

CAPÍTULO 2. SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS DEL TRATAMIENTO CON FANGOS ACTIVADOS.

Desde que en 1914, Arden y Locket pusieron a punto un proceso de fangos activados, mediante la introducción de una recirculación aireada de biomasa, los problemas de crecimiento de las bacterias filamentosas y las respectivas interferencias que este crea en la marcha normal del proceso, son uno de los problemas fundamentales a solucionar en este tipo de tratamientos biológicos.

La necesidad de eliminar este tipo de problemas, ha generado una evolución considerable en el sistema de fangos activados, tanto en la aparición de variantes nuevas de proceso como en la tecnología aplicada al mismo.

El objeto de este capítulo, es el estudio de diversas formas de atacar a los problemas de bulking y foaming. Aunque en el capítulo anterior se expusieron algunas de estas soluciones, se hace necesario profundizar en el estudio de algunas de ellas, como es el caso de los selectores, y de incorporar otro tipo de soluciones no mencionadas hasta el momento.

II.1. El Selector.

Desde la década de los 70 hasta la fecha, se ha avanzado en el conocimiento de los mecanismos de competición entre los microorganismos filamentosos y los formadores de flóculos, y hoy en día existen multitud de teorías que tratan de explicar la resistencia al crecimiento de bacterias filamentosas que se ha observado en algunos tipos de reactores.

Los selectores se basan en la creación de una serie de condiciones que favorezcan el crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos respecto al de las filamentosas. Los primeros en patentar un sistema de este tipo fueron Chudoba, Grau y Dohanyos (1972), del Instituto de Tecnología Química de Praga, su sistema se basaba en la compartimentalización de la zona inicial del reactor y en la mezcla de la recirculación y del agua residual a tratar en el primer compartimento, al que llamaron selector, aunque en la bibliografía se pueden encontrar términos como zona de premezcla o zona de contacto inicial (ICZ), que se refieren al mismo tipo de disposición del reactor.

Dado que el objetivo de este apartado es el estudio del selector, como método de eliminación de los problemas de bulking y foaming, se comenzará con la explicación de qué es la selección biológica, para continuar con la clasificación de los distintos tipos de selectores y de algunas teorías que justifican el empleo de selectores, finalmente se estudiará experiencias reales con selectores.

II.1.1. Selección biológica.

Como ya se ha comentado, la selección biológica se basa en favorecer el crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos frente al de las filamentosas; para ello, se tienen

que crear unos mecanismos en los que las formadoras de flóculos compitan ventajosamente en el consumo de las fuentes de energía, carbono y otros sustratos, limitando así el crecimiento de las filamentosas.

Existen dos vías para conseguir esta selección:

- **Selección cinética**, en la que se favorece la velocidad de crecimiento de las formadoras de flóculos, mediante la creación de condiciones en las que las tasas de utilización del carbono, fuentes de energía o sustratos sean mayores en las formadoras de flóculos. Este método se basa en las diferentes velocidades de los procesos catabólicos y anabólicos.

En un reactor biológico por fangos activados, existen distintas especies de microorganismos que interactúan entre ellos y compiten por el sustrato. Estos microorganismos, incrementan la biomasa del sistema por los siguientes mecanismos:

- Acumulación de sustratos en el interior de las células.
- Síntesis de productos reserva.
- División y crecimiento de nuevas células.

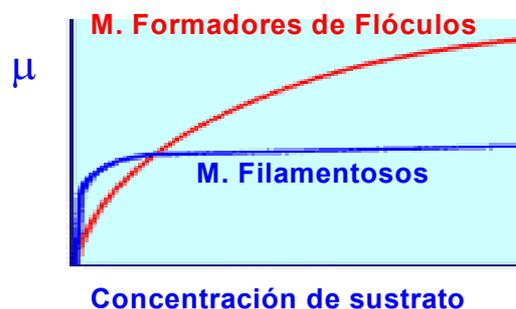


Figura II.1. Tasas de crecimiento en función de la concentración de sustrato.

En la selección cinética, la concentración de sustrato es el elemento de presión selectiva que promueve el crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos frente a las filamentosas, tal y como se muestra en la Figura II.1; el efecto de la concentración de sustrato sobre la selección cinética, debe considerarse desde dos perspectivas de crecimiento:

- **Crecimiento equilibrado**: en el que las etapas de acumulación y síntesis de sustratos, y la etapa de crecimiento celular se dan simultáneamente. Es decir, la selección basada en el crecimiento equilibrado, debe realizarse bajo unas condiciones en las que las etapas de acumulación y síntesis sean más rápidas en las bacterias formadoras de flóculos.

- Crecimiento no equilibrado: en el que las etapas de acumulación de sustrato y las de crecimiento celular están total o parcialmente separadas. Este modo de selección se basa en que entre la acumulación de sustratos y la síntesis de los mismos, en las células de los microorganismos se producen una serie de sustancias reserva; la separación en el tiempo de las etapas de acumulación y síntesis, produce un período de metabolismo endógeno, es decir, un período de inanición en el que los microorganismos consumen las sustancias reserva. Para que los microorganismos sobrevivan a la inanición, es necesario que tengan necesidades energéticas bajas durante este período, así como una gran cantidad de sustancias reserva almacenadas en sus células.

- **Selección metabólica**, que consiste en el bloqueo de las vías metabólicas que tienen las bacterias filamentosas, para acceder al sustrato.

Los procesos que intervienen en la selección metabólica son:

- Nitrificación: si bien las bacterias nitrificantes no son formadoras de flóculos, necesitan de éstos para asentarse. Las bacterias nitrificantes son de crecimiento lento y por lo tanto necesitan de elevados tiempos de retención en el sistema y que las bacterias organotrofas estén en fase de metabolismo endógeno, condiciones que favorecen a los microorganismos resistentes a la inanición.

- Desnitrificación: en este caso, la selección se produce en ambientes anóxicos; en este tipo de ambientes, los microorganismos dominantes son aquellos capaces de oxidar carbono orgánico utilizando como aceptor de electrones el nitrógeno del nitrato o del nitrito.

- Eliminación biológica del fósforo: este tipo de selección está ligada a la alternancia de condiciones anaerobias y aerobias. En la zona anaerobia actúan las bacterias fermentativas, que generan ácidos volátiles de bajo peso molecular utilizados por las bacterias Poli-P, que intervienen en los procesos de eliminación del fósforo. Ambos tipos de bacterias, las fermentativas y las Poli-P, son formadoras de flóculo, por lo que se favorecen la floculación y la sedimentabilidad.

II.1.2. Clasificación de los selectores.

Se seguirá la clasificación realizada por Albertson en 1991⁽¹²⁾. Este autor estudió el esponjamiento en doce E.D.A.R. de Estados Unidos, y clasifica los selectores según el tipo de ambiente:

- **Anaerobios**: se caracterizan por la falta de inyección de aire u oxígeno, y por contenidos de nitritos y nitratos en el influente inferiores a 0,5 mg/L.

- **Anóxicos**: caracterizados por la falta de inyección de oxígeno o aire, y por un contenido de nitritos y nitratos en el influente superior a 0,5mg/L.

- **Aerobios**: aquellos que añaden aire u oxígeno y tienen contenidos de oxígeno disuelto en el rango entre 0 y 1 mg/L.

- **Óxicos:** aquellos que añaden aire u oxígeno y tienen contenidos de oxígeno disuelto superiores a 1 mg/L.
- **De alta F/M:** con cargas máxicas superiores a 3 kg DBO₅/kg SSML·d en ICZ.
- **De bajo O.D.:** con contenidos de O.D. inferiores a 0,3mg/L en ICZ.
- **De alto O.D.:** con contenidos de O.D. superiores a 2,0mg/L en ICZ.

ICZ: Zona inicial de contacto (Initial Contact Zone).

II.1.3. Teorías sobre el comportamiento de las filamentosas en los selectores.

A continuación, se exponen algunas teorías que tratan de explicar los mecanismos de selección de microorganismos, que tienen lugar en determinadas condiciones ambientales.

A) Wanner y Grau (1989), Wanner (1992)^(13,14).

Clasifican en cuatro grupos a las bacterias filamentosas:

- 1. Grupo S:** corresponde al grupo de filamentosas *Sphaerotilus natans* y los Tipos 1701, 0041 y 0675. La asimilación de los sustratos la realizan únicamente bajo condiciones óxicas. Su crecimiento se relaciona con la presencia de azúcares y otros sustratos fácilmente degradables en el agua residual, altos tiempos de retención celular y bajo oxígeno disuelto.
- 2. Grupo C:** organismos como *Thiothrix* y Tipo 021N, capaces de metabolizar el sulfuro y que crecen en zonas óxicas.
- 3. Grupo A:** son representantes de este grupo la *M. Parvicella*, *N. limicola* y Tipo 0092. Se caracterizan por su capacidad de utilización de sustratos en cualquier tipo de ambiente. Sus capacidades de acumulación de sustratos de bajo peso molecular en zonas óxicas y anóxicas, y de síntesis de sustancias reserva son similares a las de las formadoras de flóculo.
- 4. Grupo F:** microorganismos productores de espumas, entre los que se encuentran los representantes anteriores y los nocardioformes.

La Tabla II.1. resume la respuesta de cada uno de los grupos ante el empleo de los distintos tipos de selector:

GRUPO	Condiciones óxicas	Condiciones anóxicas	Condiciones anaerobias
S	-	-	-
C	-	-	-
A	0	0	?
F	?	?/-	-/?

(-) Eliminación (0) Sin efecto (?) Efecto incierto

Tabla II.1. Comportamiento de las filamentosas en los selectores, Jiri Wanner y Grau (1989,1992).

B) D. Jenkins (1992)⁽¹⁵⁾.

David Jenkins es uno de los investigadores más reconocidos en el campo de la eliminación de los efectos que producen los microorganismos filamentosos sobre el normal funcionamiento del tratamiento biológico de fangos activados.

