

pasos, ya que podrían causar taponamiento. La nitrificación puede causar problemas de alcalinidad, lo que llevaría al diseño de una fuente alterna para cubrir dicho déficit.

3. CRITERIOS DE DISEÑO

3.1. Consideraciones del proceso de diseño

Existen muchas similitudes entre las consideraciones de diseño de un sistema de biodiscos y las usadas para filtros percoladores, ambos sistemas desarrollan una biopelícula superficial de bacterias y dependen de la transferencia de oxígeno y sustratos del agua residual a la biopelícula. Las características físicas e hidrodinámicas que se requieren para el diseño de un proceso CBR están basados en la información de una planta piloto y el espacio de instalación. Al igual que en los filtros percoladores, la carga orgánica del agua residual afecta la eficiencia de remoción de la DBO y la carga de nitrógeno después de una concentración mínima de DBO llega a afectar la eficiencia de nitrificación. A diferencia de los filtros percoladores donde el flujo del agua residual se acerca a un régimen de flujo hidráulico, las unidades del proceso de CBR giran dentro de un cilindro que contiene el agua de desecho, de modo que se necesitan espacios separados para desarrollar los beneficios de una etapa de diseño de reactor biológico. El diseño de un sistema de CBR debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Número de etapas de las unidades de CBR
- b) Criterios de carga
- c) Características de las aguas residuales
- d) El diseño de un clarificador secundario

Etapas de CBR. Se refiere a la compartimentación de los discos del CBR que definen una serie de celdas independientes. Con base en la transferencia de masa y los principios de cinética biológica, las mayores tasas de remoción de sustrato se producirán en la biopelícula de los discos a mayor concentración de sustrato en el agua residual. Porque una baja concentración de sustrato en el efluente y una alta tasa de remoción de sustrato son generalmente el objetivo final del tratamiento, la reducción de las áreas de los discos puede realizarse usando varias unidades de CBR.

La aplicación típica del proceso de CBR consiste en cierto número de unidades operando en serie. El número de etapas depende de los requerimientos de calidad final del agua, para remover DBO se usan de dos a cuatro etapas y seis más para el proceso de

nitrificación. Las etapas pueden lograrse usando compartimentos en un solo tanque o con el uso de tanques en serie separados. Con esto se provocan condiciones donde distintos organismos pueden crecer gradualmente de etapa a etapa. El desarrollo gradual en cualquier etapa depende principalmente de la concentración orgánica del agua residual en la misma. Debido a que el agua de desecho fluye a través del sistema, cada etapa subsecuente recibe un afluente con una concentración orgánica más baja que en la etapa anterior.

Para plantas pequeñas, los ejes de soporte de los biodiscos se encuentran paralelos a la dirección del flujo con grupos de discos separados por paredes delgadas (Fig. 3-1a).

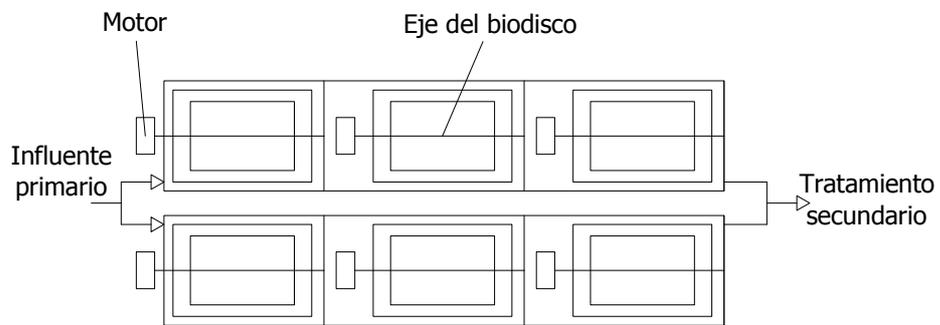


Figura 3-1a. Flujo paralelo al eje

En grandes instalaciones los ejes se encuentran perpendiculares al flujo con varias etapas en serie para formar un tren de proceso (fig. 3-1b).

