

Factores técnicos y de diseño para la mejora de la eficiencia de un filtro percolador

Una Monografía Presentada Como Soporte Del Diplomado de Tratamiento
Avanzado del Agua Para Obtener
El Título De
Ingeniero Ambiental
Universidad de Pamplona, Pamplona

Anderson Yesid Fonseca Chaparro.
Agosto 2019.

Factores técnicos y de diseño para la mejora de la eficiencia de un filtro percolador

Una Monografía Presentada Como Soporte Del Diplomado de Tratamiento
Avanzado del Agua Para Obtener
El Título De
Ingeniero Ambiental
Universidad de Pamplona, Pamplona

Anderson Yesid Fonseca Chaparro.
Agosto 2019.

Tutoría:
Msc. Julio Isaac Maldonado Maldonado
Ph.D Jacipt Alexander Ramon Valencia

Agradecimientos

A Dios, porque nunca creí llegar a este punto y ahora estoy aquí de repente, talvez hallan canciones detrás de los muros imposibles. A papa, a mama y mis hermanos(as) por el apoyo incondicional que me han dado, será el inicio de la construcción de un sueño, las perdidas por fricción se manejaran, después de todo, son eso. A los profes que me brindaron su apoyo de algún modo, y a mis compañeros que son grandes personas.

Tabla de contenido

1. Introducción	7
2. Objetivos.....	9
2.1 Objetivo general	9
2.2 Objetivos específicos	9
3. Justificación	10
4. Generalidades: filtro percolador.....	11
4.1 Historia	11
4.2 Concepto y características	12
5. Evaluación de los aspectos involucrados en un sistema de filtro percolador	12
5.1 Parámetros base para el diseño de un filtro percolador.....	12
5.1.1 Tasa de carga orgánica.....	13
5.1.2 Tasa de carga hidráulica.....	14
5.2 Descripción del proceso.....	15
5.3 Categorización de filtros	24
5.4 Características en el diseño	28
5.4.1 Geometría	28
5.4.2 Medio de soporte	29
5.4.3 Rejilla del de protección del lecho filtrante	39
5.4.4 Estructuras de contención y empaquetamiento del filtro	41
5.5.5 Drenaje	43
5.5.6 Tanque clarificador.....	44
5.5 Preparación del influente para el filtro percolador.....	44
5.6 Efecto de la temperatura y pH.....	45
5.7 Roseo y Dosificación de caudal	46
5.8 Velocidad de dosificación.....	50
5.9 Aireación.....	51
5.10 Recirculación.....	55
5.11 Vectores	61
5.12 Factores de operaciones en el rendimiento	62
5.12.1 Control de olores	64
5.13 Vida útil del lecho filtrante	64
5.14 Métodos de diseño para la remoción de la DBO en filtros percoladores.	65
5.14.1 Modelo NRC national research council	65
5.14.2 Modelo de Eckenfelder	67
5.14.3 Modelo de Velz.....	67
5.14.4 Modelo de Germain	68
5.14.5 Modelo Modificado Velz.....	69
5.14.6 Procedimiento de diseño para remoción combinada de carga orgánica y nitrificación	70
5.14.7 Remoción del Nitrógeno amoniacal	71
6. Aspectos de mejora	72
6.1 Mejoras técnicas de diseño	72

6.2 Mejoras técnicas de construcción.....	78
6.3 Mejoras técnicas de operación	79
7. Conclusiones	80
Lista de referencias	81

Lista de tablas

Tabla 1 Calculo de tasa de carga orgánica (OLR). (Jia Zhu, 2016).....	13
Tabla 2 Calculo de tasa de carga nitrificante (NLR). (Jia Zhu, 2016).....	13
Tabla 3 Calculo de tasa de carga hidráulica sin y con recirculación. (Jia Zhu, 2016).....	15
Tabla 4 Información de diseño de filtros percoladores. Adaptado de (Lin, 2007).	24
Tabla 5 Clasificación de filtros percoladores. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995)	25
Tabla 6 Características de diseño y clasificación para filtros percoladores. (WEF, 2009)	26
Tabla 7 Aplicaciones para procesos de filtros percoladores. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011).....	27
Tabla 8 Rellenos de soporte aleatorio para filtro percolador. Adaptado de: (Bioplastdepuracion, 2019)	30
Tabla 9 Rellenos modulares para un filtro percolador. Adaptado de (Sumyt, 2019).....	31
Tabla 10 Características de lechos filtrantes. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)	33
Tabla 11 Comparación de lechos de filtro percolador (CH2MHILL, 1984).....	36
Tabla 12 Rendimiento del filtro para DBO. (Onda K, 1968). ¹ Aceptado normalmente como 1.035; en rango de 1,00-1,049, reportados en (WEF, 2000).	45
Tabla 13 Velocidad de rotación del distribuidor. (Metcalf y Eddy, 1995).....	48
Tabla 14 Dosificación de caudal de filtro percolador. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995).....	50
Tabla 15 Velocidad de dosificación. (Jia Zhu, 2016)	51
Tabla 16 Flujo de aire natural de conducción de aire. (Jia Zhu, 2016).	53
Tabla 17 Requisitos de oxígeno para la remoción de DBO y remoción de DBO combinado con nitrificación ¹ calculado teniendo en cuenta la entrada y salida de N y su rendimiento Neto. Rendimiento neto de nitrógeno orgánico: 0.07 ² típicamente 1,3 para grandes plantas y 1,75 para las plantas pequeñas (WEF, 2000).	54
Tabla 18 Calculo de tasa de aireación; indice de aireacion corregido y correccion adicional para temperaturas mayores a 20 °C. (Jia Zhu, 2016)	55
Tabla 19 Caída de presión a través de medios plásticos. (Jia Zhu, 2016).	55
Tabla 20 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, etapa inicial. Tomado de (Metcalf y Eddy, 1995).....	66
Tabla 21 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, etapa secundaria. Tomado de (Metcalf y Eddy, 1995).	66
Tabla 22 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, Eckenfelder. Tomado de libro (Metcalf y Eddy, 1995).....	67
Tabla 23 Modelo de Velz. (Jia Zhu, 2016).....	68
Tabla 24 Modelo de Germain (Jia Zhu, 2016). ¹ por lo general supone que es 0,5	68
Tabla 25 Modelo modificado Velz. (Jia Zhu, 2016) ¹ por lo general supone que es 0,5.....	69
Tabla 26 Diseño empírico para filtros percoladores de proceso combinado	71

Lista de figuras

<i>Figura 1 Filtro percolador moderno. (Theme Horse, 2019).</i>	17
<i>Figura 2 Capas alrededor del medio de soporte. Adaptado por el autor de (Ramalho, 1983)</i>	18
<i>Figura 3 Esquema de crecimiento adjunto. Adaptado por el autor de (Lin, 2007).</i>	18
<i>Figura 4 Esquema frontal del funcionamiento de un filtro percolador. Autor.</i>	21
<i>Figura 5 Esquema superior del funcionamiento de un filtro percolador. Autor.</i>	22
<i>Figura 6. Esquema inferior del funcionamiento de un filtro percolador. Autor.</i>	22
<i>Figura 7 Estructura básica de un sistema para filtro percolador. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)</i>	23
<i>Figura 8 Diagrama de flujo del funcionamiento de un filtro percolador. Autor</i>	23
<i>Figura 9 Reacciones biológicas a lo largo de un filtro percolador. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)</i>	28
<i>Figura 10 Piedra de río de canto rodado. Tomado de: (Piedra mundo, 2019).</i>	29
<i>Figura 11 Configuración técnica mixta AccuPac® (Brentwood Industries, 2016).</i>	38
<i>Figura 12 Técnica mixta filtro percolador en torre. (Brentwood Industries, 2016)</i>	38
<i>Figura 13 Configuración propuesta para el lecho de soporte de filtro percolador por (C.-D. Henrich, Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology, 2013)</i>	39
<i>Figura 14 Bio-rejilla AccuGrid®. (Brentwood Industries, 2011)</i>	41
<i>Figura 15 estructura de contención de filtro percolador en malla eslabonada. (Australian Meat Processor Corporation, 2015)</i>	42
<i>Figura 16 Sistema de soportes y del lecho filtrante apuntalado</i>	43
<i>Figura 17 Ventilación natural de aire y temperatura media. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995).</i>	52
<i>Figura 18 Sistemas de filtración por percolación. Adaptado de (Ramalho, 1983).</i>	59
<i>Figura 19 Filtración de una sola etapa con recirculación. Adaptado de (Ramalho, 1983)</i>	60
<i>Figura 20 Filtración en dos etapas con recirculación. Adaptado de (Ramalho, 1983)</i>	60
<i>Figura 21 Configuración de flujo de filtro percolador con distintos modos de recirculación. Adaptado de (Spellman, 2004)</i>	61

Lista de recortes

<i>Recorte 1 Características notables de la biopelícula adherida. Adaptado de (Ramalho, 1983)</i>	<i>20</i>
<i>Recorte 2 Ventajas de medios sintético para un filtro percolador. Adaptado de (Ramalho, 1983).....</i>	<i>34</i>
<i>Recorte 3 Requisitos de rendimiento de los filtros percoladores. Adaptado de (Ramalho, 1983).....</i>	<i>49</i>
<i>Recorte 4 Razones de la operación de recirculación. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)</i>	<i>57</i>

1. Introducción

Colocando el enfoque desde la ingeniería de procesos ambientales a la problemática de las aguas residuales(AR), las cuestiones a solucionar son esencialmente las mismas, solo que en mayor o menor medida; afectación del recurso hídrico y eco sistémico, afectación paisajística y estética, afectación a la salud humana, afectación económica, olores y otras consecuencias medioambientales a largo plazo, que incluso a veces son indeterminadas.

Es una problemática que no se puede eliminar, es necesario solucionarla, para ello el medio ambiente pide la mayor eficiencia posible, para la mitigación de estos impactos negativos, lo que hace necesario la implementación de soluciones planteadas a nivel científico, teniendo en cuenta las eficiencias y la normativa vigente, además de la sustentabilidad en cuestiones de costos, puesto que son pilares por los cuales se logra promocionar estos procesos a las empresas encargadas para que sean financiados e implementados en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).

Se sabe que en una PTAR pueden haber varios niveles de tratabilidad, con diferentes métodos como físicos, biológicos y químicos, y que cada uno de ellos se debe desarrollar con la mejor calidad para que el sistema funcione adecuadamente; desde este punto de vista este documento tendrá un enfoque de revisión de estilo monográfico, que abarcará los factores técnico, tecnológicos y de diseño para la mejora del tratamiento secundario de agua residual por filtro percolador, presentando antes un panorama integral de sus generalidades con el fin de sustentar adecuadamente las base para llevar a cabo un apoyo crítico sobre este proceso de tratamiento.

El tratamiento de agua residual por filtros percoladores es una solución que se llevó a cabo por primera vez en 1893 en Inglaterra, sin embargo, su implementación disminuyó frente a otras nuevas formas de tratamiento por las dificultades que presentaba al proceso, los materiales del lecho del filtro; pero después de estar rezagada esta técnica en las últimas décadas ha ganado bastante protagonismo, razón de la mejora del área superficial por unidad de volumen del lecho filtrante; lo que se ha traducido en versatilidad del sistema y mayores eficiencias de tratabilidad.