En su teoría sobre el comportamiento de las filamentosas en los selectores, Jenkins propone la división de las filamentosas y de las bacterias formadoras de flóculos en dos grupos respectivamente:

1. Formadores de flóculo 1 (FF1): representados por las especies características de los sistemas de mezcla completa con alimentación continua y a las de los selectores anaerobios.

2. Formadores de flóculo 2 (FF2): representados por las especies características de los selectores anóxicos y aerobios, así como los que aparecen en los sistemas de alimentación intermitente.

3. Organismos filamentosos 1 (FO1): representados por *S. Natans*, *Thiothrix*, *N. limicola*, *H. hydrossis*, *Gordona* (*Nocardia*), Tipos 1701,021N y hongos.

4. Organismos filamentosos 2 (FO2): representados por *M. Parvicella* y Tipo 0092.

En su estudio de referencia, muestra abundante y precisa información acerca de las propiedades que muestran los microorganismos de los cuatro grupos.

El modelo de Jenkins está en concordancia con las siguientes observaciones:

- *S. natans*, *H. hydrossis* y Tipo 1701 (FO1), dominan a los FF1 en condiciones de O.D. bajo. *M. Parvicella* (FO2) dominará a los FF1 a bajas tasas de crecimiento, es decir, a altas edades de fango. *M. parvicella* (FO2) dominará a los FF1 de selectores anaerobios cuando haya bajo O.D. en la zona aerobia.

- *S. natans*, *Thiothrix*, *N. limicola*, Tipo 1701, *Nocardia* y posiblemente *H. Hydrossis* (FO1), pueden ser dominadas en selector aerobio por FF2, salvo a altas edades de fango, debido a la baja capacidad de estas filamentosas para aprovechar sustratos solubles y almacenarlos en condiciones de crecimiento no equilibradas. Las FO1 serán dominadas

por FF2 en un selector anóxico, debido a la baja capacidad e incompleta extensión de la desnitrificación.

- *S. natans*, *H. hydrossis*, Tipo 021N, *N. limicola* y Tipo 1701 (FO1) pueden ser dominados, a tasas medias de crecimiento y en un selector anaerobio, por los FF1 debido a su incapacidad de internalizar anaeróbicamente fuentes de carbono solubles y almacenar polifosfatos en el crecimiento no equilibrado. Sin embargo, a tasas de crecimiento bajas, los FO2 pueden dominar por su capacidad de internalizar anaeróbicamente fuentes de carbono solubles y almacenar polifosfatos en el crecimiento no equilibrado.
- El modelo explica además el bulking por desequilibrios de nutrientes basándose en las tasas de aprovechamiento de cada una de las especies.
- De la misma manera explica el esponjamiento a pH menores de 6, por las tasas de crecimiento características por debajo de este valor.
- El modelo explica también, la aparición de espumas por el atrapamiento y la recirculación de los microorganismos responsables.

El modelo puede no ser válido para el caso de selector anaerobio con presencia de sulfuros en el influente, dado que puede haber bacterias filamentosas capaces de crecer mixotróficamente y aprovechar dichos sulfuros.

De las dos teorías anteriores se desprende el interés de conocer que tipo de bacteria provoca el esponjamiento en cada caso concreto. Ambos modelos, permiten seleccionar un tipo de ambiente en función del tipo de bacteria filamentosa que genere el problema; además, el modelo de Jenkins introduce como criterio de selección los niveles de oxígeno disuelto y las edades de fango.

II.1.4. Análisis de las experiencias con selectores.

Desde que en 1792 Chudoba, Grau y Donhayos patentaran una modificación del reactor por fangos activados, consistente en una compartimentalización a la que llamaron selector, son muchas las experiencias acumuladas y los tipos de selectores llevados a la práctica. En la mayor parte de los casos, los resultados fueron positivos y se consiguió la reducción del índice volumétrico de fangos, es decir, la erradicación del fenómeno del esponjamiento. No existen sin embargo, unos criterios bien definidos para el diseño de los selectores, aunque se encontrarán multitud de recomendaciones, en algunos casos contradictorias entre sí.

La dificultad de establecer unos criterios universales para el diseño de los selectores, radica en la enorme variedad de los contenidos de las aguas residuales, así como en la variedad de microorganismos que se encontrarán en los distintos reactores. De todas formas, no parece haber una única disposición de ambientes para la eliminación de un problema concreto de bulking.

A continuación se muestran algunas experiencias en plantas de depuración reales y en plantas piloto.

De su estudio se extraen algunas conclusiones para la determinación de los rangos y condiciones de operación que han demostrado ser eficaces en el tratamiento del problema del esponjamiento; sin olvidar el problema de las espumas, que aunque hasta la fecha la mejor solución parece ser su retirada física, existen experiencias en las que se ha eliminado a través de la implantación de selectores; hay que recordar que algunos tipos de bacterias filamentosas son responsables en la aparición de ambos problemas.

A) Orris E. Albertson (1991)⁽¹²⁾, realiza una recopilación de experiencias en el artículo de referencia, dicha recopilación se muestra en las Tablas II.2 y II.3:

Autor	Tipo de selector	Alimentación	O.D. (mg/L)	ICZ F/M kg/kg·d	I.V.F. mL/g
Davidson, 1959	A _N	Continua	0,0	1,0	34
Bhatla, 1967	A _L	Continua	0,0	>2,5	<120
British WPRL, 1969	A	Continua	?	0,8	<75
Milbury, 1971	A _L	Continua	0,0	>2,0	<100
Chudoba, 1973	A _L	Continua	≤0,5	≥2,5	<100
Heide & Pasveer, 1973	A _N /A _X	Continua Discontinua	0,0 0,0	>5,0 ∞	<100 40
Rensink, 1974	A	Continua	?	3,6	<100
Tomlinson, 1976	A	Continua	?	>2,0	<100
Spector, 1977	A _N	Continua	≤0,7	>3,0	≤100
Chudoba & Wanner, 1988	A _H	Continua	≈1,0	12,0	<50

Selectores:

A_N: Anaerobio A_X: Anóxico A: Aerobio
O_X: Óxico A_L: Bajo O.D. A_H: Alto O.D.

Tabla II.2. Primeras experiencias con selectores.

Albertson estudia los resultados obtenidos con la implantación de dispositivos selectores, en doce E.D.A.R. norteamericanas, tras el estudio del desarrollo del esponjamiento en dichas E.D.A.R llega a las conclusiones siguientes:

- El factor dominante en el control del esponjamiento, es el gradiente alto o bajo de carga másica (F/M).
- El gradiente de F/M es probablemente beneficioso en todos los ambientes (A_N, A_X, O_X), para controlar el bulking.
- Si F/M > 4 kg/kg·d y el contenido de sólidos en el reactor se mantiene en el rango 2,5-4,0 gSSLM/L, la elevada demanda de oxígeno puede provocar condiciones anaerobias en las bacterias formadoras de flóculos, debido a que en esta escasez de oxígeno las filamentosas pueden verse favorecidas por su mayor superficie específica.

- El empleo de altas cargas másicas (>4 kg/kg·d) en la ICZ, en ambiente anaerobio, seguido de una etapa aerobia (O.D.<1,0 mg/L) o anóxica, es posiblemente un paso necesario en el control del crecimiento de las bacterias filamentosas.
- El contacto de los MLSS y la DBO₅ soluble en condiciones de baja carga másica, debe ser evitado para minimizar las posibilidades de bulking.

Planta	Tipo de selector	O.D. ICZ (mg/L)	F/M ICZ (kg/kg·d)	I.V.F. Rango	(mg/L) Medio
Hatfield, PA	A _X /O _X	0,0	0,13	46-70	55
Tri City, OR	A _X /O _X	0,0	0,6-1,3	50-90	75
Soutnerly, OH	A _X /A _N /O _X	0,0	4,5;2,3;1,0	58-128	84
Vineland, NJ	A _X /O _X	0,0	0,75	80-260	140
Jackson Pike, OH	A _L /O _X	≤0,3	4;2	52-90	75
Davenport, IA	A _L /O _X	≤0,4	0,94	61-210 ¹	92
Tree Top, WA	A _N /O _X -O _X ² A _N /O _X ³	0,0	∞	40-70	50
		0,0	1,8		
Star Valley Coop, WY	A _N /O _X	0,0	1,6;0,8;0,5	25-100	70
Newark, OH	A _N /A _X /O _X	0,0	∞	85-201	124
ESA, FL	A _N / A _X / O _X / A _X / O _X	0,0	0,35-0,8	89-177	127
Middletown, OH	A _H / O _X	1,0	12;6;4;3	47-65	56
OWASA, NC	O _X / A _X / O _X	≥0,7	0,3-0,8	60-300	110

¹: Altos I.V.F. durante la experimentación con aireación completa (125-210 mL/g).

²: Estudios piloto en un reactor de alimentación discontinua.

³: Estudios en planta real con alimentación continua (I.V.F.) no definido.

Tabla II.3. Resultados de diversos procesos diseñados para la eliminación del bulking.

B) Y. J. Shao y D. Jenkins (1989)⁽¹⁶⁾, realizan un estudio sobre los selectores anóxicos en pruebas de laboratorio y plantas piloto tipo batch. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas II.4, II.5 y II.6:

Nº de Experimento	4	5	6	7	8
Período de operación (días)	21	21	27	28	24
Temperatura (°C)	21	27	22	25	25
Tiempo de detención en el selector (min)	15	25	40	30	25
FANGO ACTIVO RECIRCULADO					
NO ₃ -N (mg/L)	12	12	12	12	32
NO ₂ -N (mg/L)	-	-	-	-	1,0
SSVLM (mg/L)	2500	2000	700	1900	2800
EFLUENTE DEL SELECTOR					
D.Q.O. soluble (mg/L)	150	100	140	120	108
Acetato (mg/L)	70	40	100	35	3
NO ₃ -N (mg/L)	-	-	-	0,6	0,7
NO ₂ -N (mg/L)	-	-	-	0,7	0,7
I.V.F. (mL/g)	550	240	750	220	140

Figura II.4. Datos medios de operación con selectores anóxicos, empleo de agua residual con adición de acetato.

