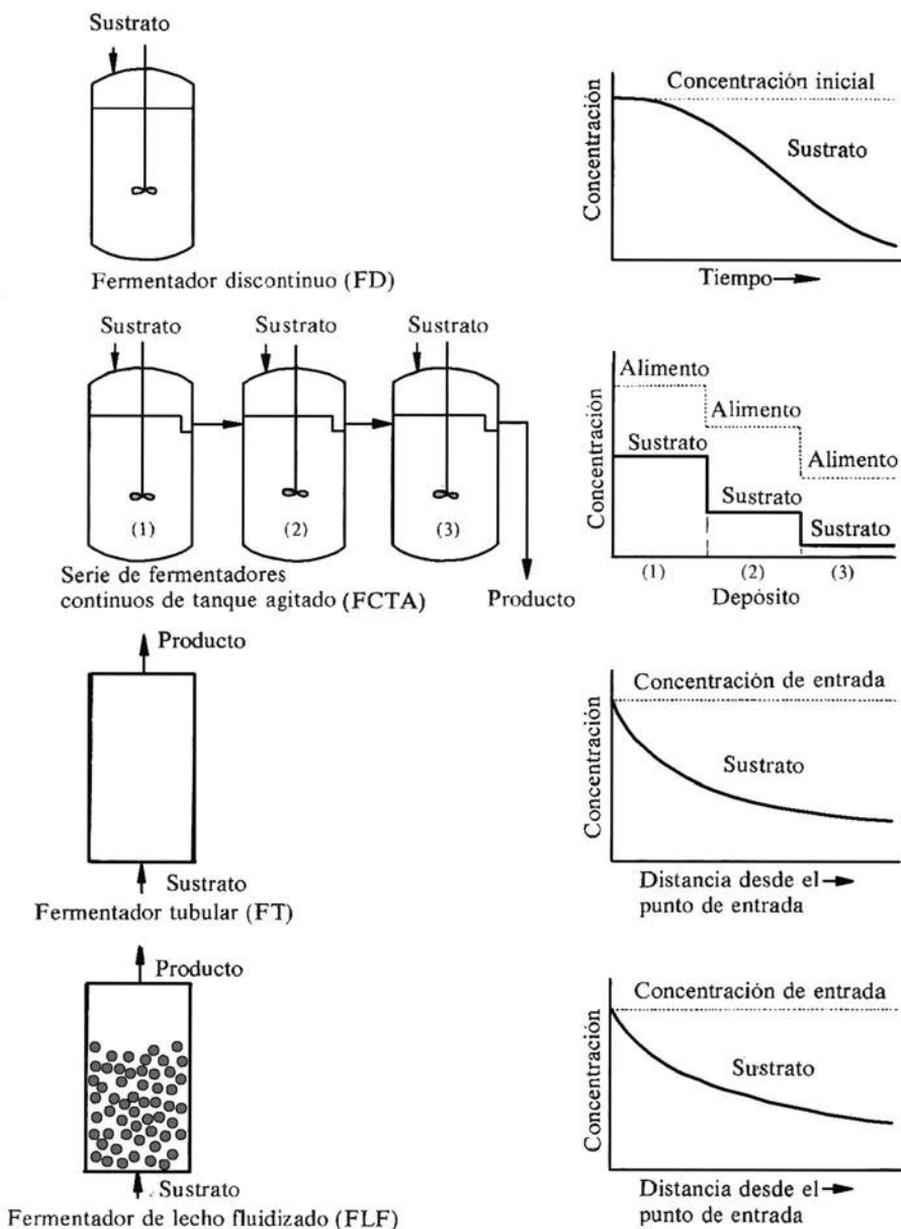


Figura 2.1. Principales configuraciones de fermentadores.

Una disposición lógica es un fermentador de mezcla total, en el que el movimiento del líquido es inducido por agitación mecánica, por la evolución de un gas como producto bioquímico, o por aire burbujeando por todo el medio (figura 2.2). El último sistema mencionado suministra además el oxígeno libre requerido por el proceso aerobio.

Puesto que las conversiones bioquímicas no se alcanzan en ausencia de microorganismos se comprende que al utilizar los microorganismos suspendidos en un fermentador continuo habrá que evitar el que éstos sean arrastrados con la corriente de salida. Los caudales a utilizar con un fermentador continuo de tanque agitado están limitados como resultado de este fenómeno (figura 6.11) y los fermentadores tubulares (FT), con flóculos suspendidos, no pueden funcionar sin un aporte constante de microorganismos en la corriente de entrada (figura 2.15). Una respuesta alternativa al último problema es el fermentador de lecho fluidizado (figura 2.14), que es un híbrido entre el fermentador de tanque agitado y el fermentador tubular, en el que las partículas son suspendidas por la corriente líquida que circula en dirección ascendente y las fuerzas gravitacionales evitan que sean arrastradas (Shore y Royston, 1968).

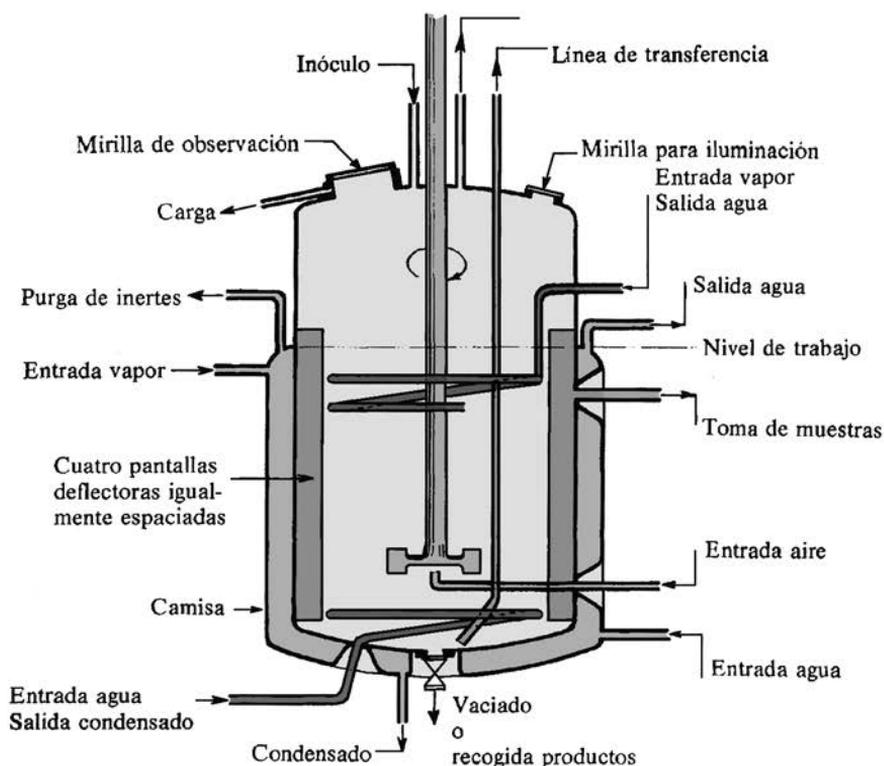


Figura 2.2. Fermentador.

Desafortunadamente operar bajo estas condiciones requiere velocidades de flujo muy bajas a causa de la pequeña diferencia de densidad entre los microorganismos y el fluido.

Una forma alternativa de fermentador tubular implica el uso de películas microbianas (figura 2.16) mantenidos sobre superficies apropiadas situadas dentro del fermentador. Tales películas contribuyen al funcionamiento del fermentador y, como resultado del crecimiento, proporcionan un suministro continuo de microorganismos para transferir a la corriente de nutrientes.

En el fermentador de tanque agitado discontinuo, los reactivos se añaden inicialmente al tanque; se mezclan bien y se les permite reaccionar durante un periodo de tiempo hasta que se alcance la conversión requerida. La mezcla resultante se descarga entonces para el procesamiento posterior. Esta es una operación en régimen no estacionario en la que las condiciones en el fermentador varían con el tiempo (figura 6.7); sin embargo, en un instante determinado son bastante uniformes por todo el depósito gracias a la agitación. Por lo tanto los microorganismos en un fermentador discontinuo están expuestos a más **condiciones ambientales** siempre cambiantes.

El FCTA consiste usualmente en un tanque cilíndrico bajo, en el que es esencial una buena mezcla de contenido pues, de otra manera habría «cortocircuitos» entre la corriente de entrada y la de salida de manera que gran parte del volumen sería espacio muerto. La agitación es pues una característica extremadamente importante, considerándose que una buena aproximación a una mezcla perfecta no es difícil de alcanzar con tal que la fase fluida no sea demasiado viscosa (Milbury et. al., 1965). El efecto de una buena mezcla es que todos los elementos del fluido en el tanque tengan virtualmente la misma composición.

Un tren de fermentadores continuos de tanque agitado consiste en varios tanques agitados en serie. El primer tanque está provisto de una alimentación continua de nuevos reactivos y una corriente continua de material reactivo pasa de un tanque al siguiente. El producto se descarga continuamente por el extremo de la línea de depósitos. En ciertas circunstancias puede ser útil introducir reactivos adicionales en varios tanques de la secuencia (figura 2.1). La mezcla completa de los contenidos de un depósito significa que tienen la misma composición que el material que sale del mismo. Esto supone un cambio escalonado en la composición, de un depósito al siguiente.

Una gran ventaja del FCTA, aparte de la simplicidad de construcción, es el fácil control de la temperatura y del pH. El material que entra en un tanque dado se sumerge inmediatamente en un gran volumen de fluido parcialmente fermentado y, a causa de la agitación, las variaciones locales de temperatura y de pH son mínimas. Los recipientes, ofrecen la oportunidad de proporcionar una área muy grande de superficie refrigerante; además de la superficie externa de los recipientes, puede suministrarse una gran cantidad de superficie interna en forma de serpentines refrigerantes sumergidos (figura 2.2).

Otra ventaja, particularmente en la industria de tratamiento de aguas residuales, reside en la modulación de cualquier sobrecarga accidental a que pueda ser sometido el sistema. De nuevo, ésto es debido al efecto de la buena mezcla que produce el que

las concentraciones dentro del fermentador reflejen mejor las condiciones de salida que las de entrada.

Comparando con el fermentador tubular e incluso con el fermentador de lecho fluidizado, el FCTA es de construcción abierta. Esto facilita la limpieza de las superficies internas, un factor particularmente importante para operar en condiciones asépticas.

El fermentador tubular se llamó así originalmente por su forma. Sin embargo, lo que se entiende ahora por fermentador tubular es cualquier fermentador de funcionamiento continuo en el que haya un movimiento estacionario de los reactivos en una dirección espacial determinada. Los reactivos entran por un extremo, del sistema y lo abandonan por el otro y no se intenta inducir el mezclado entre los elementos del fluido en diferentes puntos a lo largo de la dirección del flujo. El fermentador tubular es un fermentador continuo en el que el fluido se mueve más bien como un émbolo o pistón. Esto contrasta con un fermentador de lecho fluidizado, donde el fluido a menudo se aproxima a una circulación en forma de «flujo de pistón»<sup>2</sup> pero los microorganismos se mueven al azar, como ocurre en el FCTA.