El filtro percolador es un sistema de tratamiento biológico de película adherida sobre un lecho fijo generalmente aireado por ventilación natural basada en el concepto de diferencial de temperatura; funciona mediante un sistema de esparcimiento cíclico y uniforme del AR sobre la parte superior de un lecho de soporte de microorganismos, tal que se logre un tratamiento de cantidades de carga por unidades de superficie del lecho filtrante en el tiempo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Proponer una compilación de información integral apoyada de análisis crítico de los factores técnicos, tecnológicos y de diseño para la optimización de un filtro percolador en el tratamiento de agua residual.

2.2 Objetivos específicos

Desarrollar un plan de compilación de información base y actualizada sobre las generalidades y los conceptos de diseño enfocado hacia mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de un filtro percolador.

Presentar los aspectos involucrados en el funcionamiento de este sistema desde elementales hasta los más avanzados.

Realizar un análisis crítico a los aspectos de diseño, construcción y operación de mayor relevancia implementativa según el entorno informativo desarrollado.

Seleccionar los aspectos de relevancia de mejoras técnicas de diseño, construcción y operación considerando las soluciones más viables desde el punto de vista técnico y económico.

3. Justificación

A nivel mundial los porcentajes de vertimientos de aguas contaminadas por uso doméstico e industrial son muy altas, esta situación afecta a los recursos naturales del ambiente y a la población que convive en este, en países de América Latina con tanta riqueza de biodiversidad es una situación que también causa pérdidas muy notables.

Por esta razón, la optimización, la sustentabilidad y las mejoras de eficiencia del tratamiento del agua residual es muy importante para el desarrollo íntegro de un país y de su población; haciendo que los conceptos de definir especificar o puntualizar información sea fundamental en la ingeniería de procesos ambientales.

Cuando se tiene claro y se conoce las opciones, el funcionamiento, los factores involucrados y las nuevas maneras de solución de mitigación a una problemática, es posible innovar e incluso reducir costos de implementación, lo que hace, más promocionable las soluciones a los clientes responsables. De esta manera se ha decidido desarrollar la conformación de este documento monográfico.

4. Generalidades: filtro percolador

4.1 Historia

La noción de filtro percolador resulto de la utilización de filtros de contacto, estanques impermeables relleno de piedra triturada, a los que se les introducía agua residual por la parte superior, se le dejaba un tiempo de retención hidráulica y se drenaban, luego se requería de un tiempo de reposo, para volver a iniciar el ciclo (Metcalf y Eddy, 1995). Este sistema presentaba regularmente obstrucciones en el drenaje, permitía solo bajas cargas, y la cuestión operativa para obtener resultados aceptables llegaba a ser un proceso tedioso para los operadores, a esto se respondió con una solución en 1893 con la construcción y puesta en marcha del primer filtro percolador en Inglaterra.

Históricamente el diseño de filtros percoladores más construidos durante años fue un lecho de piedras con profundidades de máximo 3 m, por donde se hacía fluir el agua residual. (Davis, 2010). La condicionante de la altura de estos sistemas se traducía en mayor área requeridas para tratar un determinado caudal, la causa limitante de la altura se debía a razones estructurales por el peso de la piedra (C.P. Leslie Grady, 2011)

Los filtros de piedra funcionaron bien durante años, pero con ciertas limitaciones, por ejemplo bajo cargas orgánicas altas, los crecimientos de limo eran tan abundantes que obstruían rápidamente los espacios vacíos entre el material, causando inundaciones y obstaculizando el funcionamiento del sistema (Davis, 2010). Junto con estas razones y el desarrollo de los sistema de contactores biológico rotativos se disminuyó su uso a finales de 1960, pero una década después volvieron a recuperar su notoriedad principalmente debido a la fabricación de nuevos lecho filtrantes sintéticos (Lin, 2007). Esto nuevos desarrollos permitieron manufacturar lechos plásticos más livianos y de mayores espacios para el flujo de aire, que junto con

configuraciones de proceso mejoradas y una mayor acumulación de biopelícula en el proceso, resultado en la mejora económica y de rendimiento de los tratamientos. Entonces se generó el resurgimiento de su uso (C.P. Leslie Grady, 2011). Desde entonces se ha venido realizando investigaciones sobre la forma más eficaz de equilibrar las relaciones de superficie específica DE los lechos con el espacio vacío de comunicación para flujo de aire de estos materiales.

4.2 Concepto y características

Un filtro percolador no es un una acción de filtrado como podría entenderse su nombre si no, un proceso unitario para la introducción de un efluente que en contacto con un lecho de crecimiento de biopelícula se genera una oxidación biológica (Lin, 2007). Es un biorreactor de crecimiento aeróbico en la forma de torre de relleno (C.P. Leslie Grady, 2011). Metcalf y Eddy, aluden al filtro percolador como “un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual percola el agua residual”. (p.460).

Spellman (2004) menciona que los filtros “este tratamiento es competente para soportar cargas de choque periódicas, y que las demandas de energía de proceso son bajas debido al proceso de aireación natural”. (p.245). pero no debe ser usado para la degradación de la materia orgánica insoluble. (C.P. Leslie Grady, 2011), porque en realidad, no se presenta disminución de la materia orgánica por filtración mecánica (Ramalho, 1983).

5. Evaluación de los aspectos involucrados en un sistema de filtro percolador

5.1 Parámetros base para el diseño de un filtro percolador

Los factores que se deben tener en cuenta para predecir el funcionamiento de los filtros percoladores parte desde las cargas orgánica e hidráulica, relación de recirculación, SS, hasta el grado de tratamiento requerido (Metcalf y Eddy, 1995) y (Spellman, 2004).

5.1.1 Tasa de carga orgánica

La tasa de carga orgánica es expresada como la cantidad de DBO aplicada a un determinado volumen de lecho filtrante, para el cálculo de la carga orgánica se requiere conocerse dos factores importantes: la cantidad de DBO o DQO que será aplicada al lecho filtrante por día, y el volumen del lecho, sin tener en cuenta la recirculación (Spellman, 2004). Como se muestra en la tabla 1.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
V_M : Volumen del medio, m ³	$OLR = \left(\frac{BOD_5 \text{ Applied}}{\text{Media Volume}} \right) = \frac{Q_{in} \cdot S_o}{V_M} \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$
Q_{in} : Caudal de planta, m ³ / día	
S_o : Concentración de entrada DBO ₅ , g / m ³	

Tabla 1 Calculo de tasa de carga orgánica (OLR). (Jia Zhu, 2016)

La tasa de carga nitrificante (NLR) se expresa normalmente como gramos de nitrógeno amoniacal por metro cuadrado de área de superficie del medio filtrante, se calcula como se muestra en la tabla 2.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
V_M : Volumen del medio, m ³	$NLR = \frac{\text{Ammonium Nitrogen Applied}}{\text{Media Surface}} = \frac{Q_{in} \cdot S_{N,in}}{V_M \cdot A_s}$
A_s : Superficie especifica del medio m ² / m ³	
Q_{in} : Caudal de planta, m ³ / día	
$S_{N, in}$: concentración de nitrógeno amoniacal de entrada, g / m ³	

Tabla 2 Calculo de tasa de carga nitrificante (NLR). (Jia Zhu, 2016)

5.1.2 Tasa de carga hidráulica

La tasa de carga hidráulica se calcula basándose en el área de superficie del filtro. Los rangos de velocidad de carga hidráulicos normales para la tasa estándar y de alta velocidad de filtros percoladores son: (Spellman, 2004).

La tasa de carga de humectación es un parámetro de diseño y funcionamiento indispensable, afecta el tiempo de retención del líquido en el lecho, permite la eficiencia de mojado del área superficial del lecho e incide en el espesor de biopelícula (Jia Zhu, 2016). Se debe tener cuidado con este parámetro, razón de que si esta es muy baja pueden generarse condiciones anoxicas graves en el filtro (Spellman, 2004).

Esta tasa de carga se calcula dependiendo si existe o no recirculación. La tasa de carga hidráulica (WHL) sin recirculación y con recirculación THL se calcula como se muestra en la tabla 3

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
<i>Tasa de carga hidráulica sin recirculación</i>	
WHL: Tasa de carga hidráulica sin recirculación, m ³ / d • m ²	$WHL = \frac{Q_{in}}{A}$
Q_{in} : Caudal de planta, m ³ / día	
A: Área superficial de filtro vista en planta, m ²	
<i>Tasa de carga hidráulica con recirculación</i>	
THL: Tasa de carga hidráulica con recirculación, m ³ / d • m ²	$THL = \frac{Q_{in} + Q_R}{A}$

Q_{in} : Caudal de planta, m³ / día

Q_R : Caudal de recirculación, m³ / día

A: Área superficial de filtro vista en planta, m²

Tabla 3 Calculo de tasa de carga hidráulica sin y con recirculación. (Jia Zhu, 2016)

5.2 Descripción del proceso

Es un sistema de tratamiento para agua residual predominantemente aerobio generando los subproductos respectivos de esta oxidación, sin embargo existe una oxidación anaerobia cuando aumenta el espesor de la biopelícula en el lecho, y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar en todo el espesor de la capa bacteriana, por lo que, la parte de la capa más próxima a la superficie del medio forma un ambiente anaerobio (Metcalf y Eddy, 1995), En la 1 y 2 se muestran la reacciones básicas de estas digestiones.

Digestion aerobia

$MO + O_2 + \text{Microorganismos} + \text{nutrientes} \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{Biomasa} + NH_4 + P.$

Digestion anaerobia

$MO + \text{Microorganismos} + \text{nutrientes} \rightarrow CO_2 + H_2O + H_2S + \text{Biomasa} + H_2 + CH_4 + N_2$ (1)(2)

Para llevar a cabo este proceso es necesario tratar el influente previamente para retirar los elementos particulado no biodegradables como arenas, y materiales de escombros como fibras, plásticos y flotantes para evitar la distribución no uniforme del caudal y bajo desempeño de la biopelícula adherida. C.P. Leslie Grady (2011) recomienda para este tratamiento “la remoción de estos elementos por clarificadores primarios, en caso de usarse pantallas estas deben ser finas (generalmente menores o iguales a 1 mm de apertura) no es aceptable emplear

pantallas gruesas para una eliminación adecuada; En la práctica los clarificadores primarios son los más utilizados.

Este proceso se caracteriza por ser de lecho fijo, en contacto con el aire y cíclicamente humectado por el AR; es de medio adherido porque se conforma de una superficie sobre la cual se puede hospedar la película de bacterias depuradoras, encargadas de remover la materia orgánica, aunque es posible usar este sistema para generar nitrificación convirtiendo el nitrógeno amoniacal a nitrato (Metcalf y Eddy, 1995). Este proceso involucra esparcir AR con una distribución uniforme sobre el medio de soporte como se aprecia en la figura 1; “(...) a medida que el agua residual se escurre sobre la superficie del lecho, un crecimiento de microorganismos (bacterias, protozoos, hongos, algas, helmintos o gusanos y larvas) se desarrolla” (Spellman, 2004, pág. 245).