Nº de Experimento	9	10	11	12	13
Período de operación (días)	20	20	22	20	18
Temperatura (°C)	25	20	20	20	20
Tiempo de detención en el selector (min)	25	25	25	25	40
FANGO ACTIVO RECIRCULADO					
NO₃-N (mg/L)	52	52	32	62	62
NO₂-N (mg/L)	1,2	0,7	1,4	0,2	0,3
SSVLM (mg/L)	3000	3000	3000	3000	3000
EFLUENTE DEL SELECTOR					
D.Q.O. soluble (mg/L)	101	102	112	85	60
Acetato (mg/L)	3	5	15	5	21
NO₃-N (mg/L)	3	10	3	22	15
NO₂-N (mg/L)	1,2	1,2	1	4	3
I.V.F. (mL/g)	120	250	250	150	110

Tabla II.5. Datos medios de operación con selectores anóxicos, empleo de agua residual con adición de acetato(Continuación).

Nº de Experimento	14	15	16	17
Período de operación (días)	28	26	10	36
Temperatura (°C)	20	25	20	20
Tiempo de detención en el selector (min)	40	25	10	25
FANGO ACTIVO RECIRCULADO				
NO₃-N (mg/L)	52	12	12	12
NO₂-N (mg/L)	1,0	-	-	-
SSVLM (mg/L)	3000	3000	3000	3000
EFLUENTE DEL SELECTOR				
D.Q.O. soluble (mg/L)	45	80	103	60
Glucosa (mg/L)	<1	<1	3,2	0,2
NO₃-N (mg/L)	<1	<1	<1	<1
NO₂-N (mg/L)	0,13	0,05	-	-
I.V.F. (mL/g)	65	70	300	65

Tabla II.6. Datos medios de operación con selectores anóxicos, empleo de agua residual con adición de glucosa.

Los ensayos se realizaron con aguas residuales a las que se añadió acetato y glucosa para estudiar las tasas de eliminación sobre estos sustratos. Durante el estudio, los microorganismos presentes fueron las filamentosas *Thiothrix* y Tipo 021N, además de la bacteria formadora de flóculos *Zooglea Ramigera*. Sobre estos microorganismos y sobre los selectores anóxicos, Shao y Jenkins obtienen una serie de parámetros que pueden emplearse en el diseño de un selector anóxico:

	Acetato	Glucosa	D.Q.O. soluble
Ratio de eliminación de sustrato (mg/gSSVLM·h)	90	85	75
Ratio de reducción de NO₃-N (mg NO₃-N/gSSV·h)	12	11	10

Tabla II.7. Ratios de eliminación de sustrato y desnitrificación típicos en un selector anóxico.

MICROORGANISMOS	Eliminación de Acetato (mg Ac/gSSLM·h)	Eliminación de Nitrato (mg NO ₃ -N /gSSLM·h)
Zooglea Ramigera	120	20
Thiothrix sp.	0,3	0,25
Tipo 021N	< 0,1	0,05

Tabla II.8. Parámetros de eliminación característicos de distintos tipos de microorganismos

En los experimentos en los que se añadió acetato, las bacterias filamentosas predominantes fueron Thiothrix y Tipo 021N, mientras que en los que se añadió glucosa se encontraron cantidades significativas de S. natans.

Los autores de estos experimentos llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los selectores anóxicos pueden eliminar el esponjamiento, si se opera con suficientes tiempos de retención y niveles de nitrato; debido a las mayores tasas de desnitrificación que tienen las bacterias formadoras de flóculos.
- La efectividad del selector anóxico depende de la completa separación de la D.Q.O. rápidamente asimilable.
- El contenido de DQO soluble en el efluente del selector, debe ser inferior a 60 mg/L para asegurar unas características sedimentables del fango adecuadas.
- La relación D.Q.O. soluble/NO₃-N separado está en el rango 6,0-6,7.
- Un incremento en la temperatura en el selector anóxico, afecta positivamente a la sedimentabilidad del fango.
- Thiothrix y Tipo 021N desnitrifican sólo hasta NO₂, mientras que la formadora de flóculo Zooglea Ramigera lo hace hasta N₂.

C) Kruit y otros en 1994⁽¹⁷⁾, estudian la influencia que tiene el O₂ aportado en los selectores, sobre las propiedades sedimentables del fango. El estudio se realiza en siete plantas holandesas, donde Microthrix parvicella y Tipo 021N fueron las bacterias filamentosas predominantes.

Los autores de este estudio llegan a las conclusiones siguientes:

- La caracterización de la D.Q.O., puede ser un parámetro para la determinación de las condiciones de O₂ en el selector.
- A cargas máxicas elevadas (>7 kg DBO₅/ kg SSLM-d), no parece influir la presencia de O₂; en estos casos, no se aprecian diferencias en los resultados de selectores con y sin aireación.

- En presencia de O_2 y cuando la suma de las fracciones rápidamente asimilable (RBCOD) y rápidamente hidrolizable (RHCOD) de la D.Q.O. superan el 40% del total, la biosorción se incrementa en un 10-20% después de 30 minutos.
- Cuando $(RBCOD + RHCOD) > 50\%$ puede emplearse un selector no aireado para la eliminación del bulking.
- Cuando $40\% < (RBCOD + RHCOD) < 50\%$ y la carga másica es inferior a 7 kgD.B.O./ kg SSLM·d puede instalarse un selector aireado.

D) Dalentoft y Thulin en 1997⁽¹⁸⁾, realizan una serie de estudios sobre selectores aerobios. Las conclusiones a las que llegan son las siguientes:

- La relación $O_2/ D.Q.O.$, puede ser una medida de la fracción de D.Q.O. que es absorbida o convertida en biomasa.
- En el selector aerobio, el incremento de la carga másica (F/M) supone menores necesidades de la relación O_2/ DQO .
- El oxígeno aportado en un selector aerobio u óxico, debe ser al menos el 50% del total del oxígeno aportado.

II.1.5. Patentes.

El empleo de selectores, puede requerir licencias ya que algunos están patentados.

Los selectores aerobios están patentados para algunos rangos de oxígeno disuelto y el selector anaerobio está patentado. Algunas de las patentes se mencionan a continuación:

Air Prod & Chem, tiene varias patentes (US4056465, US3864246, EP0099421, EP0132609, US3994802, US4731185) sobre diversas disposiciones de selectores anaerobios y aerobios. Del estudio de dichas patentes, se obtiene el método a través del cual se mantienen los niveles de O_2 y $NO_2^- + NO_3^-$ por debajo de ciertos límites (0,7 ppm de O_2 y 0,3 ppm de $NO_2^- + NO_3^-$ expresado en nitrógeno elemental), necesarios para obtener un ambiente anaerobio; existen varios métodos para impedir la entrada de oxígeno atmosférico en el tanque anaerobio:

- Aportar un gas inerte como nitrógeno o dióxido de carbono, que forme un manto en la superficie del líquido e impida el contacto directo del licor mezcla y la atmósfera.
- Instalar una tapadera suelta sobre la superficie del líquido.
- Instalar una cubierta rígida sobre la superficie del líquido.
- En lugar de las soluciones anteriores o en adición a las mismas, puede inyectarse nitrógeno para formar una burbuja sobre el líquido, de forma que se absorbe el oxígeno que pueda estar presente.

La Figura II.2 ilustra esta última solución:

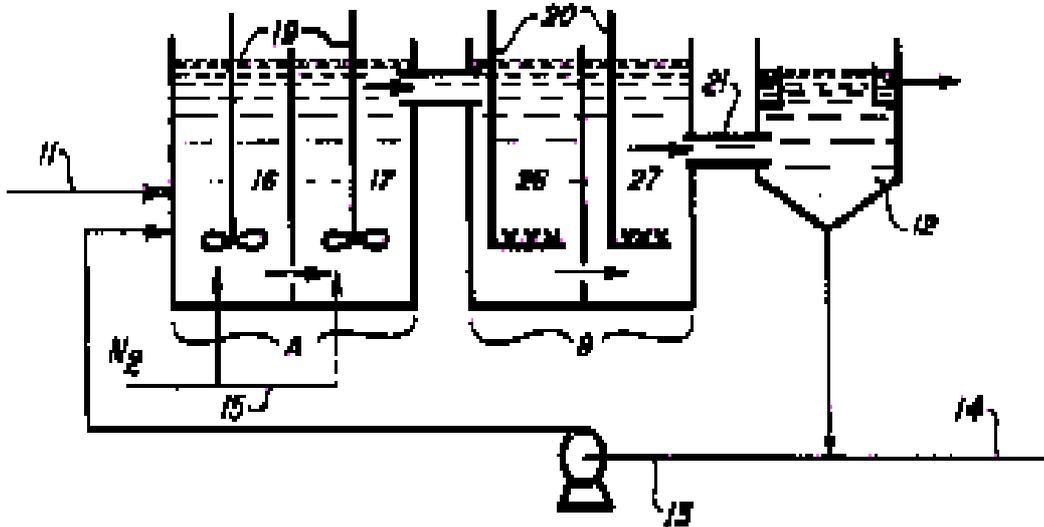


Figura II.2. Esquema de selector anaerobio extraído de la patente de Air Prod & Chem.

En la figura anterior se muestra un sistema de tratamiento de fangos donde:

- El tanque A, corresponde a un selector anaerobio que impide la entrada de oxígeno atmosférico a través de una capa de N_2 que separa al licor mezcla de la atmósfera; al mismo tiempo, el N_2 que asciende por el tanque, arrastra el oxígeno que pudiera contener el agua residual o el fango recirculado. En este tanque, se asegura un tiempo de residencia lo suficientemente grande como para que se absorba la materia orgánica, para favorecer esta absorción se provoca un régimen turbulento a través de agitadores mecánicos
- El tanque B, corresponde con el tanque de aireación donde se mantienen niveles de oxígeno superiores a 1 ppm, de manera que se asegura la oxidación completa de la materia biodegradable.