La ausencia de mezclado en un fermentador tubular motiva la existencia de perfiles de concentración axial, p. ej., una caída gradual y continua en la concentración de sustrato y un aumento de la concentración de producto en la dirección del flujo (figura 6.1).

## 2.2 Fermentación discontinua

Los procesos microbiológicos llevados a cabo de forma discontinua implican invariablemente varias etapas. Estas incluyen el desarrollo de microorganismos a partir de un cultivo patrón, p. ej., una preparación liofilizada, que incluye etapas de crecimiento sobre agar y en frascos agitados, seguida de etapas de «siembra» y producción. El primer paso en esta secuencia consiste en desarrollar un cultivo<sup>3</sup> sobre la superficie de un medio nutriente estéril solidificado por adición de agar. Una parte del cultivo se transfiere, usando un aro de alambre, a un erlenmeyer que contiene un medio líquido estéril y el frasco se pone en un agitador incubándose. Se dispone de varios modelos patentados de agitadores (Solomons, 1969). Cuando se ha producido de esta forma una cantidad suficiente de masa microbiana, ésta se utiliza como inóculo, para un pequeño fermentador de «siembra», por ejemplo de 5-200 litros de capacidad, similar al ilustrado en la figura 2.2. El fermentador de siembra se usa para producir el inóculo para el fermentador de producción industrial.

Como regla general puede decirse que el principal objeto de la ingeniería bioquímica radica en los fermentadores de siembra y de producción industrial. En ocasiones pueden estar implicadas cierto número de etapas de siembra mientras que la producción se lleva a cabo generalmente en un fermentador único (Blakebrough, 1967).

<sup>2</sup> La condición en la que la velocidad del fluido es independiente de la posición radial.

<sup>3</sup> Una población de microorganismos.

El proceso completo podría tener lugar en una única etapa pero el sistema de etapas múltiples tiene un cierto número de ventajas, en particular:

1. productividad creciente para un volumen total menor del fermentador (ver página 140, sección 6.2.4);
2. la posibilidad de variación de las condiciones ambientales de etapa en etapa, lo cual lleva a que algunas etapas sean utilizadas predominantemente para crecimiento microbiano y otras para producción bioquímica.

La disposición básica del fermentador para transformaciones microbiológicas es un fermentador tipo tanque profundo (figura 2.2). Las etapas de innovación relacionadas con este fermentador, principalmente para procesos aerobios, constituyen una interesante historia tecnológica, que puede ser seguida a través del desarrollo del proceso de ácido glucónico (Prescott y Dunn, 1959) y de la historia de la producción de penicilina (Lyons, 1970). La capacidad del depósito puede ser cualquiera, desde unos pocos cientos a varios miles de litros.

El tiempo requerido para una fermentación discontinua varía de horas a semanas dependiendo de la conversión que se desee y de las condiciones utilizadas (Rhodes y Fletcher, 1966). Durante este tiempo debe evitarse la contaminación debiendo agitarse el contenido del tanque y mantener controlada su temperatura.

Para una operación aséptica es necesario esterilizar el medio nutriente, el tanque y sus conexiones con otros tanques. Deben tomarse precauciones para el transporte aséptico del inóculo hasta el tanque esterilizado.

El control de temperatura se consigue poniendo una camisa de agua alrededor del tanque. Esto va acompañado frecuentemente por la utilización de serpentines internos con el fin de conseguir una superficie suficiente de transmisión de calor.

La acción del agitador es bastante complicada. En procesos aerobios sirve para dispersar el aire introducido en forma de burbujas y para distribuir estas burbujas, junto con la solución rica en oxígeno producida, por todas las zonas del depósito. Además proporciona una mezcla completa de los microorganismos en el seno del medio nutriente.

El problema del diseño de un fermentador tipo tanque profundo reside en la especificación del tamaño del tanque, del tiempo del proceso, la concentración inicial de reactivos (sustrato) requerida, la cantidad de microorganismos retenidos<sup>4</sup>, las necesidades de aireación y de potencia, y el área de la superficie de transmisión de calor.

Las condiciones óptimas para el crecimiento y la formación de producto son, con frecuencia, diferentes en términos de temperatura y pH, y en el grado de aireación y agitación requerido. Por otra parte puede ser necesario cambiar estas variables de operación durante el periodo de fermentación (Rhodes y Fletcher, 1966). Este fenómeno puede ilustrarse de una forma muy gráfica cuando se requieren condiciones anaerobias para el crecimiento microbiano y condiciones aerobias para la formación de producto, o viceversa. Pueden encontrarse ejemplos típicos del control de fermentaciones discontinuas en el apéndice 1.

<sup>4</sup> Volumen de masa microbiana por unidad de volumen del fermentador.

Durante el curso de la fermentación pueden ocurrir grandes cambios en las propiedades reológicas de los productos del recipiente en muchos sistemas microbianos, especialmente los que implican mohos y bacterias filamentosas (Richards, 1961). Estos cambios implican un incremento en la viscosidad aparente y la pérdida de las llamadas características newtonianas del fluido. Así la viscosidad se hace dependiente del gradiente de velocidad en el líquido y por tanto de la potencia consumida por el agitador. Puesto que la viscosidad aparente ejerce una fuerte influencia sobre el grado de mezcla, cualquier cambio en dicha variable debe ser tenido muy en cuenta. Los cambios en las propiedades físicas del fluido también afectan a los procesos de transporte que ocurren dentro del fermentador. Estos incluyen transferencias de calor, absorción y distribución de oxígeno, dispersión de productos y subproductos, y el ajuste del valor del pH.

### 2.2.1 Tipos de fermentadores discontinuos

Se han considerado numerosos tipos diferentes de recipientes, especialmente a escala de laboratorio, pero sólo unos pocos han encontrado aceptación en la industria. Todos los tipos utilizan flóculos biológicos suspendidos en el medio y las diferencias están asociadas en gran parte con la recirculación del fluido interno y externo y con la manera de inyectar el aire en el recipiente. Cada uno de los tipos principales posee varios diseños geométricos, pero generalmente pueden clasificarse como sigue:

1. inyección de aire a través del agitador; el aire pasa por un eje hueco y es inyectado en el medio a través de los agujeros practicados en el agitador;

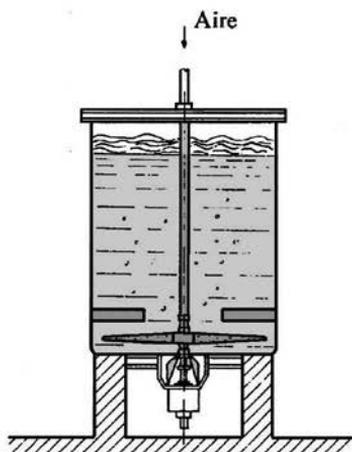
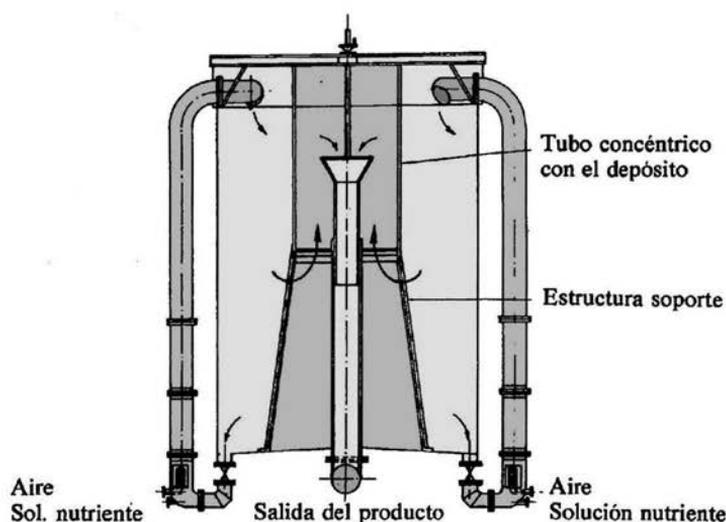


Figura 2.3. Fermentador con inyección de aire a través del agitador. (Hospodka, 1966).

2. inyección en dos fases; una mezcla de dos fases de aire y medio nutriente pasa al fermentador en forma de espuma o suspensión (figura 2.4);



**Figura 2.4.** Fermentador con inyección bifásica, utilizado para la producción continua de levadura en planta piloto (las flechas indican la dirección del flujo del líquido) (Hospodka, 1966).

3. fermentador con transporte por aire; el aire se usa para hacer circular los productos contenidos en el fermentador, bien por tubos externos al recipiente o usando un tubo interior, (figura 2.5);
4. inyección de aire por distribuidor<sup>5</sup>; el fermentador usado más extensamente es el cilindro vertical agitado, con deflectores con un distribuidor de aire cuyas principales características se ilustran en la figura 2.2.

Es una práctica casi universal introducir el aire a través de un distribuidor situado cerca del lado inferior del agitador. Se usan distribuidores de chorro de salida única, múltiple y porosos, teniendo en cuenta que las diferencias en lo que respecta a la transferencia de oxígeno son mínimas, al menos en recipientes agitados. Esto es debido a que los gradientes de velocidad en la región de la turbina son suficientes generalmente para romper un chorro de aire en burbujas, las cuales, en cambio, proporcionan una área extensa para la transferencia de oxígeno. Los distribuidores porosos no son populares debido a su tendencia a bloquearse por microorganismos, aunque son todavía una característica de la industria de tratamiento de aguas residuales, donde se utilizan en procesos que no se agitan de otro modo.

### *Transmisión de calor*

En un fermentador discontinuo, si el medio debe esterilizarse dentro del recipiente, el área de transmisión de calor debe calcularse para que pueda suministrar las

<sup>5</sup> Una línea de aire que termina en una boquilla.