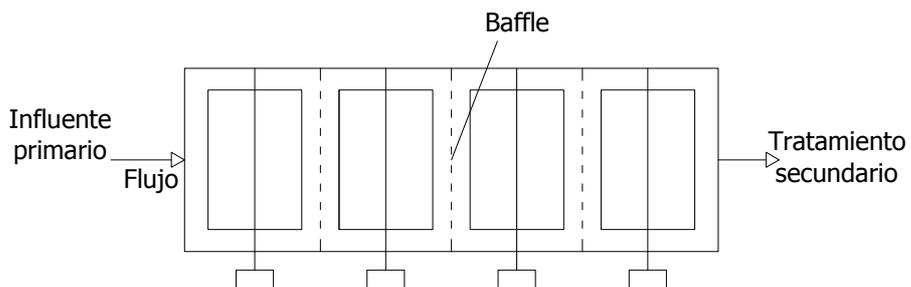


Figura 3-1b. Flujo perpendicular al eje

Para manejar las cargas en las primeras unidades, se puede usar un paso de alimentación (fig. 3-1d) o un sistema triangular (fig. 3-1e). Se deben usar dos o más trenes de flujo paralelos permitiendo así que las unidades puedan estar aisladas para mantenimiento.

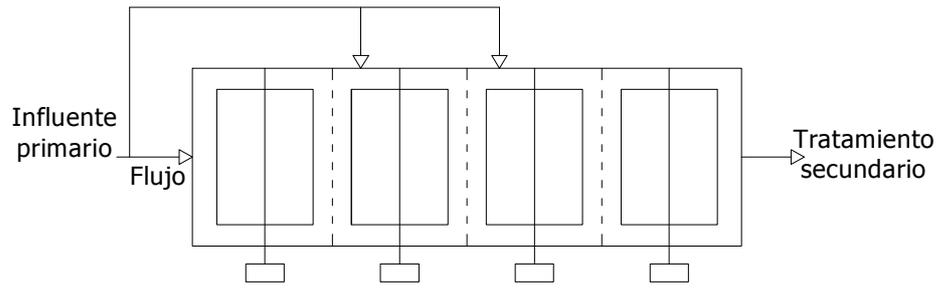


Figura 3-1d. Paso del caudal de alimentación

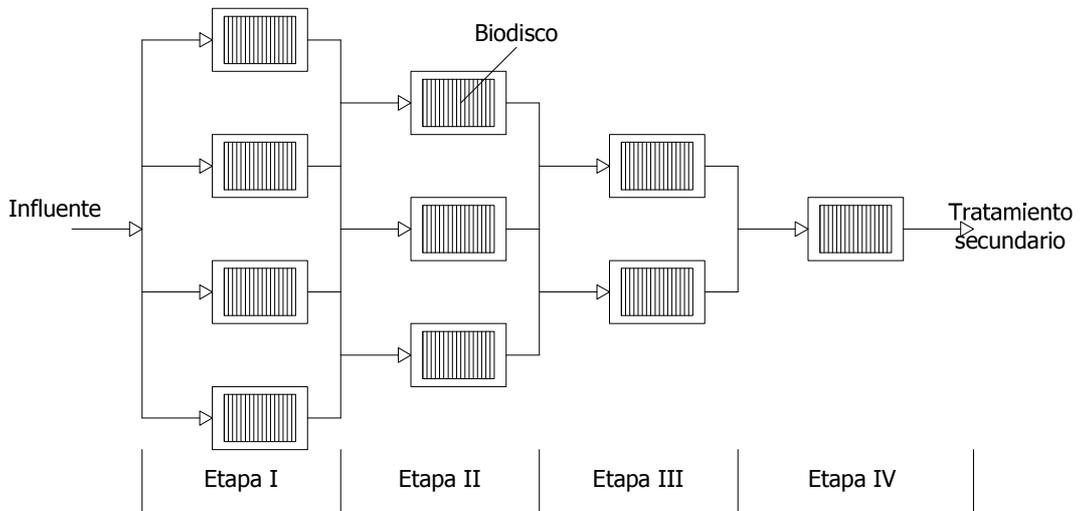


Figura 3-1e. Flujo de alimentación cónico paralelo al eje

Los sistemas de tratamiento que emplean biodiscos han usado para la remoción de DBO, pretratamiento de aguas residuales industriales, remoción combinada de DBO y nitrificación, nitrificación terciaria, y desnitrificación. La principal ventaja del proceso de biodiscos es la simplicidad en su operación y el bajo costo de consumo de energía.