En esta patente se indica que el empleo de selectores anaerobios debe realizarse bajo condiciones de alta carga másica, ya que debido a la escasez de oxígeno podrían desarrollarse las bacterias filamentosas si la carga másica fuese pequeña.

Poong Lim Ind Co Ltd (KR), opera con una patente (GB2228930) de un tratamiento de fangos que incluye un sistema selector que basa su efecto en la eliminación biológica del nitrato y el fósforo. La Figura II.3 muestra el esquema básico de dicho sistema:

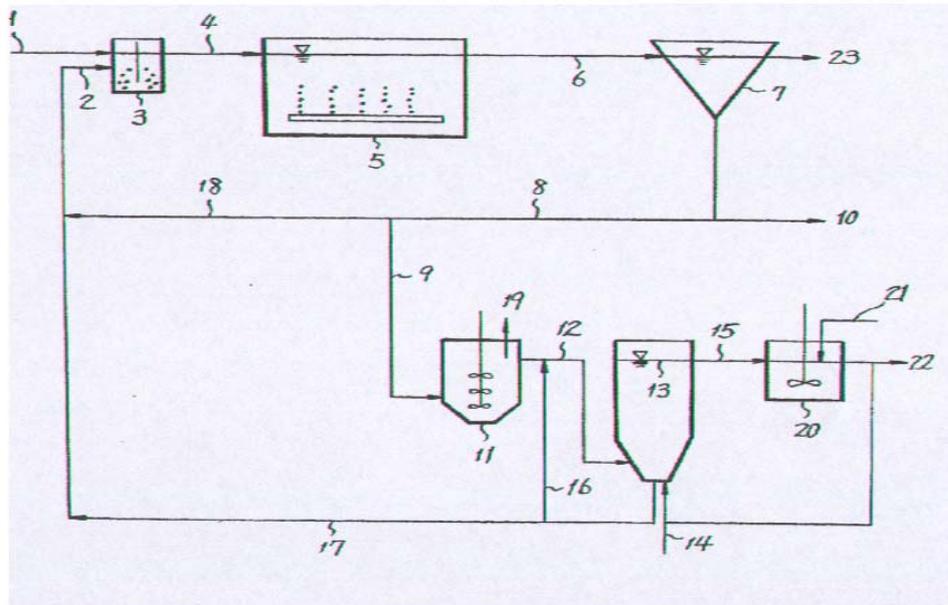


Figura II.3. Esquema de selector extraído de la patente de Poong Lim Ind Co Ltd

El sistema selector de la figura anterior opera del siguiente modo:

- De la corriente de recirculación de fangos se extrae la corriente 9, dicha corriente se introduce en un reactor de ambiente anóxico (11) en el que se produce la desnitrificación y la eliminación biológica del fósforo.

Esta operación limita el crecimiento de las bacterias filamentosas que no pueden oxidar la materia orgánica mediante el uso de los nitratos como aceptores de electrones, mientras que la Zooglea Ramigera (formadora de flóculos) se desarrolla debido a que sí puede oxidar la materia orgánica en presencia de nitratos. Al mismo tiempo, se favorece el crecimiento de las bacterias formadoras de flóculo Poli-P y fermentativas debido a la eliminación del fósforo.

- A continuación, se lleva la corriente a un tanque (13) en el que se separa el fósforo liberado, al licor mezcla, en la etapa anterior. Dicha separación se realiza mediante una operación de stripping.

- La corriente resultante de los procesos anteriores (17), se mezcla con la corriente de recirculación (18) y se introduce junto a la alimentación, en un selector aerobio (3) en el que se produce la nitrificación y la acumulación de fósforo.

- El sistema se cierra mediante el paso a través de un tanque de aireación (5) y la posterior sedimentación en el decantador secundario (7).

Este tipo de sistemas puede emplearse cuando el agua residual contiene las cantidades suficientes de amonio y fósforo.

II.1.6. Sumario y conclusiones.

El uso de selectores para la eliminación del problema de bulking, se ha mostrado como eficaz en multitud de experiencias desarrolladas en los últimos años. Los mecanismos de selección pueden resumirse en las siguientes teorías:

- Superficie específica: en condiciones de escasez de oxígeno, sustrato o nutrientes, las bacterias filamentosas compiten ventajosamente frente a las formadoras de flóculo debido a su mayor superficie específica.
- Teoría cinética: las bacterias filamentosas y las formadoras de flóculo tienen distintas tasas de crecimiento, éstas dependen de la concentración de sustrato.
- Acumulación/Regeneración: las bacterias formadoras de flóculo tienen mayores capacidades para almacenar compuestos en el interior de sus células. Los compuestos almacenados suelen ser glucógeno y PHB.
- Teoría de la inanición: los microorganismos con mayor capacidad de almacenamiento tienen mayores posibilidades de supervivencia bajo condiciones de sustrato limitante.

En la actualidad, no existen unos criterios generales para el diseño de selectores, ni siquiera para la elección del tipo de ambiente más indicado en cada caso concreto. Los trabajos e investigaciones realizados hasta la fecha, parecen indicar que en la elección del tipo de ambiente (anóxico, anaerobio, etc.) los parámetros fundamentales son:

- Tipo de bacteria filamentosa que predomina en el fango.
- Cantidades relativas de las distintas fracciones de la DQO del agua a tratar.
- Carga másica con que opera el selector.

Una vez escogido el ambiente o la serie de ambientes con los que se va a operar, se debe tener en cuenta una serie de indicaciones básicas:

- Selectores aerobios:

- Necesitan mayores aportaciones de oxígeno en la zona inicial, el aporte de oxígeno en el selector debe ser al menos el 50% del total del oxígeno aportado.
- No deben operar con cargas másicas elevadas, ya que a partir de 4 kg DBO₅/kg SSLM·d, puede favorecerse el crecimiento de las filamentosas por competencia en la adsorción de oxígeno.

- Los rangos de carga másica empleados en la bibliografía son de 0,8-3,6 kg DBO₅/kg SSLM·d
- Los tiempos de retención hidráulica empleados en la bibliografía son de 15-40 min.

- Selectores anóxicos:

- Sólo pueden utilizarse cuando se puede producir la nitrificación, los niveles de nitrato deberán asegurarse mediante una recirculación interna del licor.
- El contenido de nitratos en el influente debe ser superior a 0,5 mg/L.
- Debe impedirse la entrada de oxígeno en el selector.
- No deben operar con cargas másicas elevadas para asegurar que los contenidos en nitratos son suficientes para la oxidación de la materia orgánica.
- Los rangos de carga másica empleados en la bibliografía son 0,09-5 kg DBO₅/kg SSLM·d.
- El contenido de DQO soluble en el efluente del selector, debe ser inferior a 60 mg/L para asegurar unas características sedimentables del fango adecuadas.
- Los tiempos de retención hidráulica empleados en la bibliografía son de 15-40 min.

- Selectores anaerobios:

- Debe impedirse la entrada de oxígeno y nitratos en el selector.
- No debe operarse con cargas másicas excesivamente bajas, ya que en este caso la presencia de pequeñas trazas de oxígeno podría favorecer el crecimiento de las filamentosas por oxidación de la materia orgánica.
- Los rangos de carga másica empleados en la bibliografía son 1-7 kg DBO₅/kg SSLM·d.
- Los tiempos de retención hidráulica empleados en la bibliografía son de 15-40 min.

- Selectores óxicos:

- Necesitan mayores aportaciones de oxígeno en la zona inicial, el aporte de oxígeno en el selector debe ser al menos el 50% del total del oxígeno aportado.
- El empleo de cargas másicas superiores a 7 kg DBO₅/kg SSLM·d no supone ninguna ventaja ya que a partir de dicho valor, no se observan diferencias si se aporta o no oxígeno.

- Los rangos de carga másica empleados en la bibliografía son 0,13-12 kg DBO₅/kg SSLM·d.
- Los tiempos de retención hidráulica empleados en la bibliografía son de 15-40 min.

II.2. La Regeneración.

Este tipo de dispositivo se basa en la capacidad de almacenamiento de sustratos de los microorganismos. Como ya se ha visto, la capacidad de almacenar sustratos es mayor en las bacterias formadoras de flóculos que en las filamentosas. Si las formadoras de flóculos tienen su capacidad de almacenamiento saturada, sus tasas de eliminación de sustrato disminuyen considerablemente y por lo tanto, las tasas de crecimiento de estas bacterias pueden disminuir hasta valores iguales o menores que las de las bacterias filamentosas.

En algunos sistemas de depuración, cuando el sustrato alimentado a la planta es suficiente y el tiempo de retención celular no muy alto, puede ocurrir que los microorganismos recirculados con el fango a la cabeza del sistema, tengan aún sustrato almacenado. Si el sistema de selección que emplea esta planta es el del crecimiento no equilibrado, las tasas de almacenamiento de las bacterias formadoras de flóculos no serán las óptimas.

Para solucionar este problema se emplea la regeneración, que consiste en un tanque previo al reactor biológico en el que se introduce la recirculación, en dicho tanque se aseguran los niveles de oxígeno o nitratos suficientes para que las formadoras de flóculos eliminen las sustancias almacenadas. A continuación, el fango regenerado se lleva a la cabecera del sistema, de manera que al ponerse en contacto el agua residual con el fango, las bacterias formadoras de flóculo poseen su capacidad máxima de almacenamiento.

La efectividad de este proceso ha sido estudiada en algunos trabajos^(19,20) y se ha verificado su capacidad de contribución a la eliminación del problema del esponjamiento.

La incorporación de un tanque de regeneración a un sistema en el que existe una disposición de selectores anóxicos y/o aerobios, puede ser positiva en cuanto al efecto selector de los mismos. Sin embargo, deben estudiarse bien las condiciones de operación, ya que una carga baja de sustratos, que permita la eliminación total de las sustancias almacenadas antes de la recirculación, puede hacer que el tanque de reaireación no sea efectivo. En estas condiciones, algunos autores aseguran que con el tanque de regeneración no sólo no se limita el crecimiento relativo de las bacterias filamentosas⁽²²⁾, sino que puede incluso favorecerse su crecimiento⁽²¹⁾.