Metcalf y Eddy (1995) denota que “las diferentes especies biológicas sobre el lecho del filtro sufren variación a través de su profundidad, en función a factores como la carga orgánica e hidráulica, las características del AR, el Ph, la oxigenación, y la temperatura...” (p.463).

Los protozoos que conviven en los filtros percoladores desarrollan la función de controlar la biopelícula bacteriana (Metcalf y Eddy, 1995).



Figura 1 Filtro percolador moderno. (Theme Horse, 2019).

Según Ramalho (1983) en los filtros percoladores “la materia orgánica y coloidal se separa mediante oxidación aerobia, biosorción, coagulación y descomposición anaerobia”, los microorganismos biodegradan la materia orgánica suministrada y forman una película sobre la superficie del lecho de soporte, dando nombre a este proceso como crecimiento adjunto. (Davis, 2010). El flujo de aire circula a través de los espacios abiertos del lecho generando una transferencia de oxígeno a la biopelícula para mantener la capa aeróbica exterior. (Spellman, 2004).

La capa del limo formada alrededor del medio de soporte tiene un espesor comprendido entre 0,1 y 2,0 mm, la cual se conforma por una capa anaerobia, cubierta de otra aerobia (Ramalho, 1983). como se presenta en la figura 2 y 3:

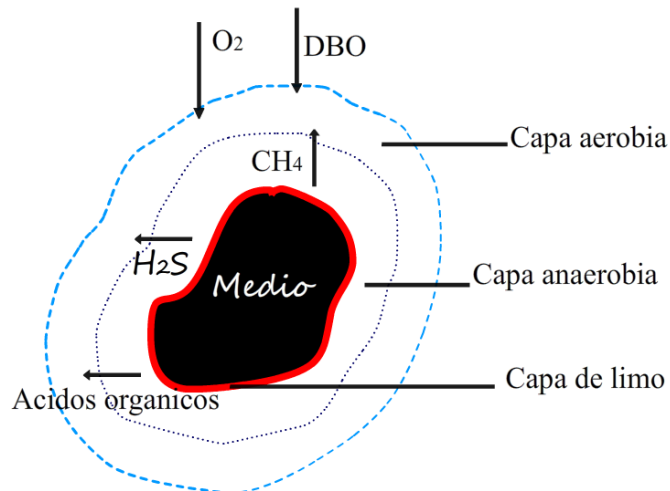


Figura 2 Capas alrededor del medio de soporte. Adaptado por el autor de (Ramalho, 1983).

Como puede observarse en la subcapa anaerobia, la degradación tiene lugar con formación de ácidos orgánicos metano y H_2S el cual es responsable de los malos olores que pueden presentarse en el tratamiento si no son debidamente controlados.

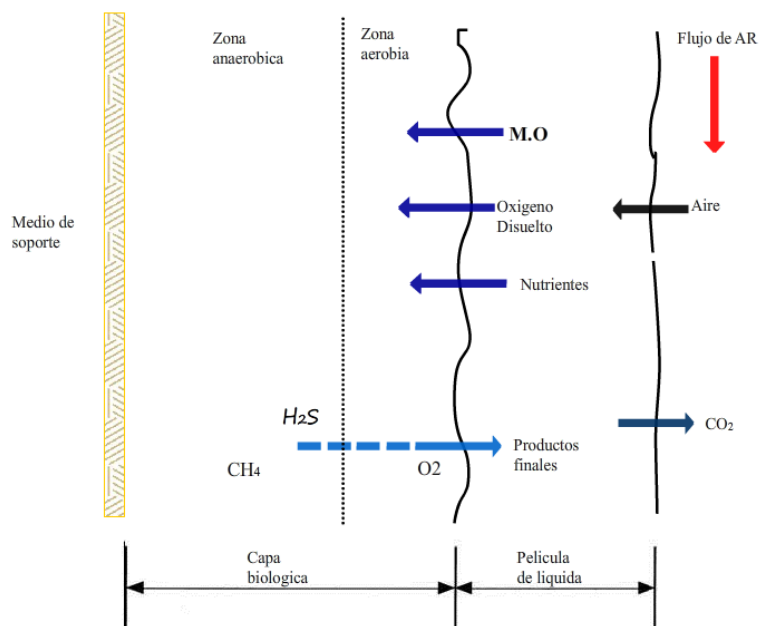


Figura 3 Esquema de crecimiento adjunto. Adaptado por el autor de (Lin, 2007).

El limo se produce en la zona superficial de los medios de soporte mientras que el oxígeno es suministrado por el flujo de aire ascendente a través de los espacios vacíos del lecho (Lin, 2007).

Como los microorganismos consumen la materia orgánica (MO) y el oxígeno, generan más organismos, dióxido de carbono, sulfatos, nitratos, y otros subproductos estables, los cuales escapan como gas o fluye hacia el efluente (Spellman, 2004).

Metcalf y Eddy (1995) sostiene que: “La comunidad microbiana presente en un filtro está compuesta principalmente por protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos”.(p.462).

Las especies bacterianas más habituales en este sistema son las *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas* y *Flavobacterium*, las bacterias facultativas son las más predominantes en estos lechos; las bacterias del nitrógeno pueden habitar en la parte baja de un filtro de profundidad como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* (Lin, 2007), dentro de la capa viscosa, en la que prevalecen condiciones adversas para el crecimiento bacteriano, sin embargo en las condiciones pueden cohabitar bacterias de formas filamentosas como las *Beggia-toa* y *Sphaerotilus natans* (Metcalf y Eddy, 1995).

Es notable resaltar también que a medida que el oxígeno disuelto es consumido en el líquido, este es repuesto por adsorción a partir de aire en los vacíos del medio filtrante (Lin, 2007). En el recorte 1 se resalta algunas particularidades que se presenta en la biopelícula adherida:

- Los microorganismos cerca de la superficie del lecho de filtración están en una tasa de crecimiento rápido debido a la abundante suministro de alimentación, mientras que los microorganismos en la parte inferior del filtro pueden estar en un estado de inactivación.
- ***El sustrato se oxida parcialmente para proporcionar la energía necesaria al proceso biológico. Otra parte del sustrato se utiliza para sintetizar nuevo material de constitución del limo.***
- El espesor de la subcapa aerobia es función del caudal de agua residual aplicado y de su DBO. Cuanto mayor sea la DBO del afluente menor será el espesor de la subcapa aerobia, ya que se presenta un consumo más rápido de oxígeno.

Recorte 1 Características notables de la biopelícula adherida. Adaptado de (Ramalho, 1983).

Resulta que la biopelícula aumenta de espesor y la MO adsorbida es metabolizada antes de que pueda alcanzar a los microorganismos de la parte profunda de la capa adherida; y al no haber fuente de carbono se quedan sin alimento suficiente (Metcalf y Eddy, 1995); al quedarse sin nutrición los microorganismos, inician la fase de respiración endógena, que implica que la capa microbiana pierde su capacidad para adherirse a la superficie del relleno y se desprenda; este fenómeno, por lo general se da en función de la “tasa de carga orgánica” e “hidráulica del filtro” (Ramalho, 1983). Metcalf y Eddy (1995) indican que: “la tasa de carga hidráulica produce las velocidades de arrastre, mientras que la tasa de carga orgánica permite las velocidad de metabolismo en la biopelícula generando la remoción del desprendimiento, al paso del líquido a través del lecho, y se inicia el crecimiento de una nueva capa biológica; sin embargo las tasa de

carga hidráulica del sistema debe asegurar un espesor homogéneo de esta capa biológica”.

(p.462). En la parte superior de los filtro por lo general se presenta la colonizaciones de gusanos, larvas de lodos, moscas y caracoles (Lin, 2007), de lo cual se traerá a referencia más adelante.

El drenaje inferior se utiliza para transportar las aguas residuales que pasan a través del filtro biológico y drenar a las unidades de tratamiento siguiente para la sedimentación de la biopelícula desprendida (Lin, 2007).

En las figuras 4, 5, y 6 se representa los esquemas con los flujos de un filtro percolador ilustrando sus componentes principales como: lecho de soporte, brazos rociadores, escotillas de ventilación que son las permiten que el aire circule a través del filtro de goteo, proporcionando la oxigenación necesaria, también la serie de canales de drenaje en la parte inferior.

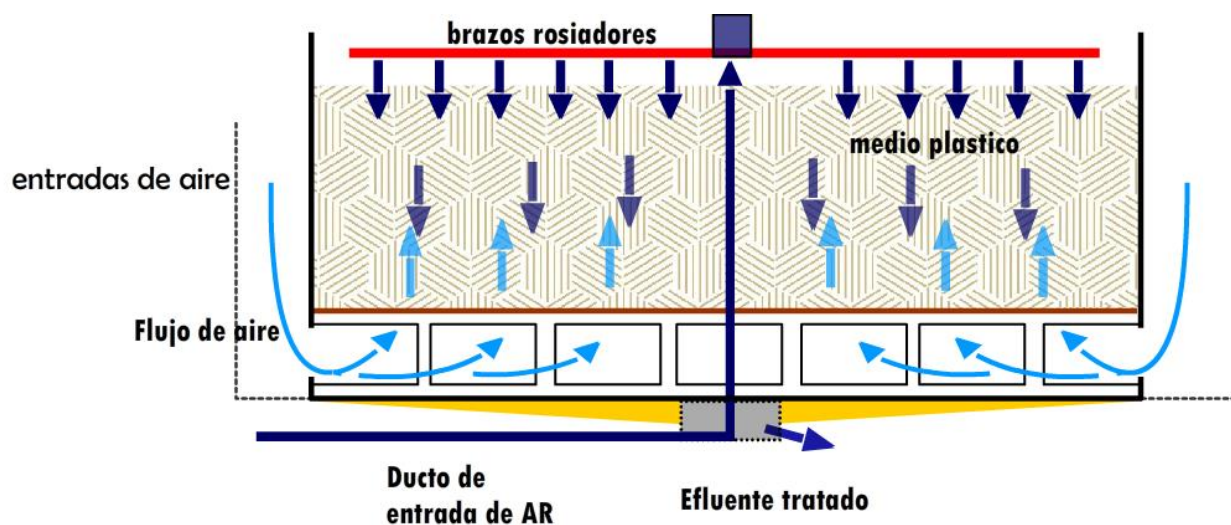


Figura 4 Esquema frontal del funcionamiento de un filtro percolador. Autor.



Figura 5 Esquema superior del funcionamiento de un filtro percolador. Autor.