Figura 3-1c. Foto de biodiscos con un flujo perpendicular al eje

Criterio de carga de biodiscos. Con base en la experiencia obtenida a lo largo del uso de biodiscos se ha observado que su rendimiento está relacionado con la tasa de carga superficial total y el oxígeno disuelto para la remoción de DBO y $\text{NH}_4\text{-N}$ para nitrificación. Para un tratamiento exitoso la tasa de carga debe estar dentro de la capacidad de transferencia de oxígeno del sistema. Cuando la demanda de oxígeno excede la capacidad de transferencia de oxígeno se originan problemas tales como bajos rendimientos, olores y desprendimiento de bio-película. Una característica de este problema es el desarrollo de *Beggiatoa*, una bacteria oxidante reductora de azufre, sobre la parte exterior de la bio-película y la cual previene el desprendimiento. Un espesor de bio-película puede desarrollarse hasta conseguir el peso suficiente para dañar la resistencia estructural de los discos y su eje.

Bajo condiciones de sobrecarga existen condiciones anaerobias en el fondo de la película adherida. El sulfato es reducido a H_2S , el cual se expande a la capa exterior de la bio-película donde hay oxígeno disponible. La *Beggiatoa*, una bacteria de filamentos, es capaz de oxidar el H_2S y otros compuestos reductores de azufre, formando una firme bio-película blancuzca que no provoca desprendimiento bajo condiciones normales de operación. Esto es muy importante en el diseño de biodiscos para seleccionar la carga suficiente de DBO para las condiciones iniciales y evitar sobrecargas. En la primera etapa los olores son el problema más frecuente causado por la excesiva carga orgánica.

Debido a que el oxígeno disuelto es consumido rápidamente en la primera etapa de un sistema de biodiscos, muchas fábricas especifican cargas en un rango de 12 a 20 g de DBO soluble/ m^2d para la primera etapa. Asumiendo un 50 por ciento de DBO soluble, la tasa de carga de DBO total es de 24 a 30 g DBO/ m^2d . Para algunos diseños esto implica aguas residuales concentradas, el criterio de carga es cumplido por las distribuciones del flujo a las unidades de biodiscos en la primera etapa o usando un paso de alimentación cerca de la misma como se muestra en la fig. 3-1d.

Para la nitrificación, el diseño de biodiscos puede ser muy similar al utilizado para la nitrificación terciaria en filtros percoladores después de que la concentración de DBO soluble es agotada en los biodiscos antes de la nitrificación. La máxima tasa de área de remoción de nitrógeno que se ha observado es cerca de 1.5 g N/ m^2d , la cual es bastante similar a los valores observados para filtros percoladores.

Características del afluente. El sistema de tratamiento con biodiscos puede ser diseñado para tratamientos a niveles avanzados o como un tratamiento secundario. Las características de DBO para un tratamiento secundario son comparables con la correcta operación del proceso de lodos activados. Los biodiscos pueden proporcionar tratamientos combinados para DBO y nitrógeno amoniacal, o para proporcionar nitrificación independiente de un afluente secundario. Las tasas típicas de las características de un afluente están indicadas en la Tabla 3-1. Se han usado biodiscos sumergidos totalmente para la desnitrificación de aguas residuales.

Tabla 3-1. Información típica de diseño para un sistema CBR

Parámetro	Unidades	Nivel de tratamiento		
		Remoción de DBO	Remoción de DBO y nitrificación	Nitrificación separada
Carga hidráulica	m ³ /m ² *d	0.08 - 0.16	0.03 - 0.08	0.04 - 0.10
Carga orgánica	g DBOs/m ² *d	4 - 10	2.5 - 8	0.5 - 1.0
	g DBO/m ² *d	8 - 20	5 - 16	1 - 2
Carga orgánica máxima en la 1 ^a etapa	g DBOs/m ² *d	12 - 15	12 - 15	-
	g DBO/m ² *d	24 - 30	24 - 30	-
Carga de NH ₃	g N/m ² *d	-	0.75 - 1.5	-
Tiempo de retención hidráulico	h	0.7 - 1.5	1.5 - 4	1.2 - 3.0
DBO del efluente	mg/L	15 - 30	7 - 15	7 - 15
NH ₄ -N del efluente	mg/L	-	< 2	1 - 2