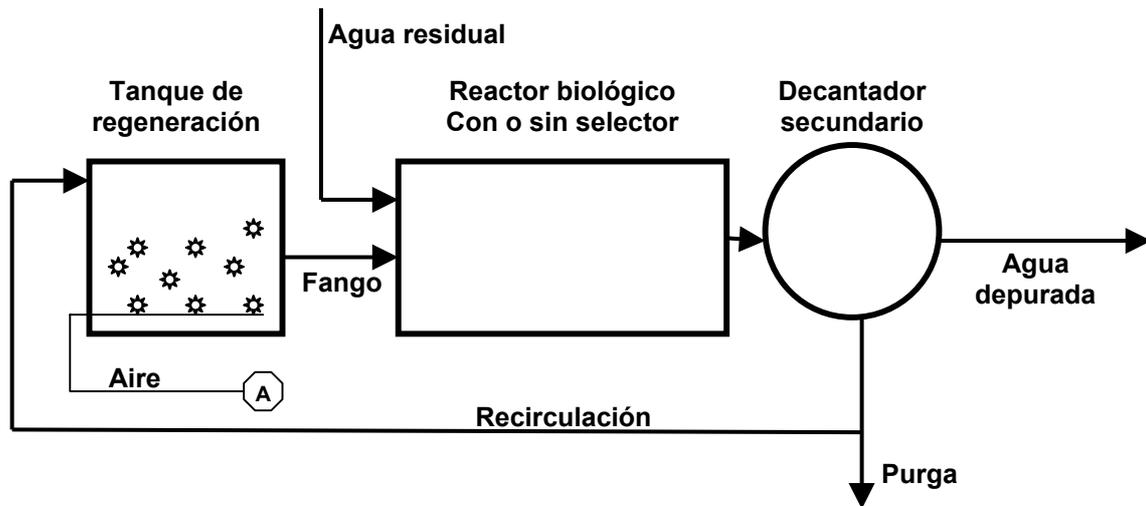


Figura II.4. Esquema de sistema con regeneración.

Zietz Udo DR, posee una patente (DE4114694) de un proceso que emplea la regeneración del fango, al sistema de aireación del fango se añade Fe^{2+} o Fe^{3+} en proporciones de 10 mg/L, estos cationes actúan como catalizador en el proceso de regeneración.

Shin Nippon Seitetsu, tiene la patente (JP57135090) de un sistema que emplea la regeneración solamente cuando aparece el problema de bulking. La regeneración se caracteriza por la inyección de $6\text{Nm}^3/\text{m}^2$ de oxígeno durante períodos de 4 a 20 días, en función del estado del esponjamiento y de la resistencia de las bacterias filamentosas.

II.3. Otros tipos de soluciones a los problemas del tratamiento con fangos activados.

II.3.1. Aditivos Químicos.

Otra de las soluciones al problema del esponjamiento, es la adición de determinados compuestos químicos. Normalmente, esta práctica es más una medida correctora del problema que preventiva. Los mecanismos a través de los cuales actúan estos aditivos son los siguientes:

- Efecto bactericida.
- Efecto floculante o coagulante.
- Efecto gravitatorio.
- Aditivos con efecto de selección.

II.3.1.1. Efecto bactericida.

Los productos empleados son el hipoclorito sódico, el cloruro férrico y determinados polielectrolitos. Se estudiará únicamente el empleo de hipoclorito, ya que el resto de posibles biocidas tienen mayores costes de tratamiento, esto es debido a que sus menores efectividades obligan a la aplicación de dosis mayores.

El hipoclorito sódico es un bactericida líquido, cuya adición supone una inhibición en el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos del fango, es decir, afectará tanto a bacterias formadoras de flóculos como a filamentosas, además de al resto de componentes del fango como protozoos, amebas, etc. La mayor superficie específica de las bacterias filamentosas, las hace más sensibles al tratamiento por ser capaces de absorber mayores dosis de hipoclorito, de aquí que sea una herramienta para la eliminación del problema de bulking.

La aplicación de este método es general, pero dado a su carácter corrector, no asegura la desaparición del esponjamiento tras la finalización de un tratamiento, por este motivo debe emplearse en aquellos casos en los que las causas no estén aún determinadas o mientras se ponen en marcha otro tipo de medidas.

La forma de aplicar este método, una vez se ha detectado el problema de esponjamiento, es la siguiente:

- Normalmente, se inicia el tratamiento con una dosis de choque y a continuación se va reduciendo la dosis hasta alcanzar la dosis óptima a nuestro problema concreto. La adición de cloro debe ser continua mientras persista el problema, la aplicación de dosis discontinuas puede provocar un mantenimiento del esponjamiento y un mayor gasto de reactivo.
- Según los datos encontrados en la bibliografía la dosis debe ser inferior a 10 kg $\text{Cl}_2/\text{Tm SSLM}$, para garantizar la calidad del efluente de agua. Asimismo, las dosis deben ser superiores a 5 kg $\text{Cl}_2/\text{Tm SSLM}$ para que el fenómeno de corrección no se demore demasiado en el tiempo. En fangos jóvenes (edad de fango inferior a cinco días), se ha observado que una dosis de 15 kg $\text{Cl}_2/\text{Tm SSLM}$ tiene un efecto inmediato (1 ó 2 días), pero el efecto tóxico sobre toda la fauna del reactor biológico también lo es. Con dosis en el rango de 5-10 kg $\text{Cl}_2/\text{Tm SSLM}$ el esponjamiento comienza a remitir en un período de 2-3 veces la edad de fango, de manera que 2 ó 3 días después de esta remisión puede certificarse la eliminación del problema.
- El punto de aplicación óptimo, mostrado en la Figura II.5, parece ser el inmediatamente anterior al sistema de bombeo de la recirculación, ya que se mejora así la homogeneización del cloro en el fango. Una mala homogeneización supone un mal funcionamiento del proceso y un menor efecto sobre el I.V.F.
- Es necesario llevar un control de las dosis aplicadas, además del control del I.V.F., es necesario aumentar los controles microscópicos. En algunas experiencias se ha observado la presencia de filamentos rotos de la bacteria Tipo 021N, así como zonas en el filamento Tipo 1701 sin células y con la vaina vacía.

La cloración también se emplea como solución a la aparición de espumas por bacterias filamentosas, las dosis de combate son similares a las empleadas para erradicar el bulking. En los sistemas de aireación sumergida existen prácticas recientes de instalación de sistemas de difusión aérea de soluciones cloradas, para conseguir una

cloración continua superficial que no afecte al fango bajo la espuma. Sin embargo, este tipo de sistemas de cloración no ha dado resultado hasta la fecha⁽⁷⁾.

En cuanto al efecto de la cloración sobre los tipos de bacterias filamentosas, el tratamiento ha demostrado ser eficaz sobre las bacterias filamentosas Tipo 021N, Tipo 0961 y Tipo 1701. En algunas experiencias^(7,26) se ha observado un incremento en la presencia de la bacteria filamentosa Tipo 1863, que puede estar relacionada con el empeoramiento de la población de protozoos que durante la cloración pasa del predominio de los grandes protozoos a los ciliados libres y flagelados. En cuanto a la especie *Microthrix parvicella* parece tener cierta resistencia a la cloración, y en determinadas condiciones de operación no se aprecia efecto alguno sobre su crecimiento.

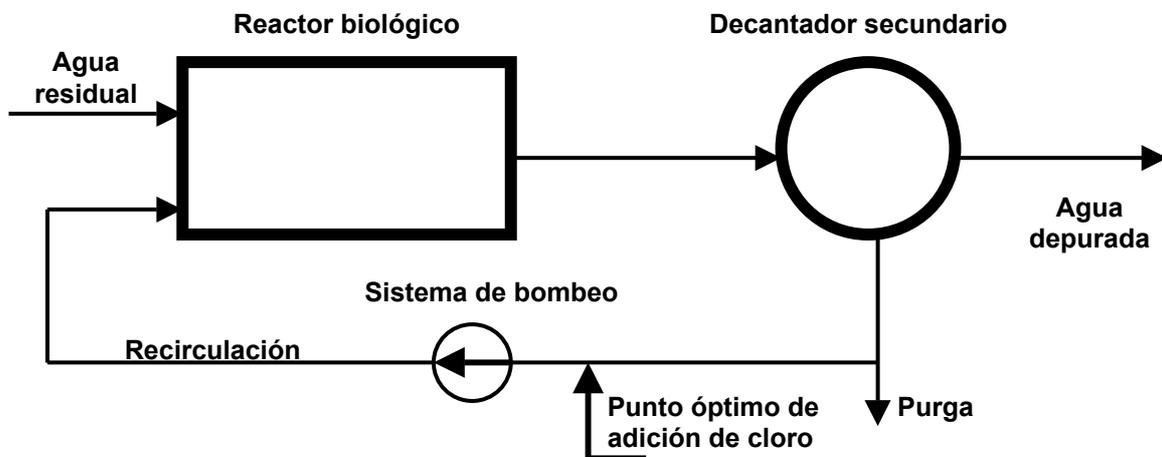


Figura II.5. Punto óptimo para la adición de cloro.

A continuación se describe un método de control del cultivo, empleado en un trabajo de optimización del uso de hipoclorito sódico⁽²⁶⁾.

El método se basa en la instalación de una microcámara y en el recuento de filamentos sobre un monitor de televisión. Se trabajaba sobre imágenes de 100 aumentos y se contaban los filamentos que cortaban una de las diagonales del monitor, determinando así un parámetro al que denominaron "relación de filamentos". Este método de control es complementario a la medida del I.V.F. o del V30, y da una visión semicuantitativa de la evolución de las bacterias filamentosas.