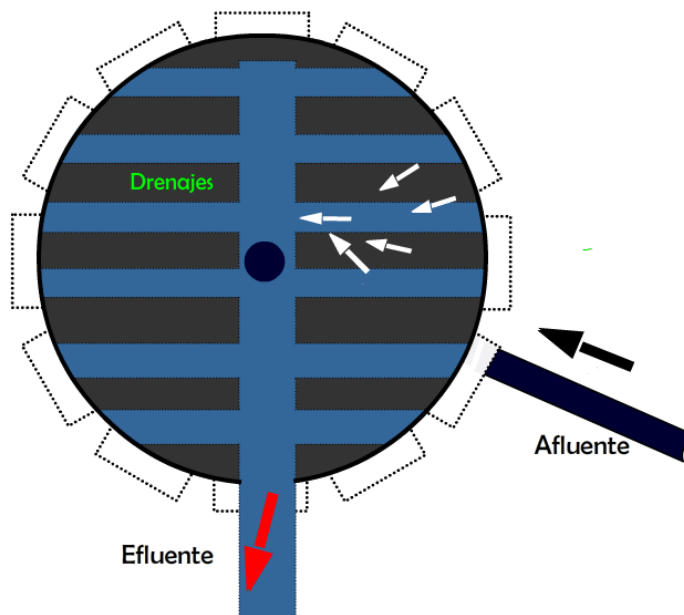


Figura 6. Esquema inferior del funcionamiento de un filtro percolador. Autor

En la figura 7 se esquematiza la estructura básica de un sistema para filtro percolador con recirculación, a lo largo del documento se tratará en detalle los aspectos y factores correspondientes:

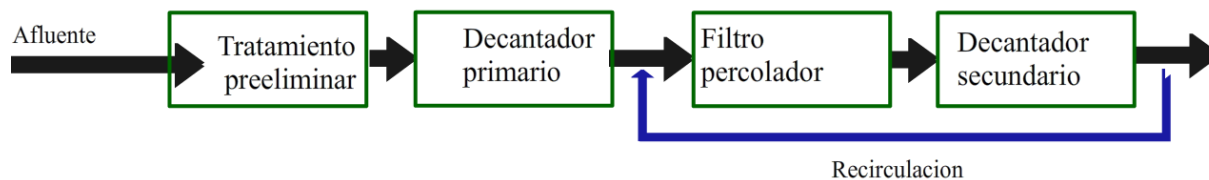


Figura 7 Estructura básica de un sistema para filtro percolador. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011).

En la figura 8 se esquematiza el un diagrama de los flujos en el proceso en un filtro percolador:

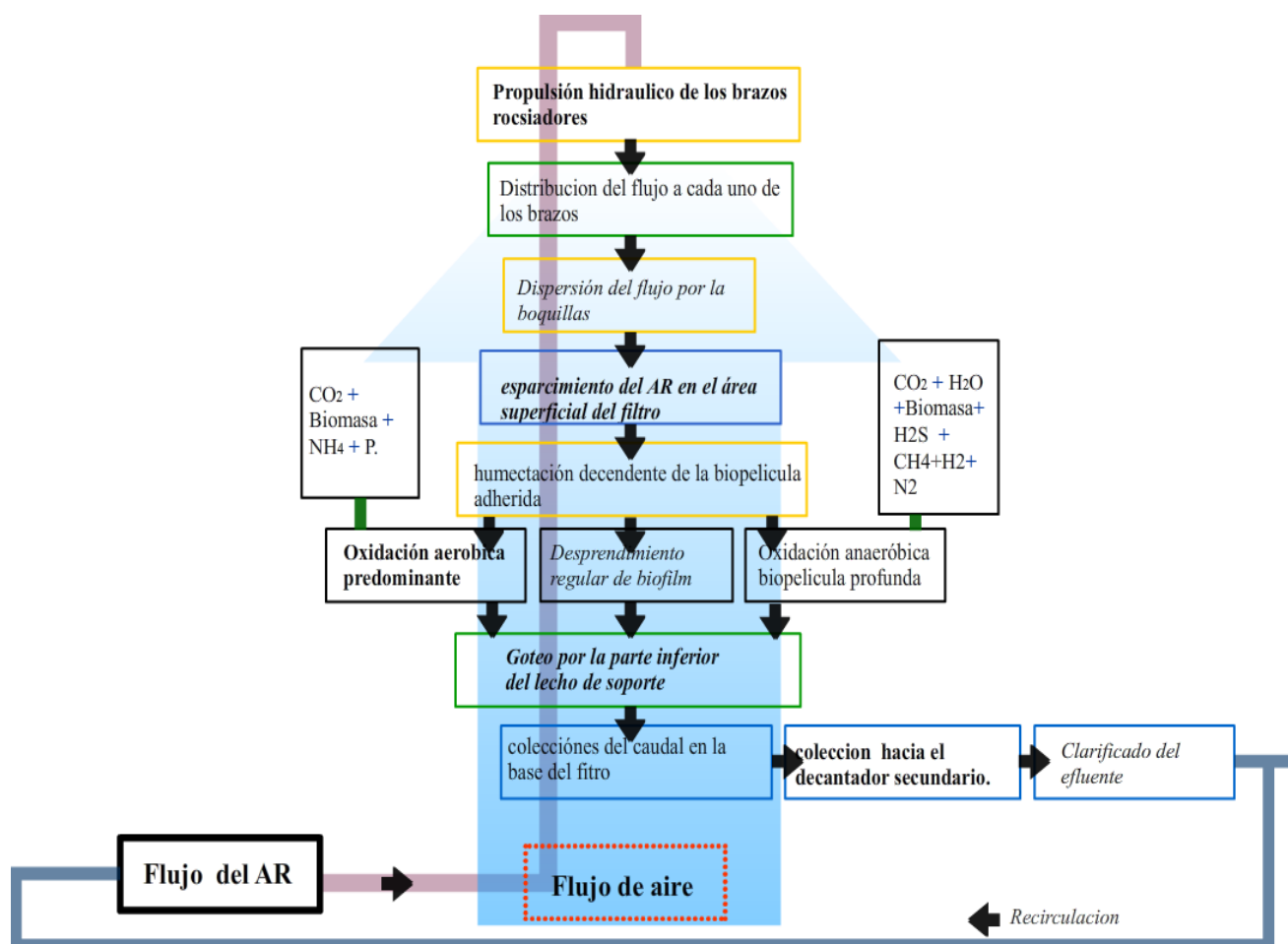


Figura 8 Diagrama de flujo del funcionamiento de un filtro percolador. Autor

5.3 Categorización de filtros

Los filtros percoladores son clasificados de acuerdo con las tasas de carga hidráulica y orgánica aplicada; la primera expresa la cantidad de agua residual aplicada en un día por unidad de superficie del filtro, y la tasa de carga orgánica se expresa como DBO5 aplicada por día por unidad de volumen del medio filtrante; en la tabla 4, se resume la información de diseño para un filtro percolador según (Lin, 2007)

Información de diseño para filtro percolador						
Parámetro	Baja tasa	Tasa intermedia	Alta tasa	súper alta tasa	desbaste	dos etapas
Medio filtrante	Roca, escoria	Roca, escoria	Rock	plástico	Plástico, madera roja	Roca, plástico
Carga hidráulica m ³ / (m ² · d)	1-3,7	03.07 a 09.04	9,4-37	14-86	47-187	9,4-37
DBO5 de carga kg / (m ³ · d)	desde 0,08 hasta 0,32	0,24-0,48	0,48-1,0	0,48-1,6	1,6-8,0	1,0-2,0
Tasa de recirculación moscas de filtro	0 Mucho	0-1 algunos	1-2 pocos	1-2 pocos o ninguno	1-4 pocos o ninguno	0,5-2 pocos o ninguno
Rosiado	intermitente	intermitente	continuo	continuo	continuo	continuo
Profundidad, m	1.8-2.4	1.8-2.4	0.9-1.8	3-12	4,6-12	1.8-2.4
% eliminación de DBO5 (Incluye sedimentación)	80-90	50-70	65-85	65-80	40-65	85-95
Nitrificación	bien	parcial	pequeño	pequeño	no	bien
Proceso combinado para el tratamiento secundario	no	improbable	probable	si	si	si
para el tratamiento terciario	si	si	si	si	si	si

Tabla 4 Información de diseño de filtros percoladores. Adaptado de (Lin, 2007).

En la tabla 5 se describe otras características de la clasificación de los filtro percoladores según (Metcalf y Eddy, 1995)

Description

Baja carga

Produce una calidad estable del efluente con independencia de la naturaleza cambiante del afluente, usan una carga hidráulica constante, por medio de bombas con control del nivel de succión o con sifones dosificadores.

Los tanques dosificadores son de pequeño tamaño, generalmente con un tiempo de retención de solo 2 minutos para eliminar la intermitencia de la dosificación, con un tiempo entre dosificaciones debe ser menor a 1 hora debido a que el deceso de la humedad afecta la película biológica

En las zonas inferiores pueden proliferar bacterias nitrificantes autótrofas que oxidan el nitrógeno amoniacal para transformarlo en nitritos y nitratos, Bajo condiciones ideales los filtros de baja carga produce una alta eliminación de DBO y muy nitrificado.

Filtros de media y alta carga

La recirculación del efluente del filtro o del efluente final permite la utilización de cargas orgánicas más elevadas. El flujo de caudal al filtro suele ser continuo, a pesar de que se considera aceptable el riego intermitente del medio filtrante.

La recirculación del efluente del clarificador permite conseguir rendimientos de eliminación parecidos a los de los filtros de baja carga. La recirculación a través del filtro da lugar al retorno de organismos viables y, a menudo, mejora la eficiencia del tratamiento. La recirculación también ayuda a prevenir el encharcamiento del filtro y a reducir los problemas de olores y de proliferación de moscas.

Filtros de muy alta carga.

Trabajan a altas cargas hidráulicas y orgánicas; el aumento de la profundidad se hace posible por el empleo de medios más ligeros, de plástico. La mayoría de estos filtros se constituyen en forma de torres.

Filtros de desbaste.

Son filtros de alta carga que se proyectan para trabajar con cargas orgánicas superiores a $1,6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ y cargas hidráulicas superiores a $187 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$; en la mayoría de los casos, estos filtros se utilizan como pretratamiento de agua residual antes del tratamiento secundario. Contempla el uso de medios de plásticos.

Tabla 5 Clasificación de filtros percoladores. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995).

En contraste con la clasificación anterior la federación para el agua y el medio ambiente de estados unidos (WEF por sus siglas en inglés) puntualiza la clasificación a partir del objetivo de proceso que se busca, entendiendo el desbaste como la disminución de la DBO de AR de altas cargas como se muestra en la tabla 6.

<i>Parámetro</i>	<i>Desbaste</i>	<i>Oxidación de carbono</i>	<i>Oxidación de carbono y nitrificación</i>	<i>Nitrificantes</i>
<i>Medio</i>	Medio de flujo vertical	Medio aleatorio, Piedra prof-condicionada Medio de flujo cruzado Medio de flujo vertical	Medio aleatorio Piedra prof-condicionada Medios de flujo cruzado	Medios aleatorio Medios de flujo cruzado
<i>Tipo de efluente</i>	Efluente primario	Efluente primario	Efluente primario	Efluente secundario
<i>Carga hidráulica m³ / día • m²</i>	52,8-178,2	13,7-88,0	13,7-88,0	35,2-88,0
<i>Carga orgánica, kg DBO₅ / m³ • día</i>	1,6-3,52	0,32-0,96	0,08 a 0,24	N / A
<i>Carga de nitrógeno kg NH₃-N / m² • día</i>	N / A	N / A	0,2-1,0	0.5-2.4
<i>Calidad de salida</i>	40-70% DBO ₅ conversion	15-30 mg / L DBO ₅ y SST	<10 mg / L de DBO ₅ <3 mg / L NH ₄ -N	0,5-3 NH ₄ - N
<i>Moscas</i>	No hay crecimiento ble apreciación	Ningún crecimiento apreciable	Ningún crecimiento apreciable	No hay crecimiento apreciable
<i>Profundidad m</i>	0,91-6,10	≤12.2	≤12.2	≤12.2

Tabla 6 Características de diseño y clasificación para filtros percoladores. (WEF , 2009)

Según C.P Leslie Grady et al. (2011) los filtros percoladores se caracterizan “debido al grado de tratamiento que se determina por la velocidad de carga orgánica del proceso, y se usa como un indicador estimativo del grado de tratamiento” (p.770).