3.2. Procedimiento de diseño de biodiscos

El proceso de diseño se basa normalmente en curvas empíricas de carga suministradas por los fabricantes de los biodiscos. A partir de estas curvas puede estimarse la carga superficial, L , m³/s m² para reducir una DBO dada en el efluente hasta el valor deseado de la DBO del efluente (Ramalho, 1993). El área superficial requerida para un caudal total de Q , m³/s es por tanto:

$$A = \frac{Q_0}{L} = \frac{m^3/s}{m^3/s m^2} = m^2 \quad (3.0)$$

Sin embargo, se han desarrollado aproximaciones empíricas de diseño para los sistemas de biodiscos con base en los datos de una planta piloto y otra a escala real y se consideran como factores fundamentales el área de superficie de los discos y las cargas específicas en términos de g/m² de área de disco por día. En este apartado se presentan tres enfoques

para el diseño de biodiscos: remoción de DBO, nitrificación (Metcalf & Eddy, 2004) y siguiendo los criterios proporcionados por la CNA (CNA, 1994).

Remoción de DBO

Los modelos de diseño para la remoción de DBO en biodiscos son revisados por la WEF (2000). En una comparación de diseño, los resultados de los modelos generalmente reducen las cargas de DBO determinadas por el fabricante y son, en algunos casos, similares para la DBO cerca del 90 por ciento. Por esto, un modelo de segundo orden de Opatken (U.S. EPA 1985) es seleccionado para estimar el área superficial del biodisco requerida, ya que el modelo fue desarrollado con datos de nueve plantas a escala real e incluye etapas de diseños de los reactores.

Este modelo de segundo orden se adaptó para el SI por Grady (1999), y los términos fueron convertidos tomando en cuenta el área superficial del disco. El modelo puede ser utilizado para estimar la concentración de DBO soluble en cada etapa.

$$S_n = \frac{-1 + \sqrt{1 + (4)(0.00974) \left(\frac{A_s}{Q}\right) S_{n-1}}}{(2)(0.00974) \left(\frac{A_s}{Q}\right)} \quad (3.1)$$

donde:

S_n = concentración de DBO soluble en la etapa n, mg/L

A_s = Área superficial del disco en la etapa n, m²

Q = Gasto, m³/d

Debido a que la ecuación (3.1) sólo aplica para concentraciones de DBO soluble, se supone el diseño de un clarificador secundario del efluente con una proporción DBO soluble/DBO de 0.50 para una concentración de DBO en el efluente.

De igual manera, sin la concentración de DBO soluble para la alimentación del efluente primario del sistema de biodiscos, se considera una proporción de DBO soluble/DBO entre 0.50 y 0.75. Debido a que el diseño está basado en la DBO soluble, la tasa de la carga orgánica soluble en la primera etapa debe ser igual o menor de 12 a 15 g DBOs/m² d, para determinar el área de disco en la primer etapa, además de la concentración de DBOs del efluente con la ecuación (3.1).

Nitrificación.

Los sistemas de tratamiento que cuentan con biodiscos pueden ser utilizados para desarrollar biopelículas nitrificantes para la nitrificación de efluentes secundarios o en bajas cargas de DBOs donde la nitrificación puede ocurrir en el sistema de remoción de DBO. Para una combinación de remoción de DBO y nitrificación, la nitrificación será prevenida o inhibida por la adición de DBOs a la unidad de biodiscos. La bacteria nitrificante puede competir por espacio en el disco una vez que la concentración de DBOs es reducida a valores entre 10 y 15 mg/L. La concentración de DBOs restante en el tanque del biodisco estará relacionado a la carga de DBOs. Pano y Middlebrooks (1983) proporcionaron una relación para mostrar el efecto de la carga de DBOs en las tasas de nitrificación:

$$Fr_n = 1.00 - 0.1DBOs \quad (3.2)$$

donde:

Fr_n = Tasa de nitrificación posible sin efectos de DBOs

DBOs = Carga de DBO soluble, g/m² d

Para una tasa de carga de DBOs de 10 g DBOs/ m² d, la tasa de nitrificación tiende a cero.