Dimensiones:

Columna

Altura = 500,0 cm

Diámetro = 30,0 cm

Tubo interior

Altura = 259,4 cm

Diámetro = 20,6 cm

Volumen medio = 200 litros

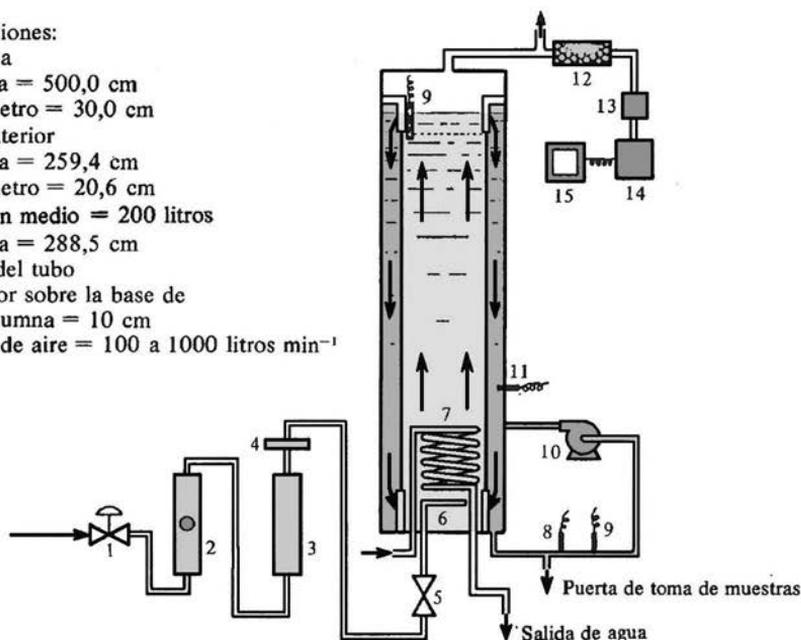
Altura = 288,5 cm

Altura del tubo

interior sobre la base de

la columna = 10 cm

Caudal de aire = 100 a 1000 litros  $\text{min}^{-1}$



**Figura 2.5.** Fermentador agitado por aire (las flechas indican la dirección del flujo del líquido) (Wang y Humphrey, 1969).

1 Regulador de la presión del aire

2 Rotámetro

3 Filtro de aire de lana de vidrio

4 Filtro «Millipore»

5 Válvula de control

6 Distribuidor de aire

7 Serpentin de refrigeración o calefacción

8 Electrodo de pH

9 Medidor de  $\text{O}_2$

10 Bomba centrífuga

11 Termistor

12 Lecho de gel de sílice

13 Bomba de diafragma

14 Analizador paramagnético de  $\text{O}_2$

15 Registrador

cantidades de calor correspondientes a la esterilización y el enfriamiento, así como las asociadas con el funcionamiento normal. La carga térmica final es el resultado neto de un número de fuentes de energía, variables a lo largo del curso de la fermentación:

1. calor de reacción;

2. energía disipada por el agitador;

3. energía disipada por el aire al pasar por el medio líquido;

4. pérdidas de calor en la corriente de aire debido a cambios de temperatura y humedad.

### Agitación

Generalmente se usan impulsores que producen un flujo radial, p. ej., la turbina y variedades de discos con aletas con más de un disco sobre el mismo eje, preferidos

para recipientes hondos. La selección de un impulsor y de su velocidad de funcionamiento está basado bien sobre datos obtenidos con sistemas similares o bien sobre un estudio detallado en «planta piloto». En vista de las complejas interacciones entre el impulsor, las fases del fluido y los microorganismos, la fiabilidad y utilidad de tales informaciones están aún lejos de ser satisfactorias. Así es bastante sorprendente que los procedimientos de escalado sean inadecuados, cuando se basa en la similitud geométrica y en mantener la potencia suministrada por unidad de volumen de fluido al mismo nivel en ambos recipientes pequeño y grande (Calderbank, 1967).

#### *Esterilización (Richards, 1968)*

A escala industrial la esterilización de medios, recipientes etc., se logra generalmente por vapor, mientras el aire suministrado se esteriliza por la temperatura elevada alcanzada en el compresor, seguido por el paso a través de un medio filtrante fibroso. Esta última operación sobre el aire suministrado implica una filtración, en contraste con la eliminación total de microorganismos que se alcanzaría usando una membrana. Es normal utilizar un filtro adicional a la salida del aire para evitar la infección en el caso de que parte de dicho aire fuera aspirado de nuevo a la instalación.

#### *Prevención de la espuma (Evans y Hall, 1971).*

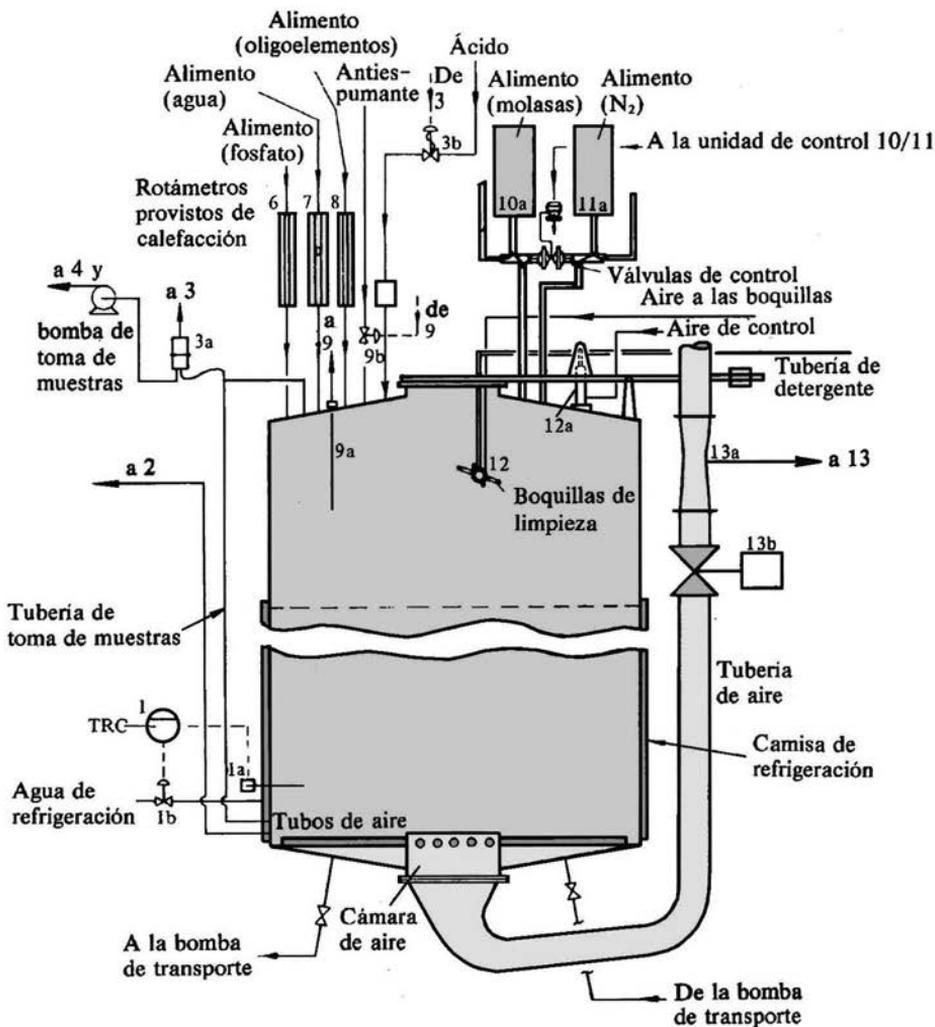
Las fermentaciones son propensas a la formación de espuma como consecuencia de la presencia de metabolitos con propiedades tensoactivas. Tales espumas pueden conducir a una considerable disminución del volumen del líquido en el recipiente durante el período de fermentación, al humedecimiento del filtro de salida del aire con los peligros consecuentes de infección microbiana y a un posible decrecimiento de las velocidades de transferencia de oxígeno. El método general usado para salvar esta dificultad consiste en añadir agentes antiespumantes p. ej., aceites naturales y minerales, alcoholes superiores, ácidos grasos y siliconas; aunque se han propuesto numerosos sistemas mecánicos (Solomons, 1969). Tales materiales deben ser suficientemente estables al calor para ser esterilizados y no deben interferir con el proceso metabólico. Si ellos mismos son metabolizables esto simplifica, los procesos finales de separación, aunque se requiere añadir una gran cantidad de agente durante el período de fermentación.

#### *Elementos mecánicos*

Los elementos mecánicos de los fermentadores o el equipo auxiliar utilizado (figura 2.6) han sido descritos por Solomons (1969); Hospodka (1966) ha estudiado un número considerable de variaciones del fermentador básico de tanque agitado, que se han propuesto y utilizado a lo largo de los años.

### **2.2.2 Digestión de «fangos»**

La antítesis del crecimiento microbiano bajo condiciones industriales es el proceso de digestión de «fangos» en la industria de tratamiento de aguas residuales. Este es un



**Figura 2.6.** Fermentador típico con equipo auxiliar (Olsen, 1960).

- |   |  |
|---|--|
| *1 Registro y control de temperatura                | * 9 Control de espuma                          |
| 1a Termoresistencia                                 | 9a Detector de espuma                          |
| 1b Válvula de control                               | 9b Válvula de control                          |
| *2 Nivel del fermentador                            | 10/11 Unidad de control de dosificación        |
| *3 Registro y control del pH                        | 10a Alimentación de molasses                   |
| 3a Electrodo de pH                                  | 11a Alimentación de N <sub>2</sub>             |
| 3b Válvula de control                               | 12 Boquillas rotativas                         |
| *4 Concentración de levadura                        | 12a Unidad de potencia                         |
| *5 Control del registrador                          | *13 Registrador neumático                      |
| 6 Rotámetro para alimentación de fosfatos           | 13a Venturi                                    |
| 7 Rotámetro para agua                               | 13b Válvula neumática de control               |
| 8 Rotámetro para alimentación de los oligoelementos | *Instrumentos montados en el panel de control. |

proceso de fermentación anaerobia llevado a cabo bajo condiciones intermitentes o semicontinuas<sup>6</sup>, en gran parte con miras a la destrucción de los microorganismos desarrollados durante el tratamiento biológico de las aguas residuales que llevan compuestos orgánicos. Un objetivo secundario del proceso es el acondicionamiento de los fangos residuales haciendo particular referencia a su capacidad de perder agua. En una etapa de procesamiento posterior se elimina tanta agua como sea posible; p. ej., secando en eras, puesto que su eliminación final a menudo implica transporte por carretera, ferrocarril o mar. La digestión anaerobia se realiza en fermentadores como el que muestra la figura 2.7 con tiempos de proceso típicos de 2-3 semanas. El fango sedimentado de una consistencia pastosa, alimenta al digester donde se hidroliza a compuestos solubles tales como azúcares sencillos, péptidos, aminoácidos, gliceroles y ácidos grasos. Estas sustancias proporcionan los substratos para las bacterias productoras de metano. El producto gaseoso final es una mezcla de metano y dióxido de carbono (aproximadamente 3:1) con trazas de amoníaco, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno.

El proceso, obviamente, es no-aseptico, y la eficacia de la digestión se ve afectada significativamente por factores tales como temperatura, pH, composición de fango, grado de mezclado y concentración de sólidos. Las materias primas implicadas difícilmente pueden ser consideradas como agradables de manipular; sin embargo, puesto que el inóculo toma la forma de fango parcialmente digerido, la organización de las etapas correspondientes a las fermentaciones intermitentes asépticas es afortunadamente irrelevante, y puede llevarse a cabo una operación satisfactoria por periódicas adiciones y eliminaciones de fangos digeridos o no.