En la ecuación 3, se define el cálculo de la carga orgánica total como la tasa de flujo de materia orgánica biodegradable, excluyendo la recirculación en el influente.

$$A_{S} = \frac{Q_{in}(S_{SO} + S_{XO})}{V_m}$$

(3)

donde S_{SO} y S_{XO} son las concentraciones de sustrato fácilmente y lentamente biodegradable respectivamente del agua residual entrante, V_m volumen del medio y Q_{in} es el caudal del afluente.

En la tabla 7 se puntualiza los tipos de aplicación de filtros percoladores, el tipo de influente y cargas orgánicas respectivas.

Aplicaciones para proceso de filtro percoladores		
Aplicación	Afluente de AR	Carga kg DBO₅/(m³ · día)
Desbaste	Aguas residuales filtradas o efluentes primarios.	0.7–1.5
Oxidación de carbono	Aguas residuales filtradas o efluentes primarios.	0.7–1.5
Oxidación de combinado y nitrificación	Efluentes secundarios.	<1.0
Nitrificación de etapa separada	Efluentes secundarios.	No aplica

Tabla 7 Aplicaciones para procesos de filtros percoladores. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011).

Según C.P Leslie Grady (2011) un filtro percolador de desbaste: “funciona para reducir la concentración de la materia orgánica antes de continuar el tratamiento biológico; el siguiente grado es para aplicar menor carga orgánica, se define como oxidación de carbono; una aún más baja se utiliza para conseguir la oxidación de carbono combinado y nitrificación, donde la oxidación de carbono es relativamente completa en la parte superior del filtro y permite un crecimiento de bacterias nitrificantes en la parte inferior del lecho. La nitrificación de etapa separada se diferencia en que se usa para un flujo bajo de carga orgánica y sólidos en suspensión biodegradables, pero con una concentración significativa de amoníaco-N; como consecuencia, se desarrolla una biopelícula de alto contenido de bacterias nitrificantes”.

(p.771).

En la figura 8 se muestra las reacciones que se llevan a cabo a diferentes profundidades del lecho de un filtro percolador compuesto de oxidación de carbono y nitrificación.

Es de resaltar que las condiciones desfavorables para los organismos nitrificantes en la superficie de la biopelícula puede volverse muy buenas en el interior de lecho filtrante (Wik, 2004)

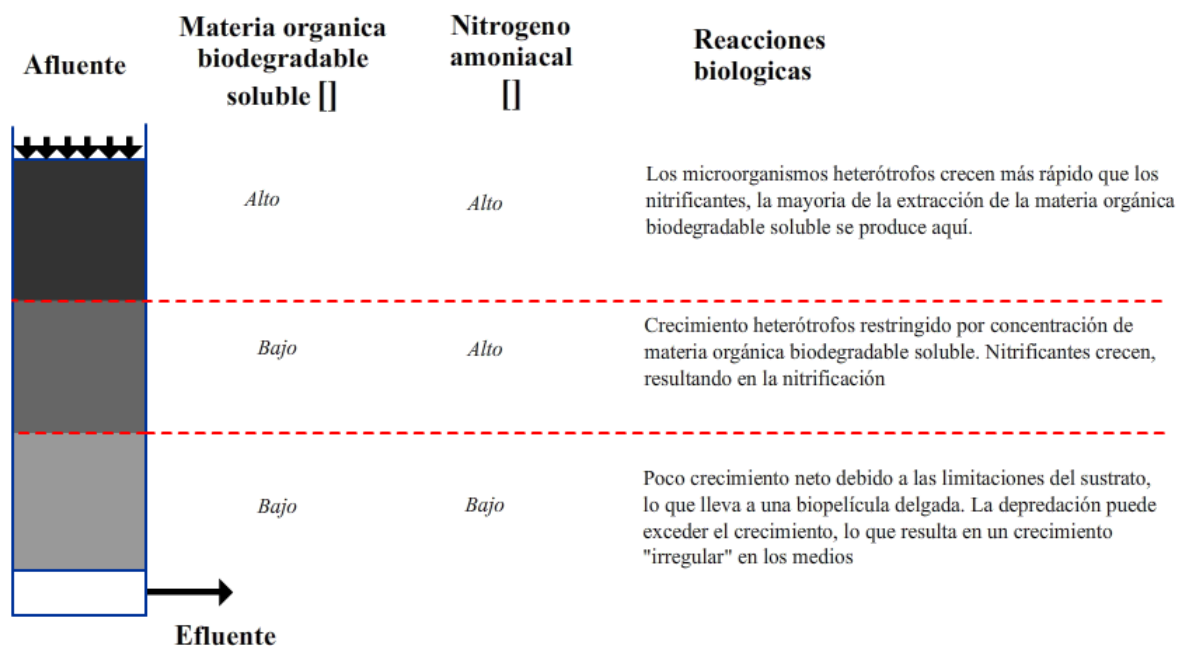


Figura 9 Reacciones biológicas a lo largo de un filtro percolador. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)

5.4 Características en el diseño

5.4.1 Geometría

La geometría del filtro percolador podría variar, pueden construirse de diferentes formas; circulares, cuadradas, o rectangulares (Metcalf y Eddy, 1995); sin embargo las formas circulares son las más aceptadas por la facilidad constructiva y de implementación del sistema de rociado, en el lecho circular la adaptabilidad de los brazos rotatorios impulsado hidráulicamente es óptima, brindado la posibilidad de una rociado muy homogéneo; es por estas razones que la forma cilíndrica es la que se ha usado popularmente en este sistema.

5.4.2 Medio de soporte

Los medios de soporte para el funcionamiento de un filtro percolador se pueden dividir en dos tipos los de baja tasa que fueron los pioneros de este sistema, y los de alta tasa de medios de sintéticos (plásticos), modulares o de instalación aleatoria ver tabla m.

Están los materiales pétreos figura 10, de plástico con forma irregular, ver tabla 10; y los dos principales tipos de medios modulares de láminas de plástico corrugado con flujo vertical y flujo transversal, ver tabla 11; que resultan igual de eficientes en la eliminación de la DBO y SS para un extenso intervalo de cargas. (Metcalf y Eddy, 1995)



Figura 10 Piedra de río de canto rodado. Tomado de: (Piedra mundo, 2019).

Tipos de relleno aleatorio	Diametro mm	Peso especifico Kg/m3	Superficie especifica m2/m3
	135	40	180
	135	49	296
	188	34	140
	28	135	> 500

Tabla 8 Rellenos de soporte aleatorio para filtro percolador. Adaptado de: (Bioplastdepuracion, 2019)

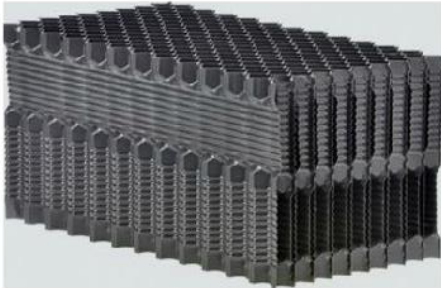
Tipos de relleno modulares		Indice de vacio %	Superficie especifico m2/m3
	Relleno tubular	97	105-205
	Relleno de flujo Vertical	>97	125-150
	Relleno de Flujo Cruzado	>97	70-320

Tabla 9 Rellenos modulares para un filtro percolador. Adaptado de (Sumyt, 2019)

Los medios de baja tasa populares han sido de material pétreo, aunque ya casi no están en uso, por su elevado peso y poca funcionalidad de los espacios vacíos. El uso de este material restringe el volumen de huecos, limitando la circulación de aire y consecuentemente la cantidad

de oxígeno disponible para trasladarse a la lámina de líquido (Davis, 2010). Estos medios imponen limitaciones operativas y parámetros altos a los requisitos estructurales y de superficies necesarias. Los medios de piedra y otros materiales similares, no pueden exceder profundidades de 1 a 2,5 m (Ramalho, 1983). Sin embargo, cuando no sea descartable la posibilidad de usar este material, o solo se requiera tratar pequeños caudales, los medios de piedra ideales deben ser de canto redondeado con tamaño uniforme y diámetros de aproximadamente 5 cm (C.P. Leslie Grady, 2011), como se pueden apreciar en la figura 10.

El flujo a través de un filtro debería ser sin mezcla vertical, sino mezcla horizontal completa (Wik, 2004). Los lechos modulares de flujo transversal permiten una mejor eficiencia del tratamiento en comparación con los lechos modulares de flujo vertical con la misma superficie en función de cargas baja y medias, sin embargo, los lechos de flujo vertical permiten ventajas a tasas de carga orgánica alta, debido a la orientación de los espacios vacíos (Glen T. Daigger, 2011). Con lo cual son muy recomendables para tratamiento de AR de altas resistencias como AR industriales, o sistemas de desbaste.

El lecho de flujo transversal combina elevada área superficial con alto número de puntos de mezcla por cada unidad de volumen, facilitando el rendimiento del sistema a través de una amplia tasa de humectación, sus módulos corrugados transversalmente permiten distribución horizontal continua y homogénea de aire y líquido a lo largo de la profundidad del lecho; por su parte el lecho de flujo vertical permite mantener un bajo grosor de biopelícula, minimizando la acumulación de biomasa (Brentwood Industries, Inc., 2014) y (Australian Meat Processor Corporation, 2015)

Estos medios de alta tasa se caracterizan por el bajo peso y la gran área de superficie específica que brindan, proporcionando altos porcentajes de espacio vacío, razón que posibilita






lechos filtrantes de hasta 12 m de altura con posibilidad de tratar altas cargas orgánicas (C.P. Leslie Grady, 2011); en la tabla 12 se presenta una comparativa de los medios de roca y los medios de alta tasa.