A partir del control de la relación de filamentos, se establecieron una serie de condiciones para el inicio de un tratamiento de cloración, consideraron que era necesario clorar cuando se producía al menos dos de las siguientes circunstancias:

- Valores de la relación de filamentos superiores a 13.

- Valores crecientes de la relación de filamentos que mantienen su progresión durante tres o más días.
- Subidas importantes del V30 o del I.V.F., acompañadas de incrementos en la relación de filamentos.

Se debe tener en cuenta que el valor concreto de la relación de filamentos a partir del cual se observa el fenómeno de bulking, dependerá del caso de estudio concreto y del método de recuento, pues como se ha comentado se trata de un método semicuantitativo de control.

El empleo de este método en la optimización del uso de hipoclorito sódico supuso:

- Resultados de calidad de agua que cumplieron la normativa.
- Posibilidad de tratar mayores caudales.
- Menores consumos de hipoclorito, lo que supone menores costes de operación y una mayor estabilidad en las poblaciones del fango activo.

Este método de control de la evolución de las bacterias filamentosas ante un tratamiento de cloración, podría ser empleado también para la observación de las evoluciones frente a otro tipo de medidas como los selectores.

II.3.1.2. Efecto floculante o coagulante.

Este tipo de aditivos químicos, basa su efecto sobre el esponjamiento en conseguir una mayor agregación de los flóculos (Figura II.6). Los compuestos empleados son polielectrolitos y sales metálicas. Los polielectrolitos basan su efecto en la agregación de las bacterias floculantes y las filamentosas, sobre una molécula de cadena larga con distribución de cargas a lo largo de la misma, como consecuencia se obtiene un flóculo de mayor tamaño que sedimenta con mayor facilidad.

Antes de optar por este tipo de solución, deben realizarse una serie de ensayos en el laboratorio para determinar la compatibilidad del compuesto escogido y el fango que opera en la planta depuradora.

En general, la dosificación de estos compuestos debe realizarse de forma continua mientras dure el esponjamiento, ya que dosis discontinuas pueden provocar el mantenimiento del bulking, lo que supone un gasto de reactivo. Suele dosificarse entre el reactor biológico y el decantador (Figura II.7). El efecto de estos aditivos suele ser rápido.

Zaritzky y otros⁽²⁷⁾, realizaron en 1997 un trabajo sobre la adición de quitosano (polielectrolito), sulfato de aluminio y poliacrilamidas catiónicas, para erradicar el problema de bulking en plantas que tratan aguas residuales de industrias alimentarias. En dicho trabajo, se observa la eficacia de estos agentes contra el bulking producido por *Sphaerotilus natans* en un fango cuyas bacterias floculantes eran del tipo *Acinetobacter*

anitratus. Como resultado obtuvo un modelo de optimización en la adición de dichos compuestos⁽²⁷⁾.

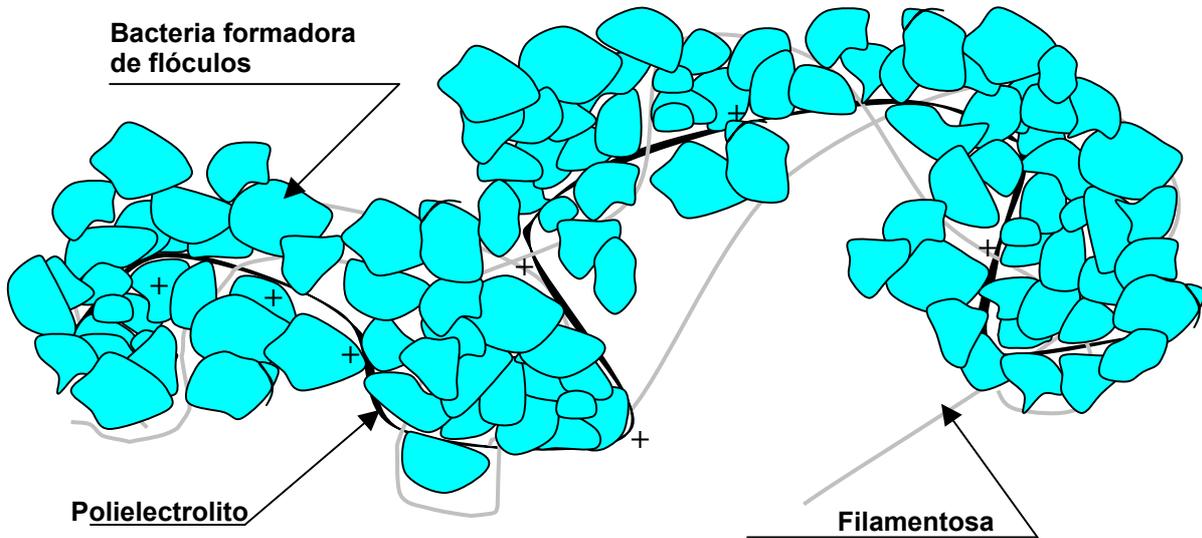


Figura II.6. Agregación de bacterias sobre un polielectrolito.

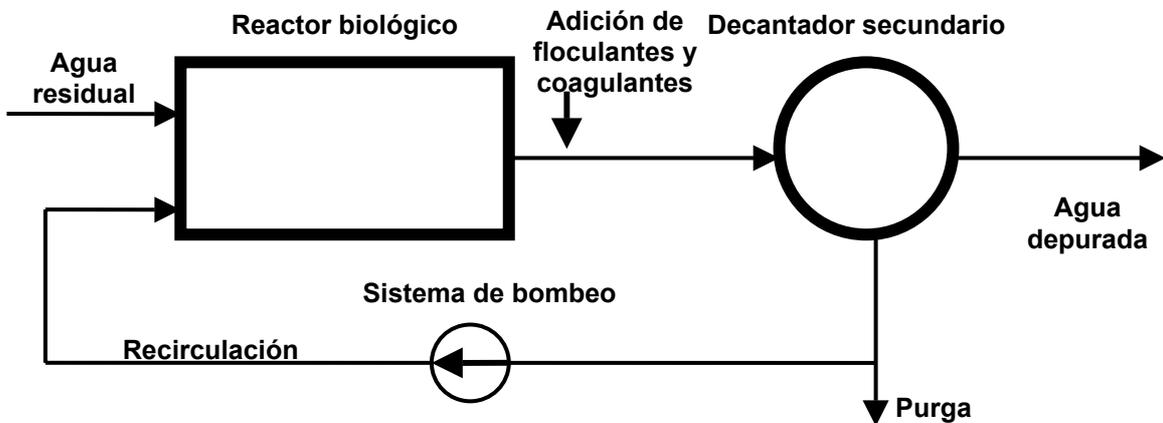


Figura II.7. Punto de adición de floculantes y coagulantes.

Existen algunas soluciones patentadas que tratan de eliminar el bulking y las espumas a través de la adición de coagulantes y floculantes, algunas de estas patentes se mencionan a continuación:

- **Kurita Water Ind Ltd**, tiene patentado (EP0650931) un método basado en la adición de cualquiera de estos agentes:

- un surfactante no iónico y/o uno aniónico,

- la combinación de un surfactante no iónico y uno catiónico,
- la combinación de un surfactante no iónico y uno catiónico con un floculante orgánico y catiónico.

- **Nippon Soda Co Ltd**, tiene la patente (JP10244287, JP11033583) de un método basado en la adición de un agente constituido por un polímero catiónico, un floculante inorgánico y una arcilla mineral; el agente puede añadirse en el tanque de aireación, en el decantador o en la recirculación del fango.

- **Katayama Chem Works Co Ltd**, tiene la patente (JP11123393) de un método basado en la adición de borato de piridinatrifenil y un floculante polimérico catiónico (polietilenaamina o amina-epiclorhidrina), en proporciones de peso pertenecientes al rango 1/1 a 1/10.

- **Mitsubishi Monsanto Chem** tiene varias patentes (JP63218299, JP63218296, JP63218295, JP63218294, US4729831, US4732684) de un polímero catiónico soluble obtenido por reacción de dialquilamina con epiclorhidrina. El producto se añade al reactor biológico en proporciones del 0,1-25% de sólido seco contenido en el fango, y ha mostrado su eficacia en la eliminación de bulking debido a las bacterias Tipo 021N, 0041, y 1701. La patente establece también los puntos de adición del producto, que pueden ser: sobre el agua residual antes de entrar en el tanque de aireación, en el tanque de aireación, en el decantador y en la línea de reciclaje.

Esta empresa, tiene otra patente (JP2169096) basada en el empleo de un agente obtenido por reacción entre un alquilenopoliamina y/o polialquilenopoliamina con epiclorhidrina, y añadido en proporciones de 0,05-20% de sólido seco contenido en el fango.

- **Katayama Chem Works Co Ltd** patentó un método (JP7241590) para la eliminación de bulking, basado en la adición de una sal alcalina: 1-hidroxy-2-pirimidinetina.

- **Mitsubishi Kasei Corp** tiene una patente de un método (JP6335695) basado en la adición de una sal del ácido etilendiamitetraacético en proporciones del 0,05 al 20% de sólido seco contenido en el fango.

Esta misma empresa tiene patentado (JP6142676) otro método basado en la adición de un polímero específico soluble (obtenido a partir de epiclorhidrina) y sulfato de aluminio y/o policloruro de aluminio.

- **Mitsubishi Kasei Polytec Co**, tiene patentado (EP0132609) un método basado en la adición de un polímero de alquilenamina.

- **Los investigadores Konstadinos Kaporis y Y.J. Shao**, patentaron recientemente un método basado en la adición de un polímero en el tanque de aireación que:

- reduce la capacidad de flotación de la *M. parvicella* por reducción de la superficie hidrófoba de la célula,

· provoca la coagulación y floculación de la *M. parvicella* y del resto de los microorganismos.

II.3.1.3. Efecto gravitatorio.