La digestión más rápida tiene lugar a 55-70°C, que son temperaturas altas para la mayoría de los procesos microbianos. Aunque las reacciones son exotérmicas es necesario añadir calor al sistema para compensar las pérdidas al entorno externo, ya que los tanques de digestión se colocan usualmente al aire libre. Las dimensiones de un tanque de digestión típico pueden ser de 7 m de alto y 14 m de diámetro. Los fangos digeridos se venden como fertilizantes o se utilizan como materiales de relleno, o se tiran al mar. El gas producido se usa frecuentemente como fuente de energía para los trabajos de tratamiento (Swanwick, 1970).

### **2.3 Fermentación continua en un tanque agitado**

Un fermentador continuo de tanque agitado (FCTA) no necesita ser básicamente diferente al fermentador discontinuo ilustrado en la figura 2.2., excepto en que se añaden dispositivos para la alimentación y descarga en continuo. La diferencia fundamental está en el hecho de que el contenido del recipiente está en **estado estacionario**, es decir, no varía mucho con el tiempo; esto se aplica a la retención de microorganismos y a la concentración de los componentes del medio en el fermentador. Las condiciones de estado estacionario pueden alcanzarse operando sobre princi-

<sup>6</sup> La acumulación de masa microbiana no degradable requiere una descarga discontinua.

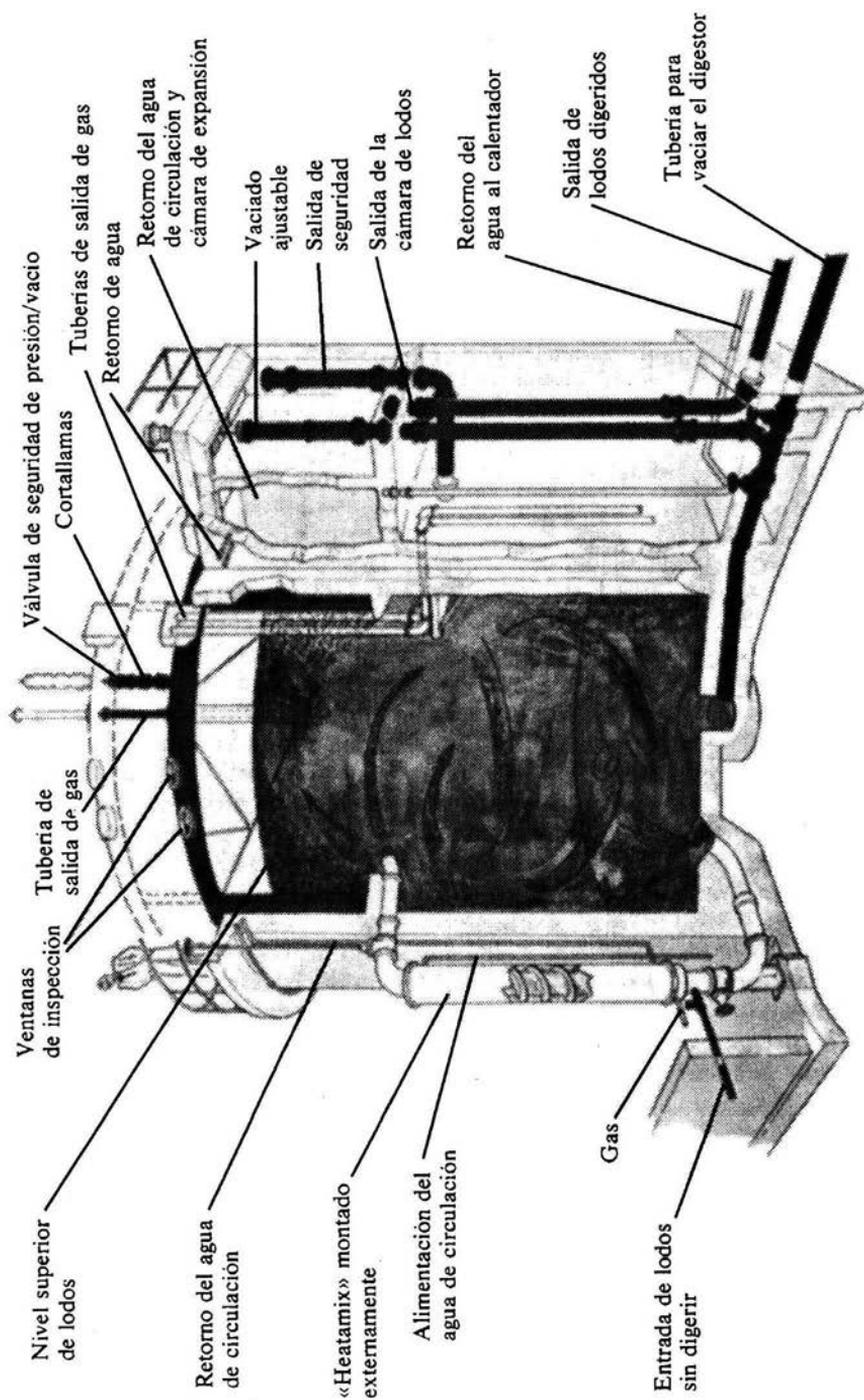


Figura 2.7. Digestor anaerobio (cortesía de Simon-Hartley Ltd.).

pios «quimioestáticos» o «turbidostáticos». Los primeros implican ajustar el caudal de alimento al fermentador a un valor apropiado y constante, permitiendo a las concentraciones de microorganismos, sustrato, y producto bioquímico alcanzar sus niveles «naturales». El «turbidostato» requiere una determinación experimental de la turbidez, es decir, una medida indirecta de la concentración microbiana; ésto se usa entonces para controlar el caudal. Ambos métodos se han alcanzado en la práctica aunque el primero es obviamente más simple desde cualquier punto de vista y consecuentemente es el que se usa en las operaciones que no sean las realizadas a escala de laboratorio.

La consecuencia inmediata de la condición de estado estacionario es que para una operación económicamente satisfactoria, las condiciones ambientales seleccionadas para el fermentador deben conducir a rendimientos aceptables de productos microbianos y bioquímicos. Este simple hecho requiere un profundo conocimiento de los factores fisiológicos y bioquímicos que influyen en la actividad microbiana, en mayor medida que las requeridas para fermentaciones intermitentes donde los procedimientos empíricos detallados para el funcionamiento del fermentador se desarrollan usualmente a lo largo de un período de años. Una vez que se ha alcanzado un rendimiento pequeño de producto en una fermentación intermitente éste puede mejorarse en una etapa de desarrollo, (Demain, 1971). En contraste, para una operación continua se requiere un conocimiento detallado de todas las relaciones existentes entre la velocidad de reacción y las variables de operación. Una complicación adicional surge del hecho de que los medios «naturales»<sup>7</sup>, al contrario que las soluciones de sustrato químico especialmente preparadas, son los normalmente usados en las industrias de fermentación, y la determinación de los efectos de todas las variables de concentración es escasamente factible. El uso de dichos medios supone una restricción adicional, puesto que las concentraciones, son aproximadamente fijas y esto hace difícil considerar un conjunto de diferentes concentraciones de entrada como parte del ejercicio de diseño. Una aplicación detallada de los datos discontinuos a un sistema continuo presenta pues dificultades importantes y éstas difícilmente pueden simplificarse por los cambios fisiológicos y bioquímicos que se sabe ocurren en los microorganismos durante el período de una fermentación discontinua (Herbert, 1961).

Los sistemas continuos de más éxito hasta la fecha han sido los que utilizaron levaduras y bacterias, en los que los productos deseados son las células o los metabolitos primarios<sup>8</sup> como en la levadura del pan (Olsen 1960), la proteína microbiana (Llewelyn, 1968) o algún producto claramente asociado con el crecimiento o los mecanismos productores de energía, como en la producción de alcohol (Coutts, 1958, 1961). Un comentario hecho por Righelato y Elsworth (1970) merece ser anotado «... si los investigadores industriales desean adoptar los métodos continuos deben estar preparados para llevar a cabo su propia indagación empírica como lo han hecho con los cultivos discontinuos, quizá desarrollando nuevas cepas y nuevos

<sup>7</sup> Medios obtenidos de fuentes naturales complejas, en particular productos de granja u otras fermentaciones, p. ej., melazas y licor de mazorca de maíz (Rhodes y Fletcher, 1966).

<sup>8</sup> Compuestos que forman el «inventario» químico de un microorganismo, p. ej., enzimas y aminoácidos.

medios». De hecho no parece haber razón alguna por la cual cualquier fermentación no pueda ser alcanzada en procesos continuos, teniendo en cuenta que puede hacerse la justificación económica y existe el deseo de conseguirlo. Cuando los metabolitos secundarios son el objetivo<sup>9</sup>, como en la producción de penicilina, la situación es menos alentadora normalmente y es menos probable que sistemas de recipiente único conduzcan a resultados satisfactorios a causa de los diferentes requerimientos ambientales entre las etapas de crecimiento y de producción (ver apéndice 1). Los procesos de fango activado son los procesos continuos basados en el FCTA más extensamente utilizados (Ainsworth 1970), y se usan en la industria de tratamiento de aguas residuales (figura 2.8) (ver pág. 8).

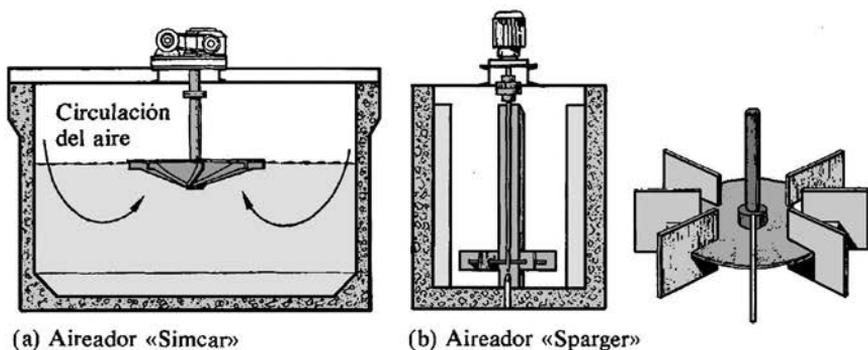


Figura 2.8. Unidades de fangos activados (Abson y Todhunter, 1967).

En el proceso continuo la naturaleza autocatalítica<sup>10</sup> de las reacciones microbiológicas tiene una significación adicional. Esto es debido a que la presencia de uno de los productos, microorganismos adicionales, aumenta la velocidad total de la reacción. En ausencia de microorganismos no tiene lugar ninguna reacción y es esencial retener al menos una porción dentro del fermentador. Resulta que si el caudal alcanza un valor elevado entonces todos los microorganismos serán arrastrados fuera del fermentador y la conversión cesará. Este fenómeno se conoce normalmente como «arrastre o lavado» (ver capítulos 6 y 7). Obviamente si los microorganismos se introducen en el fermentador simultáneamente con el sustrato, entonces los problemas asociados con el arrastre disminuyen y la reacción transcurre normalmente. Operar bajo tales condiciones requiere un flujo continuo de microorganismos idénticos a los que existen dentro del fermentador; la fuente lógica de éstos es la corriente efluente, pues ésta contiene organismos y nutrientes en las mismas condi-

<sup>9</sup> Moléculas producidas por un organismo que no tiene una función general en el proceso vital pero que puede serle útil al organismo particular.