Características de lecho filtrantes					
Tipo de medio	Descripción	Tamaño	kg medio/ m³	Área superficial específica m²/m³	% Vacío Espacio
Rock	Roca de río redondeados de tamaño uniforme (deseable) o más	2.5-7.5	1500	60	50
	Escoria irregular (menos deseable)	5-10	1600	45	60
Alta tasa					
Fajo	Hojas de PVC formados en varias configuraciones y	61 × 61 × 122	30-80	88-105	> 95
Vertical, semicorrugado (VSC)	Sujetado juntos para formar haces con aberturas de	61 × 61 × 122	65-95	140-150	> 95
Vertical, totalmente corrugado (VFC)	Diversos tamaños y orientaciones				
60 ° flujo transversal (XF)					
Aleatorio (RA)	Formas irregulares fabricados de extruido	2-10 (varía para	30-65	80-115	> 94
	Elementos de plástico	productos individuales)	50-80	140-165	> 94
Horizontal (HO)	Las paletas de madera, típicamente	122 × 122 × 4,8	165	46	> 90
	construidos de secoya o madera tratada a presión				

Tabla 10 Características de lechos filtrantes. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)

Teniendo en cuenta que las propiedades más importantes de los filtros percoladores son la superficie específica y el porcentaje de vacíos. Cuanto mayor sea la superficie específica mayor será la cantidad de biopelícula hospedada por unidad de volumen; mientras que el porcentaje de vacíos facilita el flujo de aire, y la evacuación de biomasa desprendida consecuentemente los lechos de medio plástico permiten la aplicación de cargas hidráulicas superiores sin riesgo de inundación (Ramalho, 1983). Algunos fabricantes en su elaboración, entrelazan láminas de cloruro de polivinilo (PVC) lisas u onduladas para formar rectángulos modulares; estas suelen tener superficie corrugada para favorecer el crecimiento de la película biológica y para aumentar el tiempo de detención del líquido en el lecho (Metcalf y Eddy,

1995). Es por este motivo que los medios sintéticos son ahora los más apropiados para desarrollar tratamiento de AR por filtros percoladores, en el recorte 2 se resalta las ventajas de esto medios con respecto a una única desventaja que presenta que es su alto precio.

-  Permiten profundidades del relleno hasta de 12 m.
-  *Puede llegar a cargas hidráulicas elevadas.*
-  Tienen superficies específicas muy altas con respecto al volumen final.
-  *Existe menor riesgo de obstruirse por la acumulación excesiva de biomasa.*
-  Debido a su peso ligero requieren una estructura de soporte más barata.

Recorte 2 Ventajas de medios sintético para un filtro percolador. Adaptado de (Ramalho, 1983)

Como se mencionaba antes un material de lecho filtrante se debe caracterizar por una gran área superficial específica, que no se obstruya con facilidad, además de ser la resistente a la corrosión, y de consecuente su durabilidad. (Metcalf y Eddy, 1995)

Los lechos modulares hechos de lámina de plástico termo-formado son una opción muy adecuada para los mejorar las eficiencias de filtros percoladores debido que soportan altas fuerzas de compresión y tienen la posibilidad de apilarse hasta por 12 m de profundidad, mientras que los lechos de plástico aleatorio, necesitan apoyo lateral de la estructura de empaquetamiento del filtro, lo que limita el filtro a profundidades menores (Jia Zhu, 2016). Sin embargo, resultan más económicos.

En la práctica es recomendable para los medios modulares que los niveles de estas unidades se dispongan ortogonalmente al nivel anterior para optimizar la distribución del líquido (Metcalf y Eddy, 1995).

Jia Zhu (2016) cita un estudio profundo de la comparación de diferentes tipos de lecho filtrante; concluye que los lechos modulares de flujo cruzado son los más eficientes para aplicaciones de tratamiento de nitrificación secundarias, mientras que los lechos de flujo vertical son más apropiados para aplicación de carga elevadas; como se muestra en la tabla 13.

		60 ° flujo cruzado	flujo vertical	Aleatorio	Rock	
Efluente calidad	Carga baja	DBO soluble	5	4	4	3
		TSS	5	3	3	3
		DBO total	5	3	3	3
	alta carga	Nitrificación	5	4	3	1
		DBO soluble	4	5	3	1
		TSS	5	3	2	3
		DBO total	-	-	--	--
	Características de funcionamiento	Retención hidráulica	3	1	4	5
		La transferencia de oxígeno	3	3	3	1
Mojada		3	3	1	4	
Moscas de filtro		4	5	3	1	
Biodegradación		3	5	2	3	
Enchufando		3	5	3	1	
factores cualitativos	Facilidad de instalación	4	4	3	1	
	Ventilación de aire	4	2	3	1	
	La fuerza de medios	4	3	2	5	
	Construcción de la torre	3	3	2	1	
	Altura del papel	4	4	3	1	

Área de superficie de los medios	4	4	4	1
Medios espacio vacío	4	4	4	1
Peso de los medios	4	4	4	1

Calificación: Pesimo:1, Promedio:3, Malo:2, Bueno:4, Mejor:5.

Tabla 11 Comparación de lechos de filtro percolador (CH2MHILL , 1984).

En la construcción de los lechos filtrantes se deben considerar factores como la integridad estructural, un factor importante en el diseño de un filtro percolador para quitar el riesgo a una falla estructural en el sistema.

En 1998 se comunicó sobre una considerable cantidad de unidades de filtros percoladores que sufrieron fallos estructurales durante la década de 1990, de los cuales una mayor parte se atribuyó a diseños que no tuvieron en cuenta la resistencia de carga de los módulos del lecho o a errores en la instalación (Parker, 1998).

Llevar a cabo ensayo estructurales para las unidades modulares es indispensable para asegurar que se cumple con los requisitos de carga durante la vida útil de los lechos filtrantes (Jia Zhu, 2016).

El fallo estructural en estas unidades es resultado de las cargas continuas que provocan deformación a largo plazo, por la fluencia del material, dando cabida a la pérdida de resistencia de los módulos, además como la fluencia se acelera con la temperatura el material plástico debe estar correctamente diseñado para soportar las cargas tanto del mismo peso del lecho, como el de la biomasa y la carga del AR del tiempo de retención hidráulico (Jia Zhu, 2016), que aunque sea corto, es relevante en sistemas y sobre todo por la humedad que absorbe la biomasa.

Por su parte una torre de filtro percolador se debe diseñar nivel por nivel para la carga requerida teniendo como referencia la profundidad de la unidad, puesto que los niveles más bajos soportaran mayores cargas por las unidades modulares que están arriba y por consiguiente requerirán de mayores resistencias a la compresión (Jia Zhu, 2016).

Para dar un óptimo tratamiento al AR, es bien importante la adecuada distribución y humectación de parte superior del filtro debido a que, esta va a repercutir en el flujo homogéneo del líquido hacia la parte inferior de la unidad.

La empresa Brentwood Industries (2016) desarrolla una técnica configurativa para los módulos de soporte del lecho filtrante enfocados al desarrollo de filtros percoladores de más de 4.8 metros de altura de lecho filtrante; desarrolla un concepto de lecho mixto que proporciona altos beneficios de distribución de los lechos filtrantes de flujo cruzado con el bajo potencial de taponamiento de los lechos de flujo vertical.

En la figura 11 se puede apreciar el formato de configuración de este concepto, los módulos de flujo vertical en las secciones inferiores donde las características anti taponamiento más se requieren; y el uso módulos de flujo cruzado en las dos capas superiores para optimizar la distribución y mezcla horizontal del líquido.

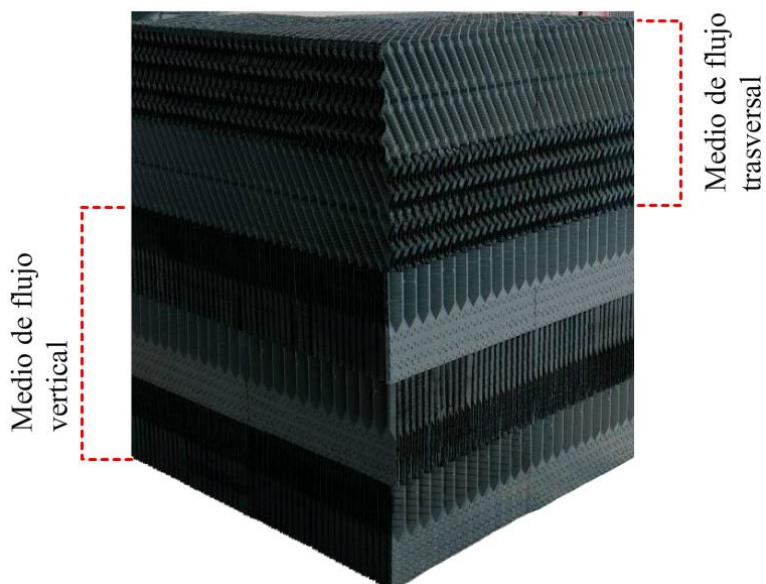


Figura 11 Configuración técnica mixta AccuPac® (Brentwood Industries, 2016).

Este concepto se ha probado a nivel industrial dando resultados satisfactorios como en la EDAR del distrito de Saneamiento de Williamsburg, Virginia; en la figura 12 se puede apreciar una vista más amplia de la configuración en la unidad.

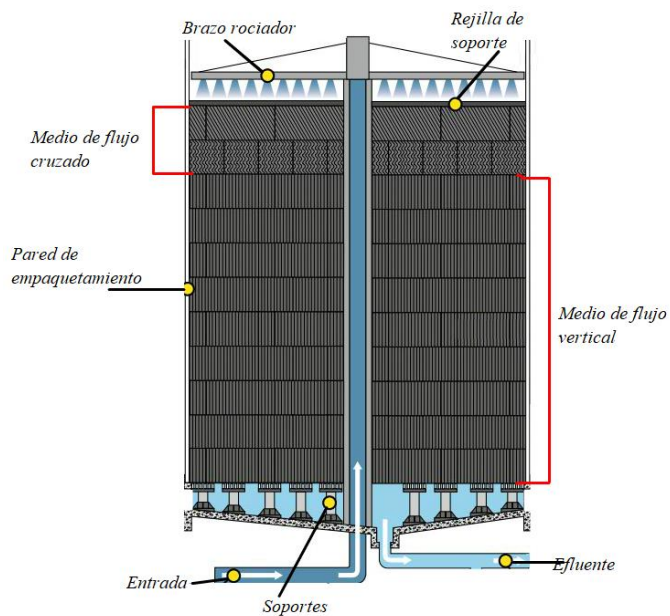


Figura 12 Técnica mixta filtro percolador en torre. (Brentwood Industries, 2016)

Es un concepto técnico que garantiza una adecuada distribución del AR sobre la superficie del filtro debido al medio filtrante de flujo transversal en las dos capas superiores, a su vez que dan garantía de una aireación adecuada, en esta zona donde la DBO es superior; además se reduce el potencial de acumulación de biomasa excesiva por el un mayor esfuerzo cortante del líquido en los módulos de flujo verticales; que además confieren integridad estructural añadida y la mantención de una biopelícula más delgada, optimizando la eliminación del sustrato carbonoso o nitrogenado respectivamente (Brentwood Industries, 2016).

Sin embargo Henrich (2013) propone que “medios de gran canal se pueden ubicar en los niveles superiores para crecimiento heterótrofo y medios de canal pequeño en los niveles inferiores para el crecimiento autótrofo”. El autor resalta que esta configuración reduce el costo de bombeo. En la figura 13 se esquematiza esta configuración.

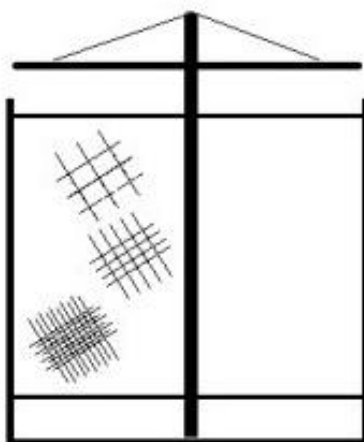


Figura 13 Configuración propuesta para el lecho de soporte de filtro percolador por (C.-D. Henrich, Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology, 2013)

5.4.3 Rejilla del de protección del lecho filtrante

Como la capa superior del lecho filtrante está expuesta a diferentes factores que puede dañar el material como los rayos UV y el tráfico de personal de mantenimiento, para la protección de

estos medios es necesario el uso de rejillas de protección, que son elementos fabricadas en polipropileno, polietileno, o plástico reforzado con fibra de vidrio, diseñados específicamente para la aplicación en AR.