Este método se basa en la adición de compuestos con alto peso molecular, dichos compuestos se retienen en las paredes celulares o en el interior de los flóculos, de forma que el peso que confieren a los flóculos permite una buena sedimentación. Los compuestos empleados son inertes como cloruro férrico o cal.

Al igual que en el caso anterior, es necesario realizar ensayos de compatibilidad con los fangos de la planta depuradora.

Existe un número importante de compuestos patentados que operan bajo este mecanismo, como muestra enumeramos algunas de estas patentes:

- **Nippon Steel Corp** tiene la patente (JP2241596) de un método basado en la adición de escorias de altos hornos y arena de cuarzo.
- **Hashimoto Susumo** patentó un método (JP56038183), basado en la adición de Cobre, Zinc y Cobalto.

II.3.1.4. Aditivos con efecto de selección.

Los compuestos que operan mediante un mecanismo selector, lo hacen a través de dos vías:

- Promoción del crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos, mediante mecanismos que favorezcan su metabolismo.
- Inhibición del crecimiento de las bacterias filamentosas.

El método de adición es similar a los anteriores, es decir, es necesaria una dosificación continua mientras dure el esponjamiento y un estudio de la compatibilidad del fango y los aditivos. Al contrario que en el caso de los coagulantes, el efecto suele ser lento (tres o cuatro veces la edad del fango) y suele dosificarse a la entrada del reactor biológico.

Los productos empleados son muy variados, desde microorganismos vivos, enzimas y vitaminas que favorecen el crecimiento de las bacterias floculantes, hasta bactericidas con una cierta selectividad respecto a las bacterias filamentosas.

Al igual que en el caso anterior, existe un buen número de patentes basadas en productos y procesos que eliminan el bulking a través de este mecanismo selector:

- **Mitsubishi Kasei Corp** tiene la patente (JP6206089) de un método que inhibe el crecimiento de bacterias filamentosas mediante la adición de ditiocianato de metilo en proporciones de 0,01-10% de sólido seco contenido en el fango. Supuestamente se

consigue la eliminación de las bacterias filamentosas tras la aplicación de este método durante un período de 2 a 4 días.

- **Yamamoto Masaaki** tiene patentado un método (JP5208197) en el que se añade agua de mar al agua residual en proporciones del 20 al 50%; tras la adición, la actividad metabólica de las bacterias filamentosas se ve afectada mientras que la del resto de los microorganismos no se ve alterada.

- **Shikoku Chem Corp** tiene la patente (JP4261105) de un producto obtenido por reacción de un compuesto imidazol con epíclorhidrina, dicho producto tiene un efecto bactericida sobre las bacterias filamentosas caracterizado por su selectividad.

Esta misma empresa tiene otra patente (JP6063580) de un método de control de bulking, basado en la adición de un cloruro o fluoruro derivado del isophthalonitrilo que es añadido en proporciones de 0,01-1% de sólido seco contenido en el fango.

Otro método patentado (JP6071287, JP8024886) por esta empresa se basa en la adición de un agente que contiene un haluro de alquilopiridina en proporciones de 0,05-5% de sólido seco contenido en el fango. Sobre este agente se advierte la necesidad de añadir isopropanol o butildiglicol cuando las temperaturas son bajas, ya que el agente puede solidificarse y perder su efectividad.

Otro de los métodos patentados (JP7136684) por esta empresa se basa en la adición de un agente que contiene macrohaluros y se añade en proporciones de 0,005-5% de sólido seco contenido en el fango.

- **Nippon Soda Co Ltd**, tiene un método patentado (JP6170385, JP9155376) basado en la adición de un agente derivado del imidazol.

- **Kanyo Eng KK**, tiene patentado (JP6233994) un método en el que se añade un agente constituido por 2-bromo-2-nitropropano-1,3-diol y un éster alifático; o por 2-bromo-2-nitropropanol-1,3-diol y un éster alifático o peróxido de hidrógeno.

- **Mitsubishi Kasei Polytec Co**, tiene patentado (WO9009966) un agente inhibidor del crecimiento de las filamentosas constituido por un polímero obtenido por reacción de una amina con un dihaluro.

- **Sanyo Chemical Ind Ltd**, tiene patentado un método (US5702605) basado en la producción de una bacteria, que a su vez produce un enzima con buenas propiedades para la prevención de la disgregación de fangos.

- **BTC Biotech Int**, patentó (US5015385) un método basado en la adición de determinadas sustancias que promovían el crecimiento de las bacterias floculantes y de otras que inhibían el de las bacterias filamentosas. Dichas sustancias eran aminoácidos, vitaminas y pirimidinas.

- **Nippon Arushii KK**, tiene la patente (JP11070393) de un método basado en la adición de un agente en cuya molécula se diferencian dos grupos:

- uno contiene un catión y se adhiere fácilmente a las bacterias filamentosas,
- el otro es un sulfato que ataca a las bacterias filamentosas.

II.3.2. Configuración del reactor.

En este apartado, se analizan diversos sistemas de tratamiento de fangos diseñados para evitar los fenómenos de esponjamiento y espumas. Algunos de ellos presentan modificaciones al sistema clásico de aireación, sedimentación y reciclo, otros combinan diseño del sistema con otras soluciones como la adición de determinados aditivos químicos.

II.3.2.1. El reactor discontinuo.

Los primeros reactores biológicos para el tratamiento de fangos activados, se caracterizaban por una discontinuidad en la alimentación del agua residual, este tipo de reactores daba algunos problemas y los sistemas fueron evolucionando hacia modelos de flujo continuo. A finales de la década de los 70, vuelven a aparecer bajo la denominación de reactores secuenciales de flujo discontinuo (S.B.R.).

La evolución en el tiempo del cultivo modifica las necesidades de oxígeno y se pueden observar períodos anaerobios, anóxicos y aerobios; asimismo el gradiente de carga evoluciona en el tiempo, en los primeros instantes el alto contenido en DBO favorece la acumulación de sustancias reserva por parte de las bacterias formadoras de flóculos, en los instantes finales el bajo contenido en materia orgánica puede favorecer la inanición de las bacterias filamentosas, que como se sabe tienen menores capacidades de acumulación de sustancias reserva.

Por lo tanto, puede observarse como los reactores discontinuos tienen un efecto selector sobre el cultivo; este es el motivo de que en la práctica los sistemas biológicos discontinuos no presenten, en general, el problema del esponjamiento.

El reactor discontinuo permite a su vez el uso de un sistema de regeneración, pues bastaría con airear el fango recirculado en el mismo reactor, antes de introducir el agua residual a tratar.

Las desventajas de este tipo de configuración, residen en la necesidad de tanques de almacenamiento para el agua residual que llega a la planta durante el período en el que el reactor se encuentra en funcionamiento.

Se han encontrado algunas patentes de tratamientos con fangos activados basados en sistemas de alimentación discontinua:

- **C. Goronszy Mervyn**, patentó (US5013441) en 1991 un sistema discontinuo caracterizado por una etapa inicial en la que el cultivo se mantiene durante el tiempo necesario para que se forme un fango no esponjoso y se acumulen compuestos biodegradables.

- **La Universidad de Trobe** (Australia), tiene patentado (WO9009964) un sistema discontinuo en el que se controla la evolución del cultivo a través de la temperatura del licor mezcla.
- **Kernforschungsanlage**, patentó (US4793930) un sistema de tratamiento de fangos que emplea un reactor discontinuo.

II.3.2.2. Sistemas combinados.

En este apartado se describirán diversos sistemas, en los que se combinan sistemas de tratamiento de fangos clásicos, con tanques selectores, regeneraciones, aditivos químicos, etc. Se describen con mayor o menor detalle sistemas patentados que han mostrado ser eficaces contra el esponjamiento de fangos, algunas de estas soluciones lo son para problemas muy específicos relacionados con la presencia de determinados compuestos en la alimentación o con el contenido de DBO en las primeras etapas.

NGK Insulators Ltd, tiene patentado (JP11253986) un método de tratamiento de fangos que combina la regeneración del fango con un aditivo químico de efecto bactericida.

El sistema se muestra en la Figura II.8; en ella puede observarse como el fango regenerado, se mezcla con el agua residual a depurar antes del tanque de aireación o reactor biológico (tanque 1). Tras pasar el tiempo necesario para que las bacterias eliminen la materia biodegradable del agua, el licor mezcla se envía al decantador secundario, de donde salen dos corrientes:

- una con el agua depurada,
- otra con el fango sedimentado.

Después de realizar la purga de fangos, el fango recirculado es tratado en los siguientes tanques:

- en el tanque 3, el fango es aireado para eliminar una parte de las sustancias reserva,
- en el tanque 4, se inyecta un agente esterilizante que ataca principalmente a las bacterias filamentosas, esta etapa se realiza en condiciones turbulentas,
- en el tanque 5, el fango se vuelve a airear de forma que las bacterias formadores de flóculos tengan su máxima capacidad de almacenamiento de sustancias reserva.