<sup>10</sup> Una reacción en la que uno de los productos de la reacción incrementa la velocidad global de la reacción.

ciones bioquímicas y fisiológicas que los de dentro del fermentador. El efluente puede pasarse a través de una centrifuga o bien por medio de un tanque de sedimentación, para producir una suspensión microbiana concentrada para ser reciclada al fermentador (figura 2.9).

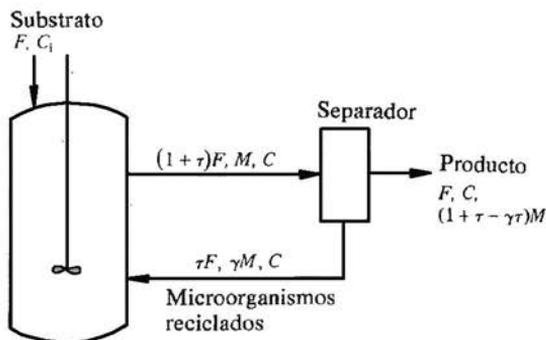


Figura 2.9. FCTA con reciclado.

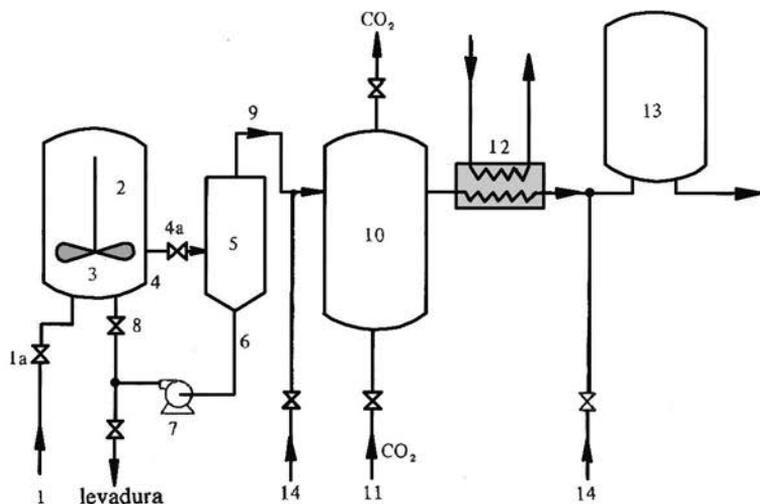
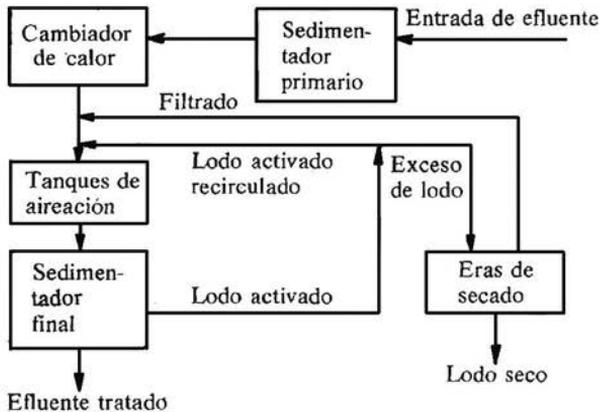


Figura 2.10. Diagrama de flujo de una fermentación continua, en una etapa, para la producción de cerveza (Coutts. 1958, 1961).

- |    |                            |    |  |
|----|----------------------------|----|--|
| 1  | Entrada de mosto           | 7  | Bomba                                  |
| 1a | Válvula de control         | 8  | Válvula de control de la recirculación |
| 2  | Fermentador                | 9  | Salida de cerveza clarificada          |
| 3  | Agitador                   | 10 | Tanque de lavado                       |
| 4  | Salida de cerveza          | 11 | Entrada de $CO_2$                      |
| 4a | Válvula de control         | 12 | Cambiador de calor (enfriador)         |
| 5  | Sedimentador o centrifuga  | 13 | Depósito                               |
| 6  | Recirculación de levaduras | 14 | Entrada de refinación                  |

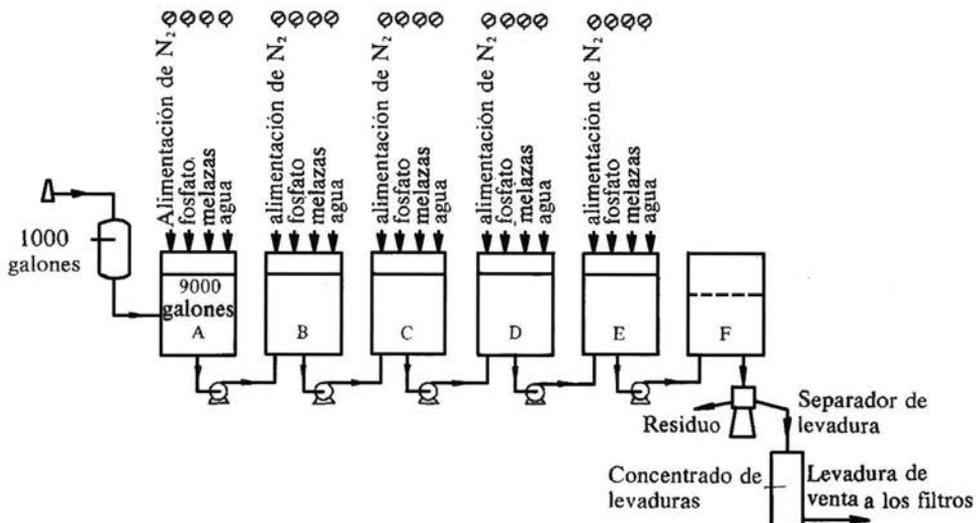
Estos dos métodos se han aplicado con éxito en condiciones industriales para la producción de cerveza (Coutts, 1958, 1961) (figura 2.10), y el último de ellos es una característica normal de los procesos de fangos activados (Ainsworth, 1970) (figura 2.11). Una afluencia constante de organismos no sólo soluciona el problema del arrastre sino que además produce un incremento en la productividad por el incremento de microorganismos retenidos dentro del fermentador (ver sección 6.3).



**Figura 2.11.** Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales por el sistema de lodos activados.

Una característica del reactor de tanque agitado continuo en la industria química reside en la utilización de varios reactores en serie (figura 2.1), porque el efluente de un reactor único contiene normalmente una concentración apreciable de los reactivos. El FCTA trabaja normalmente con altas conversiones de sustrato, por tanto la concentración del sustrato en la corriente efluente es bastante baja (ver capítulo 6) y la pérdida de sustrato no es una característica importante. Sin embargo si se usan varios fermentadores en serie deberá añadirse más sustrato a cada uno de ellos (figura 2.1). Una característica adicional de varios fermentadores en serie es que si los microorganismos están presentes en el primer fermentador entonces, a pesar del hecho de que el caudal a través de los sucesivos fermentadores aumente en la dirección del flujo como resultado de la adición de sustrato, no puede ocurrir el arrastre. Por consiguiente, la productividad de cada fermentador es mayor que la del que le precede. Se han usado varios fermentadores en serie para la producción de levadura de panadería (Olsen, 1960) (figura 2.12).

Los sistemas de etapas múltiples para reacciones microbianas son particularmente útiles cuando en los procesos discontinuos equivalentes es preciso variar las condiciones ambientales durante el curso de la reacción (apéndice 1). En un sistema de etapas múltiples esto equivale a proporcionar condiciones ambientales diferentes en las distintas etapas.



**Figura 2.12.** Diagrama de flujo de la producción continua de levadura para panificación (Olsen, 1960). A-F, fermentadores.

Esto ocurre cuando en los procesos discontinuos:

1. los productos se forman hacia el final de la fase exponencial<sup>11</sup> y en el curso de la fase estacionaria<sup>12</sup> (Stubbs et al., 1940);
2. los productos se forman independientemente de la velocidad de crecimiento microbiano (Reilly y Humphrey, 1964);
3. el producto es el resultado de una secuencia de reacciones químicas y microbiológicas sucesivas (Hosler y Johnson, 1953).

Una forma alternativa de FCTA en serie a la ilustrada en la figura 2.1 ha sido descrita por Kitai y Yamagata (1970). Este fermentador se muestra en la figura 2.13. Consiste básicamente en un tubo dividido en secciones iguales por platos perforados horizontales. El fermentador ha sido ideado para utilizarse en condiciones aerobias con las entradas del medio y del aire coincidentes en la base de la columna. Durante la operación la razón gas-líquido puede ajustarse de forma que se mantenga una cantidad de líquido determinada en cada plato con un espacio de aire por encima. Se asegura que los volúmenes de líquido estén completamente mezclados, que el transporte del líquido a la parte superior de la columna sea por arrastre y que no se produzcan retrocesos de flujo. Bajo estas condiciones el fermentador funciona exactamente como un FCTA actuando cada sección o etapa como una de los fermentadores en serie.

<sup>11</sup> Una condición de crecimiento en un fermentador discontinuo bajo condiciones de exceso de sustrato (ver sección 6.2).

<sup>12</sup> Crecimiento neto cero en un fermentador discontinuo (ver sección 6.2).

## 2.4 Fermentadores tubulares

La masa microbiana en un fermentador puede existir en dos disposiciones: suspendida libremente o adherida a las superficies del fermentador. La que contribuye más significativamente al rendimiento de una configuración dada del fermentador depende sobre todo la proporción de la masa microbiana total que exista en cada una de ambas disposiciones (ver capítulo 7).

Los microorganismos en suspensión frecuentemente se agrupan en flóculos, con un tamaño característico varias veces mayor que un microorganismo sencillo. Los factores que producen un tamaño determinado de flóculos son en gran parte desconocidos pero la floculación puede ser ayudada por la presencia de los llamados agentes floculantes, p. ej., cloruros aluminico y cálcico (Aiba y Nagatani, 1971), o bien puede disminuirse el tamaño del flóculo mediante el aumento de las fuerzas de cizalladura producidas por la agitación (Aiba y Nagatani 1971) o mediante agentes tensoactivos (Mayette, 1969). Actualmente es razonable sugerir que todos los organismos pueden presentarse tanto como células sencillas como en grupos de varias células; sin embargo algunos microorganismos tienden a formar flóculos mayores que otros bajo condiciones ambientales aparentemente idénticas. De hecho, las características de floculación se utilizan para la clasificación<sup>13</sup>, p. ej., se han ordenado levaduras sobre la base de su capacidad o no de flocular (Hough, 1957).