Dimensionado

Por lo que se refiere al dimensionado, se debe partir de los siguientes datos previos:

Afluente:

- DQO
- DBO₅ soluble
- DBO₅ total
- Sólidos en suspensión
- Temperatura
- pH
- Calidad bacteriológica
- N amoniacal
- Caudal medio
- Caudal punta

- Productos específicos según origen (detergentes, grasas, metales, etc)

Efluente:

- Condiciones de calidad según parámetros marcados previamente

Cálculo de la superficie de los CBR

Si tenemos que:

$$Q * S = Q * S_0 - R * A \quad (3.3)$$

donde:

Q = Caudal afluente

S = Concentración del sustrato de salida

S₀ = Concentración del sustrato de entrada

R = Sustrato eliminado por día

A = Superficie de CBR

Entonces, si:

S = DBO₅ soluble a la salida del sistema

S₀ = DBO₅ soluble a la entrada del sistema

A = Superficie de tratamiento

R = R_c

donde:

$$R_c = \frac{19.4 * S}{15.1 + S} \quad (3.4)$$

Tendremos entonces que:

$$A = \frac{QS_0 - S}{R_c} = \frac{(15.1 + S)(QS_0 - S)}{19.4 * S}$$

$$A = \frac{QS_0 - S * T_c * F}{R_c} = \frac{(QS_0 - S * T_c * F)(15.1 + S)}{19.4 * S} \quad (3.5)$$

siendo:

T = Temperatura

T_c = Factor de corrección = 1.053^{12.7-T}

F = Factor de corrección. Si hay fermentación aerobia previa o si no hay tratamiento, F = 1; si hay fermentación anaerobia previa, F = 1.5

En una instalación completa, compuesta por ejemplo por: Tamizado, desarenador, decantador primario, CBR y decantador secundario, deberemos realizar los cálculos correspondientes para cada elemento (Seoáñez C. Mariano, 2004).

Así, para calcular uno de los decantadores tendremos que definir su superficie, lo que se realiza con la fórmula:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (3.6)$$

siendo:

A = Superficie del decantador

Q = Caudal punta

V = Velocidad de alimentación

además:

$$V = V_1 \frac{X_e}{X_e + 0.034 X_s} \quad (3.7)$$

siendo:

V_1 = Velocidad inicial de sedimentación

X_e = Concentración de sólidos en suspensión del efluente a la salida

X_s = Concentración de sólidos en suspensión del afluente a la entrada

Criterios de la CNA

Con base en investigaciones sobre el funcionamiento de los sistemas de CBR y la recolección de datos de plantas puestas en marcha, la CNA cuenta con algunos criterios y recomendaciones de diseño, los cuales se muestran en la tabla 3-2 (CNA, 1994).

Tabla 3-2. Criterios de diseño

Parámetro		Valor
Carga Orgánica:		
Sin Nitrificación	[lb DBO ₅ / d / 1000pies ³ de medio]	30 - 60
	[g DBO ₅ / d / m ³ de medio]	480 - 9610
Con Nitrificación	[lb DBO ₅ / d / 1000pies ³ de medio]	15 - 20
	[g DBO ₅ / d / m ³ de medio]	240 - 320
Carga Hidráulica:		
Sin Nitrificación	[gal / d / pie ² de área superficial]	0.75 - 1.5
	[l / d / m ² de área superficial]	30.6 - 61.1
Con Nitrificación	[gal / d / pie ² de área superficial]	0.3 - 0.6
	[l / d / m ² de área superficial]	12.2 - 24.4
Tiempo de retención (basado en 0.12) gal / pie ²		
Sin Nitrificación [min]		40 - 120
Con Nitrificación [min]		90 - 250
Volumen del Tanque [gal / pie ² de área de disco]		
		0.12
[l / m ² de área de disco]		
		4.89
Número de trenes en paralelo recomendado		
Área superficial del medio:		
Disco	[pies ² / pie ³]	20 - 25
	[m ² / m ³]	66 - 82
Celocía estándar	[pies ² / pie ³]	30 - 40
	[m ² / m ³]	98 - 131
Celocía de alta densidad	[pies ² / pie ³]	50 - 60
	[m ² / m ³]	164 - 197

Número de pasos por tren:	
DBO ₅ sol. Deseable en el efl.	Número de pasos Min. Recomendado
>25	1
15 - 25	1 ó 2
10 - 15	2 ó 3
<10	3 ó 4

Se puede realizar un diseño con base en las tablas y fórmulas anteriormente expresadas, sin embargo, el mantenimiento debe ser uno de los principales cuidados en este tipo de sistemas, debido a que alguna falla en el mismo puede generar problemas en la estabilización de la masa biológica.