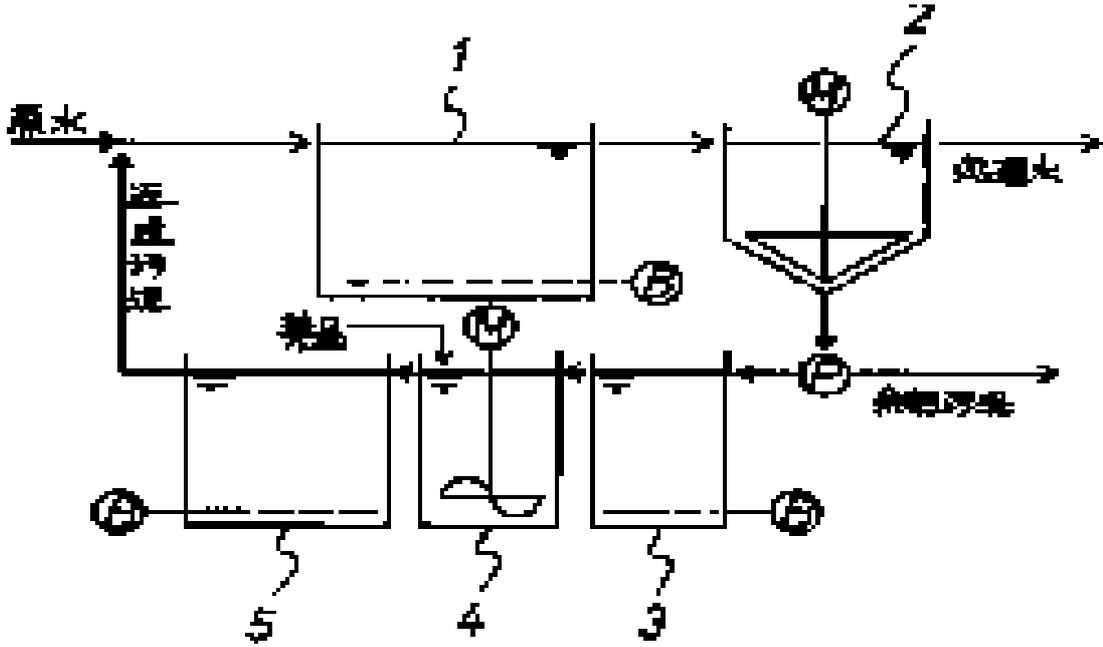


Figura II.8. Esquema del sistema patentado por NGK Insulators Ltd.

Kanyo Kagaku Center KK, patentó (JP56166990) en 1981 el sistema de tratamiento de fangos mostrado en la Figura II.9. El sistema se caracteriza por la adición de yoduro potásico en el tanque de aireación; y por el diseño del decantador, que se separa del tanque de aireación a través de un muro, y se alimenta por la zona inferior:

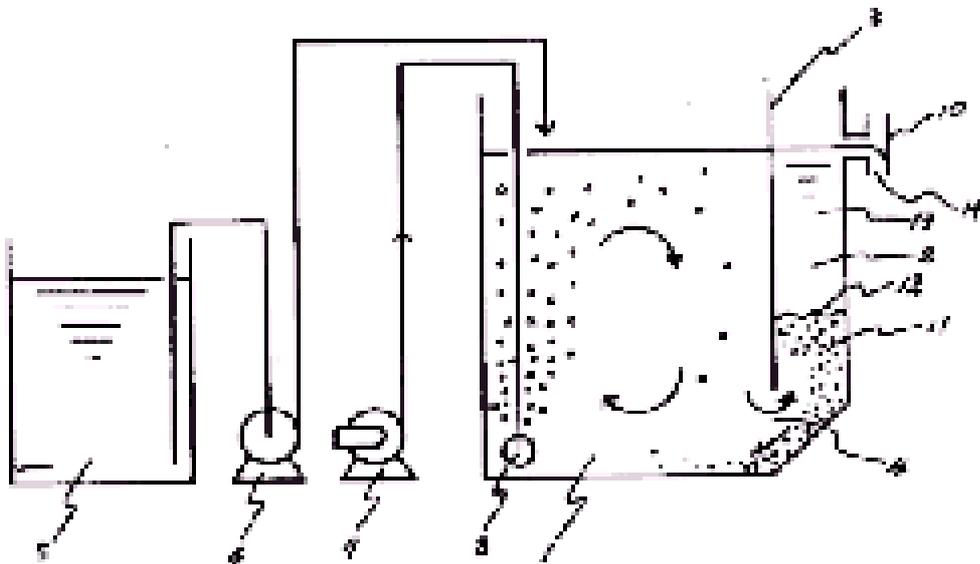


Figura II.9. Esquema del sistema patentado por Kanyo Kagaku Center KK.

Sumikin Coke Co Ltd, tiene la patente (JP57010388) de un sistema con un esquema idéntico al anterior que añade Cl_3Fe y mantiene concentraciones en el tanque de aireación en el rango de 10-30 ppm.

Esta misma empresa, tiene la patente (JP56161895) de un método de eliminación de bulking debido a bajo O.D., basado en la inyección de oxígeno puro en la tubería que suministra el aire en el tanque de aireación, con este método se enriquece el contenido de oxígeno entre un 45-60%.

II.3.3. Métodos mecánicos.

Para finalizar este capítulo de métodos para la eliminación de los problemas relacionados con el crecimiento de las bacterias filamentosas, se describen dos métodos basados en la eliminación mecánica del bulking.

El primero de ellos emplea ultrasonidos como agente capaz de inhibir el crecimiento de las filamentosas; el segundo método, emplea una etapa de sedimentación centrífuga para eliminar el problema del esponjamiento.

II.3.3.1. Destrucción mecánica por ultrasonidos.

El empleo de ultrasonidos para eliminar el bulking es un método muy reciente, que se caracteriza por un tiempo de respuesta pequeño y por ser aplicable a todos los tipos de bulking.

El método suele incluir una serie de exámenes microscópicos del fango, para controlar las modificaciones estructurales que los ultrasonidos provocan sobre el mismo, o para detectar el inicio de la aparición de bulking y por tanto el inicio del tratamiento mecánico.

Se ha comprobado que el empleo de ultrasonidos con frecuencias del orden de 20kHz e intensidades en el rango de 0,1-80 kW/L, pueden acabar con la población de bacterias filamentosas.

IWE Wirtschaftl Energienutzung Hielscher GMBH y Fraunhofer Ges Forschung, patentaron (EP0989097) en el 2000 un sistema de eliminación del bulking basado en el empleo de ultrasonidos. Dicho sistema empleaba intensidades de 0,1-1kW/L para la eliminación de espumas debidas a bacterias filamentosas, e intensidades de 10-80kW/L para la eliminación del bulking filamentoso. La energía ultrasónica se introduce mediante una barra emisora y en presencia de fósforo libre.

II.3.3.2. Centrifugación del fango.

Este método se basa en la creación de un campo gravitatorio artificial, creado mediante un decantador o separador centrífugo. Bajo estas condiciones, los microorganismos contenidos en el fango, se ven sometidos a altas tensiones cortantes que provocan rupturas y aglomeraciones.

En el caso particular de las bacterias filamentosas, la centrifugación no sólo deshace los ovillos de filamentos, sino que también rompe en pequeños pedazos los filamentos individuales.

Se ha demostrado que decantadores centrífugos operando a 8000 r.p.m. son eficaces en la eliminación de las bacterias filamentosas, estos decantadores producen un campo gravitatorio 8000 veces mayor a la gravedad terrestre.

El empleo de este método, provoca también la destrucción de parte de las bacterias formadoras de flóculos; si bien, puede conseguirse la eliminación de las bacterias filamentosas y de sus efectos nocivos sobre la sedimentabilidad del fango con la destrucción de menos del 50% de los microorganismos formadores de flóculos.

Linde AG, patentó (US4341632) en 1982 un método que incluye una etapa en la que se emplea una decantación centrífuga.

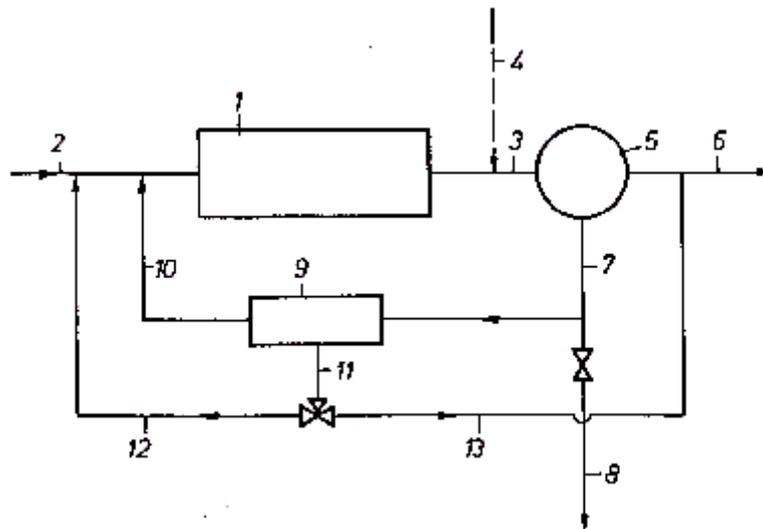


Figura II.10. Esquema del sistema patentado por Linde AG.

En la Figura II.10 se observa un tanque de aireación (1), dicho tanque puede tener una o varias etapas de aireación según se haya diseñado el proceso. Tras el reactor biológico, se lleva el efluente al decantador secundario, en algunas condiciones de proceso se añaden agentes precipitadores o floculantes como cal (4), sulfato ferroso o cloruro férrico. Del decantador secundario, salen tres corrientes:

- una con agua que se lleva a un dique de drenaje (6),
- otra con el fango sedimentado (7),
- una posible corriente con fango flotante.

El fango sedimentado, se lleva a una etapa centrífuga (9) antes de su recirculación al tanque de aireación; en el caso de que se produzcan espumas y fangos flotantes en el

decantador secundario, es posible recogerlos y enviarlos también al decantador centrífugo.

En el decantador centrífugo, se eliminan las bacterias filamentosas y se obtiene un fango espeso que es recirculado (10). El agua separada del fango, puede enviarse al tanque de aireación para mantener la carga orgánica bajo unas especificaciones determinadas (12), o puede llevarse a la corriente que va al dique de drenaje (13).

A pesar de la eliminación de las bacterias filamentosas en el reciclo, seguirán desarrollándose en el tanque de aireación, de forma que la corriente que llega al decantador secundario contendrá estos microorganismos. Una vez llegan al decantador secundario, las bacterias filamentosas se dividen en dos partes: unas que flotan inmediatamente y que por lo tanto son recogidas y llevadas al decantador centrífugo; y otras que sedimentan junto a los flóculos, con mayor o menor rapidez en función del tipo y la cantidad de agente floculante o precipitante que se añade antes del decantador secundario. Sea como sea, las bacterias terminan alimentándose al decantador centrífugo, donde son destruidas por las enormes fuerzas de aceleración a que son sometidas.