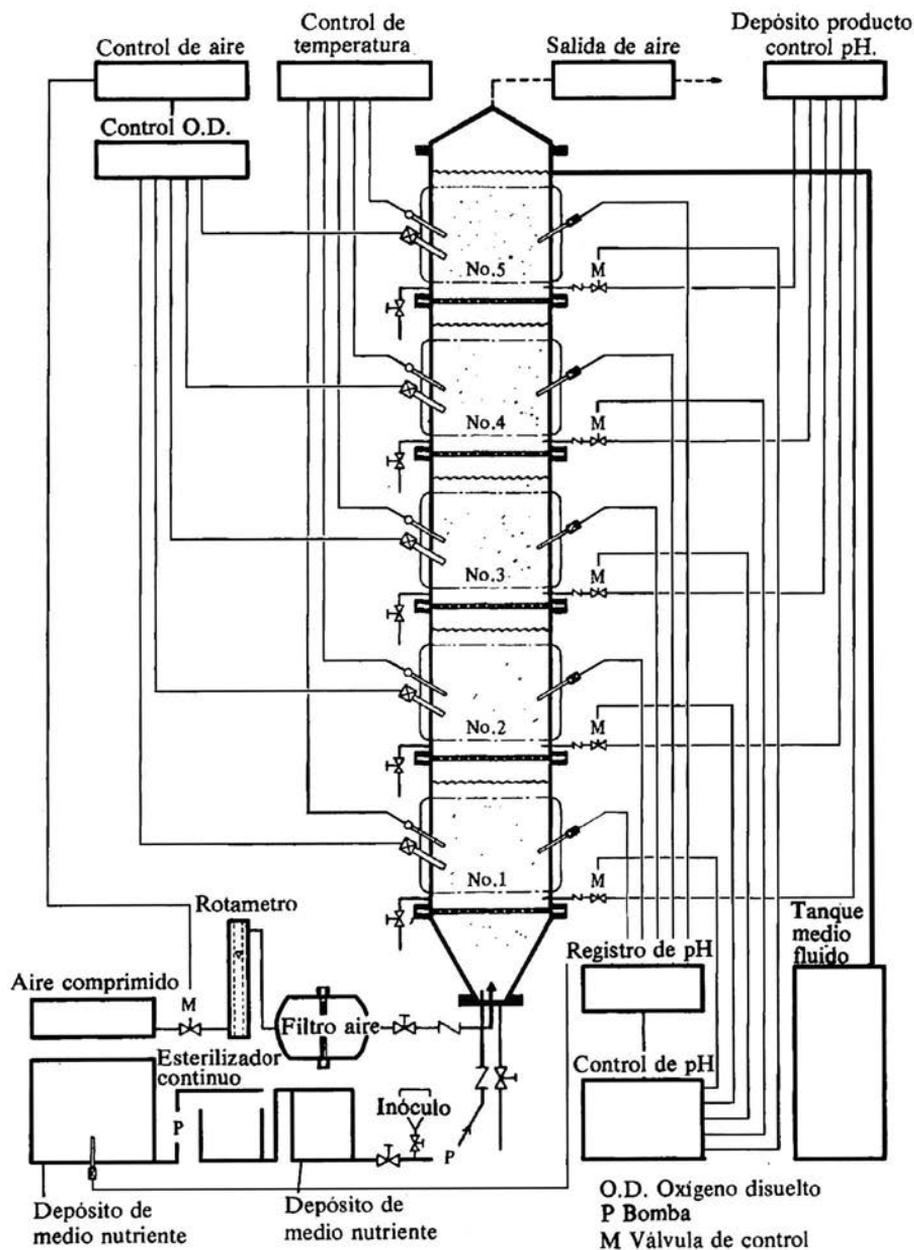
A pesar de que el mecanismo básico de unión no está completamente explicado (Munson, 1970) los organismos «colocados» sobre una superficie «inerte» desarrollan una película microbiana que cubre la superficie. El espesor de esta película depende presumiblemente de factores similares a los que contribuyen a la formación de flóculos.

En el fermentador intermitente y el FCTA descritos en secciones anteriores la eficacia del fermentador está controlada por los microorganismos suspendidos a pesar de que ellos pueden, y frecuentemente lo hacen, presentarse como grandes flóculos. Los fermentadores tubulares contrastan con esta situación puesto que, dependiendo de los detalles de la configuración y los caudales utilizados, tanto los flóculos<sup>14</sup> como las películas pueden suponer la principal contribución al rendimiento.

En un fermentador tubular conteniendo flóculos microbianos, los organismos individuales están expuestos a diferentes condiciones ambientales. Esto puede ser una ventaja en cuanto que las condiciones pueden compararse con las de la fermentación intermitente si se relaciona la distancia a lo largo del fermentador tubular con el tiempo en condiciones intermitentes (figura 6.1). Existe una analogía entre ambos fermentadores puesto que las condiciones en un punto particular del fermentador tubular están caracterizadas por el tiempo que el fluido que está pasando por dicha posición ha estado en el fermentador.

<sup>13</sup> El proceso por el cual los biólogos ordenan los organismos en grupos se llama clasificación o taxonomía.

<sup>14</sup> A partir de aquí el término flóculo se usará para identificar una partícula microbiana suspendida; ésta partícula puede consistir en un sólo microorganismo o en multitud de ellos.



**Figura 2.13.** Diagrama de flujo de un fermentador de columna de platos perforados. (Kitai y Yamagata, 1970).

En la sección anterior se sugirió que la concentración de sustrato en la corriente de salida del FCTA era generalmente muy pequeña, es decir, la conversión era grande. Debido al descenso progresivo en la concentración de sustrato a lo largo del fermentador tubular (ver figura 2.1), la concentración de salida es probablemente significativa, produciendo una cierta pérdida de materia prima (ver sección 6.3).

### 2.4.1 Flóculos microbianos

En la figura 2.14 se indica el efecto del incremento del caudal dentro de un tubo que contiene partículas inertes de igual tamaño. A caudales bajos las partículas están en reposo y el flujo pasa a través del lecho por un camino tortuoso; ésta situación se denomina «lecho fijo». Cuando el caudal aumenta, la pérdida de carga del fluido al

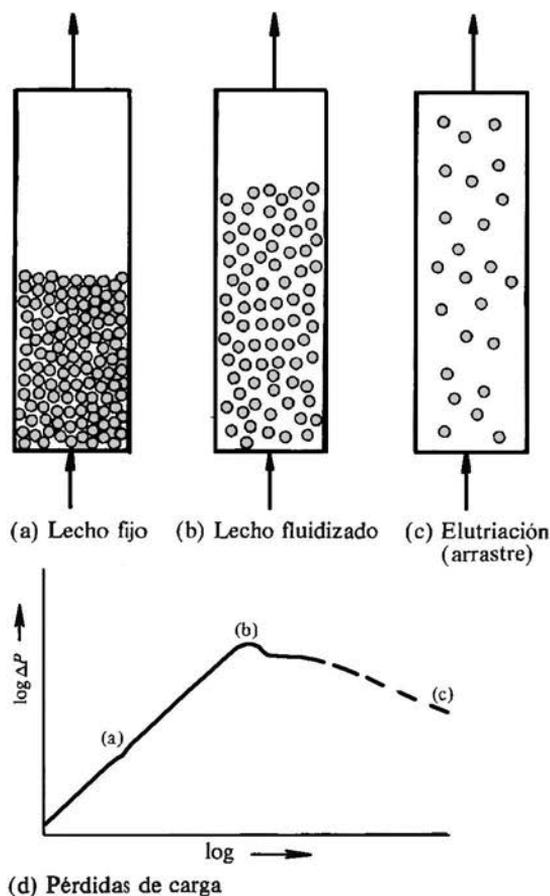


Figura 2.14. Efecto del caudal sobre las partículas en un fermentador tubular.

pasar a través del lecho se hace igual al peso por unidad de área del lecho, y en consecuencia las partículas quedan suspendidas en el fluido sin contacto, unas con otras, en su mayor parte. El lecho de partículas aún mantiene su identidad y existe una altura de lecho bien definida, aunque de mayor magnitud que la altura del «lecho fijo» original. Posteriores incrementos en la velocidad provocan por último el que las partículas sean arrastradas fuera del tubo. El primero y el último de estos modelos de flujo fluido-sólido pueden describirse como configuraciones del fermentador tubular según la definición dada en la sección 2.1. La situación intermedia representa un ejemplo de un lecho «fluidizado».

Los reactores basados en cada uno de los modelos anteriores son característicos de la industria química. Los intervalos de caudales permitidos son normalmente bastante amplios; ésto es una consecuencia del tamaño de las partículas usadas y de las diferencias entre la densidad del fluido y la del sólido (Coulson y Richardson, 1968).

En contraste con las partículas inertes, las partículas biológicas «crecen», pueden tener una amplia gama de tamaños y son de densidad muy similar a la de la fase fluida. La primera de estas características determina en gran parte la posibilidad de la operación en lecho fijo de un fermentador conteniendo flóculos biológicos. Las partículas en contacto tienden a «crecer» juntas. Esto produce un camino del flujo muy irregular para el líquido, y partículas de un tamaño característico excesivamente grande (ver capítulo 4).

Se deduce que una configuración de fermentador tubular que incluya flóculos microbianos es factible sólo cuando las partículas son transportadas con el fluido. Tal disposición exige un suministro constante de microorganismos por la base del fermentador. Esto puede conseguirse con un sistema de reciclaje similar en principio al usado con el FCTA (figura 2.15), teniendo en cuenta que las características fisiológicas y bioquímicas de los microorganismos que regresan al fermentador reflejarán las condiciones ambientales de salida más que las de entrada.

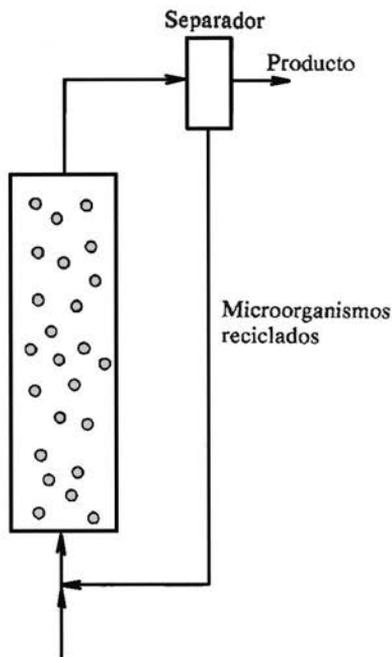
Los procesos que tienen lugar en un fermentador tubular son significativamente más complejos que los de un FCTA, puesto que los flóculos microbianos individuales están expuestos a condiciones ambientales diferentes durante su paso a través del fermentador (figuras 2.1 y 6.1). El fermentador tubular, cuando opera a una velocidad de recirculación elevada es equivalente a un FCTA y el modelo de flujo es similar al que existe en el fermentador con arrastre por aire (figura 2.5).

Es bastante sorprendente, en vista de la complejidad de una situación aparentemente sencilla, que el fermentador tubular que contiene flóculos microbianos haya arraigado ya en las industrias de fermentación.

#### 2.4.2 Películas microbianas

Los fermentadores tubulares basados en películas microbianas fijadas no tienen los problemas de «arrastre» que se presentan en los fermentadores de flóculos microbianos. Tienen en consecuencia la ventaja de no tener restricciones en lo que concierne al caudal.