Las rejillas de polipropileno o polietileno son consideradas soluciones económicas para la protección del lecho frente a las que usan refuerzo de fibra de vidrio por el incremento de costo (Jia Zhu, 2016)

Esta tecnología de rejillas modulares entrelazadas proporciona protección en la parte superior del filtro a factores como: la degradación del lecho plástico por radiación ultravioleta, el tráfico de operadores, y además logran amortiguación del impacto hidráulico del esparcimiento del rociador; son paneles moldeados en polipropileno o polietileno de alta densidad capaces de soportar la corrosión maximizando así la vida útil de la rejilla y los medios del lecho filtrante vial libre y antideslizante para el acceso a todo el sistema del rociador (Brentwood Industries, 2011).

La empresa Brentwood Industries ha desarrolla esto paneles de rejilla teniendo en cuenta aspectos como el tiempo de instalación, siendo módulos auto-entrelazables; en la figura 13 se muestra este desarrollo.



Figura 14 Bio-rejilla AccuGrid®. (Brentwood Industries, 2011)

5.4.4 Estructuras de contención y empaquetamiento del filtro

Las estructuras en el filtro se deben construir en función de los lechos filtrantes empleados, los medios de plástico aleatorio y los de material pétreo no son auto portantes lo que implica que requieren apoyo estructural lateral, mientras que los lechos modulares de plástico si lo son y requerirán mínima contención horizontal, solo se hará necesario empaquetadura para los medios soporte (Jia Zhu, 2016).

Las estas estructuras de empaquetamiento pueden ser de material prefabricado o concreto, para lechos auto portantes de fibra de vidrio, acero soldado remachado o madera (Jia Zhu, 2016).

Hay que tener en cuenta que, para permitir el control de la macro-fauna por inundación, estas estructuras deben utilizar paredes impermeabilizadas con refuerzo estructurales lateral que soporte las cargas generado por el llenado del líquido.

Con el advenimiento de los lechos plásticos los filtros no requieren una estructura de retención de agua, sino solo paredes de construcción liviana (Australian Meat Processor Corporation, 2015); en la figura 14 se muestra un tipo de empaquetamiento de filtro tipo malla, en estos casos sería importante tener en cuenta la exposición a la luz del medio filtrante como el posible crecimiento de algas excesivo, sin embargo esta solución permitiría mejores flujo de aireación natural.

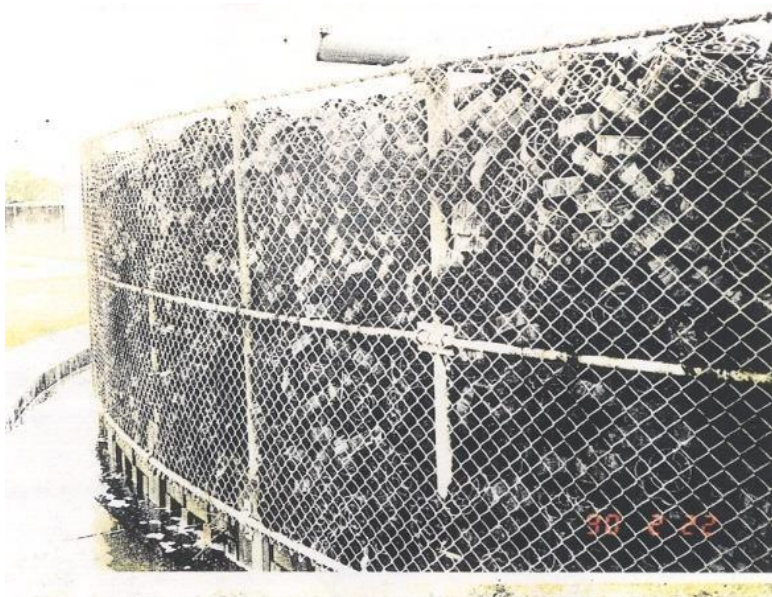


Figura 15 estructura de contención de filtro percolador en malla eslabonada. (Australian Meat Processor Corporation, 2015)

Por otra parte, en noción de reducir costos, en los últimos años se ha desarrollado sistemas de estructurales para los lechos que constan de puntales de plástico y rejillas reforzadas con fibra de vidrio como se aprecia en la figura 15.

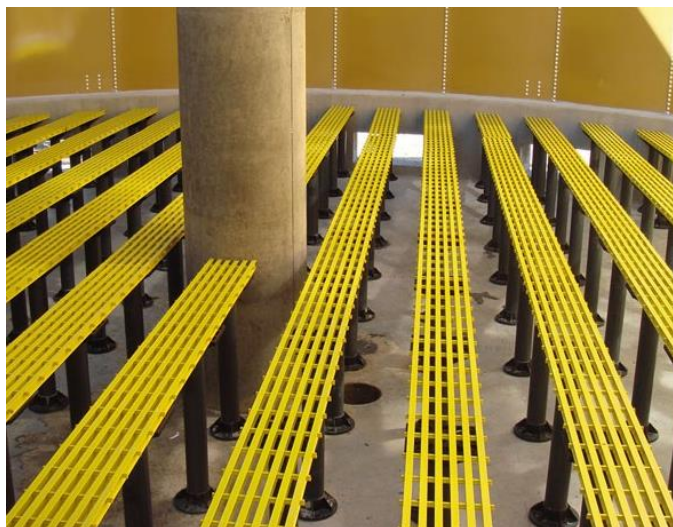


Figura 16 Sistema de soportes y del lecho filtrante apuntalado

Este sistema de soporte permite un mejor drenaje del líquido y aumenta la capacidad de ventilación del lecho.

Para llevar a cabo aireación forzada siempre se requiere una construcción de contención o empaquetamiento impermeabilizado, de lo contrario el flujo de aire escapara por las costuras estructurales a causa de la presión del aire generado (Jia Zhu, 2016).

5.5.5 Drenaje

El sistema de drenaje inferior permite conducir el efluente tratado por una serie de canales de extracción hacia el sistema de clarificado para retirar el limo biológico desprendido; también se proporciona una cámara de sobre-presión que permite el paso de aire a través del lecho filtrante, garantizando el oxígeno necesario para el metabolismo aerobio. (C.P. Leslie Grady, 2011)

Por otro lado los canales de extracción del efluente deben ser diseñados de modo que se obtenga una velocidad mínima de flujo de 0.6 m/s (Metcalf y Eddy, 1995)

Es aconsejable que los drenajes inferiores pueden estar abiertos en ambos extremos para facilitar las labores de inspección y mantenimiento en caso de que estén obstaculizados; también

estas aberturas son las encargadas de hacer funcionar la ventilación del filtro, precisando del oxígeno que necesitan los microorganismos del limo biológico.

Estos soporte para los lechos de medio de plástico consisten en una serie viguetas y apoyos, o una parrilla estructural de metal (Metcalf y Eddy, 1995).

El lecho del filtro percolador es elevado sobre el piso de concreto del sistema con una serie de soporte resistente a la corrosión, pueden ser adaptado en altura y esta construidos para maximizar la aireación y drenaje del líquido (Brentwood Industries, Inc., 2014).

Metcalf y Eddy (1995) recomienda que “estos sistemas de drenaje se deban diseñar de manera que posibiliten una posterior acoplamiento de un sistema de ventilación forzada, en cuestión de que se produzcan cambios en el funcionamiento del sistema” (p.707)

5.5.6 Tanque clarificador

El efluente del filtro percolador se conduce a un tanque de sedimentación en el que se separa la biopelícula desprendida del líquido; con el objetivo de producir de un efluente clarificado. El diseño de estos clarificadores es semejante al de los sedimentadores primario, solo que la carga superficial se basa en el caudal de la planta más el caudal recirculado (Metcalf y Eddy, 1995). El fango extraído del clarificador de filtros percoladores se conduce directamente al proceso de tratamiento de fangos.

5.5 Preparación del influente para el filtro percolador

La entrada de líquido a filtro percolador requiere un tratamiento primario adecuado, para garantizar su buen funcionamiento, hay que resaltar que el cribado fino no debe utilizarse para los lechos filtrantes de roca, aleatorios, y de flujo cruzado debido al alto potencial de estos al taponamiento; pero si un clarificador primario que debería permitir la remoción de al menos 55% del total de sólidos en suspensión y 25-30% de la DBO5 (Jia Zhu, 2016).

Por otra parte la precipitación química para remover fósforo en un clarificador primario usa sistemas de filtros percoladores con un límite estrictos de descarga de fósforo, además con este proceso el desempeño de estos sistemas aumenta (Jia Zhu, 2016).

5.6 Efecto de la temperatura y pH

El efecto de la temperatura sobre el rendimiento de un filtro percolador para la remoción de DBO se calcula como se muestra en la tabla 12.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
T: Temperatura del líquido, °C	
θ : Constante de corrección de temperatura ¹	
K _T : Constante de velocidad cinética a la temperatura T	$k_T = k_{20}\theta^{T-20}$
k ₂₀ : Constante de velocidad cinética en 20 °C	

Tabla 12 Rendimiento del filtro para DBO. (Onda K, 1968). ¹Aceptado normalmente como 1.035; en rango de 1,00-1,049, reportados en (WEF, 2000).

El pH como en otros procesos de tratamiento de AR, debe estar entre 6.5 y 8.5 con la razón de obtener un rendimiento adecuado en el filtro (Jia Zhu, 2016).

Para aguas residuales industriales de alta carga, una recirculación con relación de diez o más, es posible permitirse para lograr una óptima humectación y limpieza del lecho filtrante (Jia Zhu, 2016).

5.7 Roseo y Dosificación de caudal

Existen sistemas de roseo para filtros percoladores de vía fija que constan de una serie de boquillas rociadoras ubicadas en los vértices de una matriz de tubería, formada con triángulos, se consigue un rociado al hacer variar sistemáticamente la presión sobre boquillas para que el agua rociada se distribuya a distancia variable conforme ocurra un descenso de la carga, usando dos tanques que se llenan y se vacían mediante sifones automáticos de forma alternada (la carga varía entre 2.4 y 3 m); sin embargo los sistemas de distribución de boquilla fija presentan dificultades de mantenimiento (Australian Meat Processor Corporation, 2015).

Por esta razón los sistemas de roceo rotatorios son ampliamente más usados, dado su fiabilidad y facilidad de mantenimiento, están contruidos por dos o más brazos huecos acoplados sobre un apoyo central, que giran en un plano horizontal, y cuentan con una serie de boquillas que distribuyen el AR sobre el lecho filtrante; además su rotación puede estar ejercida por la fuerza hidráulica de la misma agua o por un sistema de propulsión eléctrico (Metcalf y Eddy, 1995).