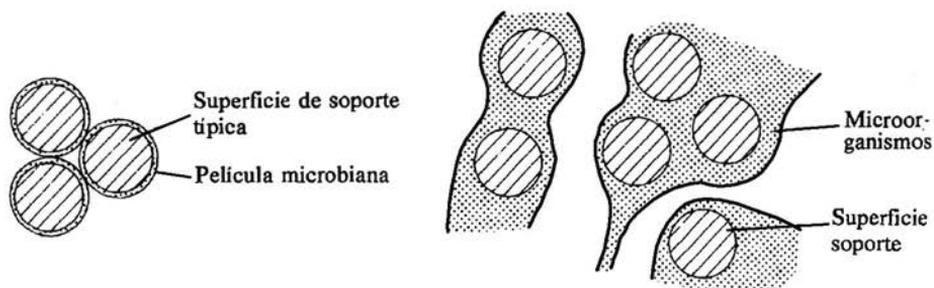
La disposición más conveniente de las películas microbianas dentro de un fermentador es la de una película que crece sobre las superficies de partículas inertes dispues-



2.15. Fermentador tubular con reciclado.

tas bien como lecho fijo o fluidizado. La elección entre los dos viene dictada en gran parte por la forma en que se eliminan del sistema los microorganismos producidos por el crecimiento (figura 2.16).

En procesos asépticos esto puede conseguirse por fuerzas hidrodinámicas ayudadas posiblemente por la fluidización de las partículas suspendidas. El líquido llena



(a) Espesor de la película biológica controlado

(b) Espesor de la película biológica no controlado

2.16. Películas biológicas soportadas típicas.

el espacio vacío como una fase continua junto con, para procesos aerobios, aire en forma de burbujas. En otros casos, como en la industria no aséptica de tratamiento de aguas residuales, los microorganismos o caen del fermentador o son eliminados por los otros componentes del ecosistema (Hawkes, 1963), es decir por gusanos y moscas que viven sobre los microorganismos. En este caso la fase líquida pasa a través del fermentador en forma de una película que cae por gravedad. Normalmente la película líquida no llega a rellenar los espacios vacíos ni a cubrir completamente la superficie biológicamente activa. La fase gaseosa es continua en los fermentadores de este tipo y pasa a través de ellos como resultado de la convección natural originada por la naturaleza exotérmica de las reacciones microbiológicas. Un proceso similar, excluyendo el control biológico de la masa microbiana, se usa en la manufactura del vinagre (Rhodes y Fletcher, 1966; Llaguno, 1971).

Cuando las condiciones de entrada en un fermentador de película microbiana permanecen constantes, el crecimiento microbiano trae como consecuencia el que las condiciones de salida varíen con el tiempo. Esto es debido a que la velocidad de reacción es función del espesor de la película biológica (ver capítulo 4). Si, tras una acumulación aceptable de microorganismos, el espesor de la película microbiana se mantiene constante por cualquiera de las técnicas mencionadas anteriormente, cabe esperar que las variables de salida alcancen un estado estacionario. Esto es cierto, en su mayor parte, cuando la acumulación microbiana es pequeña en relación con la porosidad del lecho.<sup>16</sup> En estas circunstancias la geometría interna del lecho permanece prácticamente inalterable. Sin embargo, en el caso de grandes acumulaciones microbianas, que son características de las películas microbianas controladas biológicamente, la geometría interna del lecho no sólo cambia sino que varía continuamente debido a los efectos del crecimiento, a la fauna que vive en el sistema y al desprendimiento de la película microbiana por acción de la gravedad. Las consecuencias de estas interacciones son un camino del flujo líquido y una área de interfaz sólido-líquido variables.

Evidentemente el rendimiento de un fermentador está ligado íntimamente con la superficie interfacial, y resulta que esta forma de fermentador es, en realidad, inestable en el sentido de que el rendimiento varía continuamente. La frecuencia y magnitud de estas variaciones está conectada íntimamente con el tamaño del fermentador, el tamaño y la forma del relleno, así como con la acumulación media de los microorganismos.

Los procesos con microorganismos adheridos a una superficie soporte se utilizan principalmente en la industria de tratamiento de aguas residuales con el nombre de «filtro de goteo»<sup>17</sup> (Jenkins, 1970). Normalmente se desarrolla una película o capa de microorganismos sobre piedra triturada, si bien las superficies de soporte en plástico

<sup>16</sup> Espacio libre por unidad volumétrica del lecho.

<sup>17</sup> Este es el nombre utilizado normalmente por este fermentador. La inclusión de la palabra «filtro» es quizás desafortunada, pero puede argumentarse que las películas microbianas «filtran» (eliminan) la materia orgánica e inorgánica suspendida en las aguas residuales.

están ganando popularidad. Las aguas residuales que contienen compuestos orgánicos se hacen pasar sobre superficies soporte en forma de una película líquida que desciende por gravedad. Conforme el líquido pasa a través del filtro, las impurezas orgánicas son eliminadas por la masa microbiana. Los productos consisten en compuestos oxidados que poseen cadenas de carbono más cortas, dióxido de carbono y nitratos así como microorganismos adicionales (ver figura 1.1).

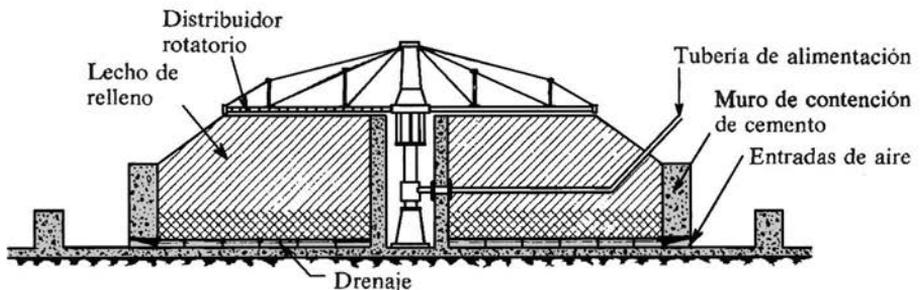
El fermentador (figura 2.17) consiste usualmente en un lecho circular o rectangular de material disgregado que se mantiene sobre un sistema con drenaje apropiado en la parte inferior. El tamaño de las partículas está en un intervalo entre 2 y 15 cm con una altura de relleno media de unos 2 m. Las dimensiones de la superficie están limitadas sólo por la disponibilidad de terreno y por los medios adecuados para distribuir el efluente uniformemente sobre la superficie del filtro. Para delimitar el lecho pueden usarse muros de contención de hormigón y metal expandido o tela metálica. Un método más barato supone acumular las partículas con su ángulo normal de talud.

Durante la operación, el agua residual se pulveriza de forma continua sobre el lecho mediante un distribuidor, el cual es rotatorio en lechos circulares o se mueve de delante hacia atrás alternativamente en los lechos rectangulares. Este método de aplicación tiene efectivamente como resultado una alimentación intermitente y cada sección del fermentador es dosificada por un periodo y a continuación «inutilizada» por un periodo. La duración relativa de estos dos periodos puede ser de primordial importancia en lo que se refiere al rendimiento del fermentador (Hawkes, 1963), y debe suministrarse oxígeno disuelto suficiente para permitir que tengan lugar los procesos de oxidación biológica en la película microbiana. El efluente tratado pasa del medio al sistema de drenaje inferior y es descargado mediante conductos apropiados.

El «filtro de goteo» se usa para eliminar la materia orgánica soluble e insoluble, y la materia inorgánica insoluble, de las aguas residuales. En la práctica la cantidad de materia insoluble disminuye primero al pasar el agua a través de etapas preliminares de criba y sedimentación (figura 2.18), y el efluente pasa del filtro a una etapa de sedimentación posterior para eliminar la masa microbiana arraestrada del relleno.

En tales lechos se usa algunas veces la recirculación:

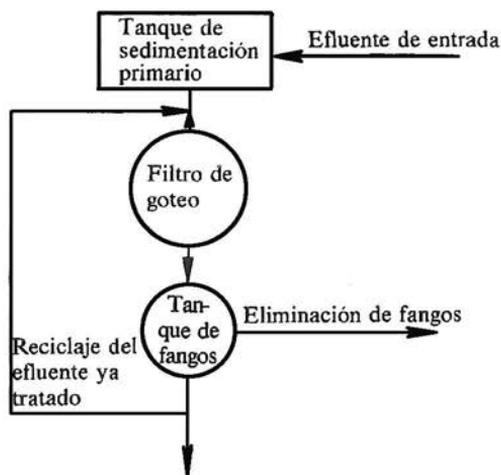
1. para suministrar un caudal adicional cuando la cantidad de agua a tratar está por debajo del valor medio, y así mantener a los organismos en un estado viable, o



2.17. Filtro de goteo

2. para diluir alimentaciones muy concentradas.

Los fermentadores basados en el uso de películas biológicas de espesor controlado indicados en la figura 2.15a han encontrado hasta la fecha, su utilidad puramente como una configuración de laboratorio conveniente para el estudio de la cinética microbiana (ver capítulos 4 y 5), y como un método potencial para resolver los problemas de arrastre que se presentan en los fermentadores continuos de tanque agitado (ver capítulo 7).



**Figura 2.18.** Diagrama de flujo de una planta de depuración de aguas residuales típica, que utiliza el filtro de goteo.

## 2.5 Fermentación en «lecho fluidizado»

El fenómeno ilustrado en la figura 2.14b representa una fluidización «individualizada»; éste es un modo uniforme de fluidización, el cual es una característica de los lechos de partículas regulares suspendidas en una corriente líquida ascendente (Coulson y Richardson, 1968). Si está implicada una fase gaseosa adicional, entonces las partículas tendrán tendencia a estar menos uniformemente distribuidas en el lecho.

Dos importantes características de lechos con mezclas de partículas con distintos tamaños, como en el caso de flocúlos microbianos, son el incremento de la porosidad desde el fondo hasta la parte superior del lecho y la disminución del movimiento de las partículas cuando se compara con lechos que contienen partículas de tamaño uniforme.

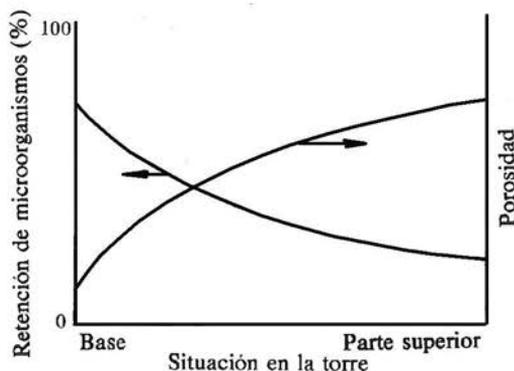
Puesto que la porosidad o fracción de huecos es una medida del espacio libre dentro de un lecho, representa también una medida de la retención microbiana cuando se

expresa como volumen húmedo por unidad de volumen del lecho. Entonces cabe esperar una variación en la retención microbiana dentro de un fermentador de lecho fluidizado (figura 2.19). Durante la fluidización las partículas más pequeñas ascienden en relación con las partículas más grandes y se produce una situación en la que las partículas más pequeñas están en la parte superior y las más grandes en el fondo del lecho. Como las partículas más pequeñas tienen la menor velocidad de sedimentación el lecho se organiza de forma que las partículas más pequeñas estén en la región de porosidad más grande y velocidad lineal menor (Coulson y Richardson, 1968).

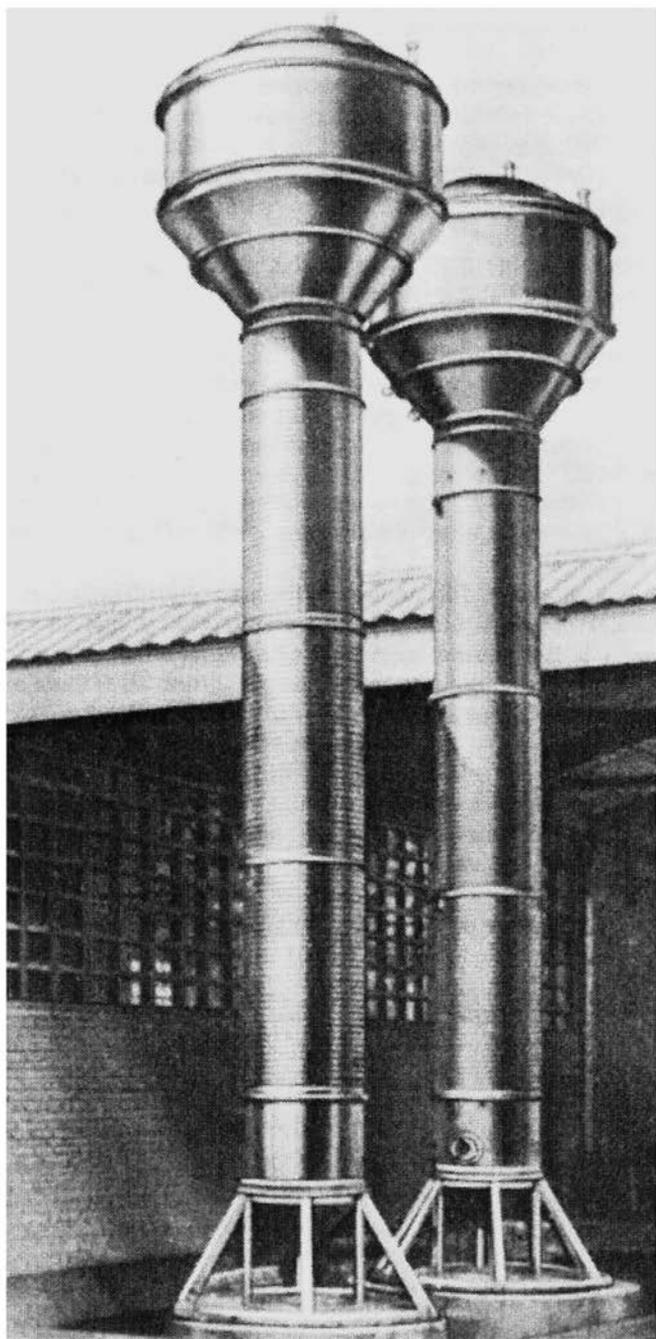
Un modelo cualitativo razonable, para el modelo de flujo líquido-sólido, implicaría un líquido en flujo «de pistón» (ver página 16, nota a pie de página 2) ascendiendo por un lecho de partículas suspendidas relativamente estacionarias. En estas circunstancias los flóculos individuales en el fermentador estarían asociados con *las condiciones ambientales que caracterizan su posición en el lecho*. Esta situación es análoga al uso de películas microbianas fijadas en fermentadores tubulares y contrasta con los fermentadores tubulares que contienen flóculos microbianos, donde los flóculos están expuestos a unas condiciones ambientales cambiantes como en el fermentador discontinuo.

A causa de las pequeñas diferencias de densidad entre los flóculos y el fluido son inevitables velocidades de líquido bajas. El crecimiento y agotamiento de los flóculos son también consideraciones importantes ya que producirán el movimiento de las partículas, el primero en sentido descendente y el último en sentido ascendente. Los cambios en las características físicas del fluido, como resultado de las reacciones que tienen lugar dentro del lecho, también afectarán la situación. Por ejemplo, la disminución de la densidad y de la viscosidad del fluido en la dirección del flujo provocarán una separación peor definida de las partículas de distinto tamaño.

El **fermentador en forma de torre**, que se ha desarrollado para la producción continua de cerveza, se basa en estos principios generales (Ault et al., 1969). En este proceso los flóculos de levadura se mantienen en suspensión por el movimiento ascendente del medio nutriente y las partículas arrastradas son devueltas por medio de un



2.19. Retención de flóculos en un fermentador de torre.



**Figura 2.20.** Fermentador de torre (por cortesia de A. P. V. Co. Ltd.).

dispositivo de sedimentación situado en la parte superior de la torre. Esencialmente el fermentador consiste en un cilindro vertical con una relación aparente (longitud/diámetro) de aproximadamente 10:1 (figuras 2.20 y 2.21). En la parte superior de la torre se coloca un separador que induce la coalescencia de las burbujas de gas producidas durante la reacción y facilita su separación de la fase líquida. Dentro del separador hay una zona en reposo, libre de gas ascendente, de forma que la levadura puede sedimentar y volver al cuerpo principal de la torre, pudiendo extraerse la cerveza clarificada.

Una levadura floculenta, p.e. una levadura capaz de alcanzar tamaños de floculos relativamente grandes, es esencial para una fermentación alcohólica en un FLF a velocidades de flujo aceptables, puesto que de otra manera se arrastraría una gran proporción de levadura y se mantendría una concentración de levadura insuficiente. Una concentración de levadura media del 25% en peso (expresada como peso húmedo centrifugado) es normal con valores del 30-35% en peso en el fondo de la torre y del 5-10% en peso en la parte superior. La concentración de levadura depende de la composición y de la concentración del medio nutriente, de la cepa de levadura usada, y de la temperatura de operación. Una característica significativa de la torre es la caída progresiva y continua en el peso específico del medio nutriente entre el fondo y la parte superior de la torre. Hay una caída inicial rápida, debida a la fermentación de glucosa, fructosa, sacarosa y maltosa, seguida de una caída más lenta hacia la mitad y en la parte superior de la torre debida a la fermentación de la maltosa remanente y maltotriosa (Greenshields y Smith, 1971).

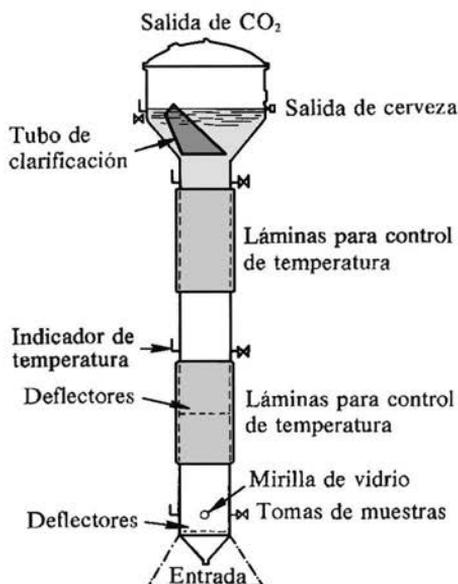


Figura 2.21. Diagrama de un fermentador de torre (Shore y Royston, 1968).

Tabla 2.1. Evolución de la concentración en los fermentadores.

Fermentador	Dependencia con el tiempo de las concentraciones de sustrato, masa microbiana y producto bioquímico	Variación de las concentraciones de sustrato y producto bioquímico con la posición	Variación de la concentración de masa microbiana con la posición	Evolución del medio en que se encuentra la masa microbiana
Intermitente	Dependiente	Completamente mezclado (Ideal)	Completamente mezclado (Ideal)	Varía a lo largo de la fermentación
FCTA	Independiente	Completamente mezclado (Ideal)	Completamente mezclado (Ideal)	Constante (todos los flóculos están expuestos al mismo medio durante todo el tiempo)
Fermentador tubular que contiene «flóculos» microbianos	Independiente	Varía desde la entrada a la salida	Varía desde la entrada a la salida	Varía según ascienden los flóculos por el fermentador
Fermentador tubular que contiene películas microbianas	En general independiente, aunque se pueden producir pequeñas acumulaciones de la película microbiana; esto afectará también a las concentraciones de sustrato y producto	Varía desde la entrada a la salida	En general independiente de la posición	Constante (sin embargo, la película microbiana está expuesta a diferentes condiciones ambientales en puntos diferentes del fermentador)
Fermentador de lecho fluidizado	Independiente	Varía desde la entrada a la salida	Varía desde la entrada a la salida	En general constante aunque tiene lugar algún movimiento de flóculos. (los flóculos están sometidos a diferentes condiciones ambientales en los distintos puntos del fermentador)

La fermentación alcohólica se lleva a cabo anaeróbicamente y consecuentemente el crecimiento microbiano es relativamente lento; la producción de dióxido de

carbón gaseoso altera el modelo de flujo e incrementa la extensión de la mezcla y de la atrición de las partículas.

## 2.6 Principales características de operación de los fermentadores

Las principales configuraciones de fermentador en uso, tanto industrial como de laboratorio, se han catalogado y descrito en las secciones previas de este capítulo. Las principales características del funcionamiento de estos fermentadores se resumen en las tablas 2.1 y 2.2. La primera de estas tablas está relacionada con la forma en que la concentración, es decir, sustratos, masa microbiana y productos bioquímicos, varía en un fermentador con el tiempo y la posición, así como con la historia ambiental a la que está expuesta la masa microbiana. Desde un punto de vista industrial puede ser de considerable importancia la capacidad de control del pH y de la temperatura, como lo es cualquier restricción que pueda haber en la velocidad de flujo; estas características están recogidas en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Características del funcionamiento de los fermentadores.

Fermentador	Control de pH	Control de la temperatura	Características de importancia industrial	Principales aplicaciones industriales
Discontinuo	Es posible	Es posible	Mucha mano de obra	La mayor parte de las fermentaciones comerciales (ver apéndice 1)
FCTA	Es posible	Es posible	Caudal limitado por el arrastre	Depuración de aguas residuales; Producción de proteínas microbianas
Fermentador tubular conteniendo flóculos microbianos	Difícil de controlar salvo con gran recirculación	Es posible	Requiere una alimentación constante de microorganismos	
Fermentador tubular conteniendo películas microbianas	Difícil de controlar	Es posible	Difícil de controlar la «retención» de microorganismos dentro del fermentador	Depuración de aguas residuales; Producción de vinagre
Fermentador de lecho fluidizado	Difícil de controlar	Es posible	Caudal limitado por el arrastre	Producción de sidra y cerveza