La sección transversal los brazos rociadores puede ser constante en unidades de tratamiento pequeñas (Metcalf y Eddy, 1995), sin embargo la aplicación uniforme del caudal sobre el lecho de soporte es importante para garantizar la humectación homogénea y consistente de toda la biopelícula adherida al medio (C.P. Leslie Grady, 2011). La calidad de la dosificación permitirá indirectamente un buen procesamiento de las altas cargas, además de compensar variaciones de caudal que sean requeridas para satisfacer la humectación a las diferentes distancias desde eje, para su diseño y construcción es necesario calibrar tanto las distancias entre boquillas como el caudal de las mismas a lo largo del brazo rociador (Udo Wiesmann, 2007).

Es una cuestión de geometría e hidráulica debido a que el brazo rociador debe distribuir más caudal en sus extremos porque abarca más superficie, como también garantizar un esparcimiento adecuado en la parte cercana al centro del sistema; como lo afirma Metcalf y Eddy (1995) “el espaciado de las boquillas debe ser irregular para asegurar un mayor caudal por unidad de longitud en los radios más alejados que en la zona céntrica, es decir debe ser proporcional a la distancia al centro del filtro”.

Conseguir la mejor eficiencia en filtro el líquido debe ser distribuido lo más homogéneamente posible para evitar la canalización y la mala mezcla horizontal (Wik, 2004).

El sistema de roceo también se utiliza para el control de la frecuencia de dosificación, lo que incide en el rendimiento del proceso. (C.P. Leslie Grady, 2011). Udo Wiesmann (2007) menciona que “la variación en la presión disponible en los tubos de los brazos giratorios debe ser considerado como una función de la velocidad de flujo” (p.152).

Si se considera otras opciones existe una configuración de orificios que se usan en los distribuidores giratorios de propulsión hidrodinámica para reducir la velocidad de giro y conservar una tasa de dosificación determinada, estos se denominan orificios de marcha atrás (Jia Zhu, 2016). Como su nombre lo indica están ubicados con flujo inverso al giro del brazo rotatorio y puede aplicarse en caso especiales donde la fuerza de presión disponible es excesiva para la adecuada homogenización del medio.

Mientras que si se usa propulsión mecánica la velocidad de giro del brazo rociador es posible controlarla sin importar el caudal de la planta, permitiendo el mejoramiento de control de la dosificación.

La disminución de velocidad de giro para lograr una alta dosificación en un momento dado en el mecanismo de los brazos, es concretamente ventajosa cuando los sistemas gestionan elevadas

cargas orgánicas (Jia Zhu, 2016). Esta posibilidad es usada por ejemplo para eliminar vectores como los caracoles de filtro. Los estudios muestran que disminuir la velocidad de giro permite brindar una mayor eficiencia de humectación, y controlar mejor la biopelícula; reduciendo los olores y controlando la macro fauna y el olor (Albertson OE D. G., Analysis of process factors controlling performance of plastic biomedica, 1984) y (Albertson OE D. G., 1995). Por otro lado, se sugiere que una velocidad de dosificación mayor permite reducir la tasa de recirculación a determinado nivel, reduciendo los costos de energía en las bombas (WEF , 2000).

La velocidad de giro, cambia en razón de la carga orgánica y el caudal se determina como se muestra en la tabla 13.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
N: tasa de giro distribuidor, rpm.	
Q_T : carga hidráulica total, $m^3/m^2 \cdot h = Q + Q_r$.	
Q: carga hidráulica del agua residual afluyente, $m^3/m^2 \cdot h$.	$n = \frac{1,66(Q_T)}{(A)(DR)}$
Q_r : carga hidráulica del caudal recirculado, $m^3/m^2 \cdot h$.	
A: número de brazos.	
DR: Caudal de dosificación, cm/pass del brazo	

Tabla 13 Velocidad de rotación del distribuidor. (Metcalf y Eddy, 1995)

Es importante garantizar una distancia adecuada para el flujo libre de roce, no puede ser demasiado alta porque puede generar erosión en la parte alta de la biopelícula ni demasiado baja para una adecuada distribución, Metcalf y Eddy (1995) recomienda que el espacio libre: “entre la parte inferior del distribuidor y la superficie del lecho filtrante debe estar entre 15 y 22.5 cm” (p.704).

Configurando un carga hidráulica fija para el sistema, pero ralentizando la velocidad de rociador giratorio se puede aumentar la tasa de dosificación (Jia Zhu, 2016).

Se ha comprobado que las plantas que adoptan controles en la frecuencia de dosificación logran mejor y más estables desempeños (WEF , 2000).

Llevar a cabo diseños con velocidades de dosificación elevadas se recomiendan para altas cargas, debido a que estas producen crecimiento excesivo de biopelícula en los filtros, es por esto que la alta dosificación permite la reducción del grosor del biomasa y por consecuente posibles taponamientos y otras cuestiones operacionales (Jia Zhu, 2016).

Sin embargo, si se va adquirir un determinado brazo rociador, se debe tener en cuenta las características como la robustez del brazo, el fácil mantenimiento, la capacidad de soportar variaciones de caudal conservando la velocidad de giro apropiada, y la resistencia a la corrosión del brazo completo. (Metcalf y Eddy, 1995)

Dosificación de caudal

La dosificación de caudal, para optimizar el rendimiento de los filtros, deberá asegurar de forma continua y uniforme continua el flujo descrito en recorte 4.



El crecimiento de la biomasa



El desprendimiento del exceso de biomasa en funcion de la carga organica

Recorte 3 Requisitos de rendimiento de los filtros percoladores. Adaptado de (Ramalho, 1983)

Según Metcalf y Eddy (1995) el caudal dosificado “es una funcionamiento de la velocidad de rotación del distribuidor o de la duración de las fases de funcionamiento y parada de un dosificador fijo” (p.703). Esta velocidad de rotación para un distribuidor circular se puede hallar utilizando la ecuación de la tabla 14.

<i>Ecuación</i>	<i>Componentes</i>
$n = \frac{1.66Q_t}{A * DR}$	<p>n: velocidad de rotación del distribuidor, r.p.m.</p> <p>QT: carga hidráulica total aplicada, $m^3/m^2 \cdot h = Q + Q_r$.</p> <p>Q: carga hidráulica del agua residual afluyente, $m^3/m^2 \cdot h$.</p> <p>Qr: carga hidráulica del caudal recirculado, $m^3/m^2 \cdot h$.</p> <p>A: número de brazos del distribuidor.</p> <p>DR: caudal de dosificación, em/paso del brazo distribuidor.</p>

Tabla 14 Dosificación de caudal de filtro percolador. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995)

La uniformidad y la consistencia de distribución de AR es fundamental para una operación exitosa de un filtro percolador. Una distribución uniforme es posible evaluarla por “prueba de bandeja” en el que se colecta la AR durante una giro del brazo rociador mediante bandejas en diversas zonas radiales de la parte superior del filtro (Jia Zhu, 2016).

Jia Zhu (2016) “no recomienda el uso de boquillas fijas para las nuevas construcciones de filtros percoladores” (p.330).

5.8 Velocidad de dosificación

La velocidad de dosificación (DR) es la profundidad del agua suministrada en la parte superior del lecho filtrante en cada pasada del brazo rociador; la tabla 15 muestra cómo se calcula:

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
DR: Tasa de dosificación mm / pass	
THL: Carga hidráulica con recirculación, m ³ / m ² * día	
<i>a</i> : número de brazos del distribuidor	$DR = \frac{(THL)(1,000 \frac{mm}{m})}{(a)(\omega)(1,440 \frac{min}{day})}$
<i>ω</i> : Distribuidor velocidad de rotación, rpm	

Tabla 15 Velocidad de dosificación. (Jia Zhu, 2016)

5.9 Aireación

La aireación en un sistema de filtro percolador puede ser proporcionada de manera natural o por medios mecánicos. En los sistemas con aireación natural se lleva a cabo por la diferencia de densidad del aire bajo y fuera del filtro; esto resulta en un flujo continuo de aire a través del lecho filtrante, las diferencias de densidad, surgen porque el aire bajo del filtro ligeramente se satura de vapor de agua y alcanza la temperatura del agua residual aplicada (C.P. Leslie Grady, 2011). En consecuencia, la circulación de aire en el implica la diferencia de densidad generada que a su vez depende de la temperatura y la humedad del ambiente.

Una desventaja de la aireación natural es que pueden ocurrir las condiciones de densidad neutra, causando la ausencia de flujo de aire a través del filtro y desarrollándose condiciones anaerobias (C.P. Leslie Grady, 2011)

Con la aireación forzada, el aire es distribuido homogéneamente a través del lecho con el fin de asegurar la oxigenación de todo el sistema (C.P. Leslie Grady, 2011), usando esta variante estos filtros tiene la posibilidad de ser diseñados con una zona aeróbica en la parte superior y una zona anoxicas, con el propósito de promover la nitrificación en la parte inferior (Davis, 2010).

Uno de los problemas a estudiar es la determinación de la cantidad de materia orgánica que se puede aplicar al filtro (Metcalf y Eddy, 1995).

Si el agua residual posee una temperatura por debajo a la del ambiente, el aire de los poros será frío y el flujo de aire se producirá en sentido descendente, mientras que el aire de menor temperatura que del agua residual, el flujo será ascendente (Metcalf y Eddy, 1995).

La ventilación es una altura de presión consecuentemente de la diferencia de temperaturas; se puede determinar mediante las ecuaciones en la tabla 16:

<i>Parámetro</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Componentes</i>
Ventilacion natural del aire	$D_{aire} = 3.53 * \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h}\right) * Z$	Dairc: ventilación natural del aire, mm de agua. Tc: temperatura menor, °K T: temperatura mayor, °K Z: altura del filtro (SI)
Temperatura media	$T = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$	T: temperatura mayor, °K. T2: temperatura menor, °K.

Figura 17 Ventilación natural de aire y temperatura media. Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995).

La aireación de flujo natural es el fundamento del filtro percolador, donde el aire es impulsado por la diferencia de temperatura entre el aire en el lecho filtrante y ambiente exterior. En la tabla 16 se muestra los conceptos matemáticos de flujo de aire natural de conducción de aire.

<i>Términos</i>	<i>Ecuaciones</i>
D_{Aire} : Flujo de aire natural de conducción de aire, mm de agua	
T_c : Temperatura del aire frío, K	
T_h : Temperatura del aire caliente, K	$D_{\text{Air}} = 353 \left(\frac{1}{T_c - \frac{1}{T_h}} \right) D$
T_m : Media logarítmica de temperatura del aire dentro de un filtro, K	
D : Profundidad del medio, m	$T_m = \frac{T_1 - T_2}{\ln(T_1/T_2)}$
T_1 : Temperatura más alta del aire dentro del filtro, K	
T_2 : Temperatura más baja dentro del filtro, K	

Tabla 16 Flujo de aire natural de conducción de aire. (Jia Zhu, 2016).

La ventilación forzada es una medida de bajo costo para proporcionar filtros percoladores fiables y flujos de aire controlados; es recomendable para filtros percoladores de alta carga y filtros nitrificantes, en situaciones donde los diferenciales de temperatura no generen adecuado flujo de aire (Albertson OE O. R., 1988).

Los estudios realizados por la Dow Chemical Company sugieren que se requiere al menos una eficiencia de transferencia de 5% , o el suministro de 20 kg de oxígeno por kg de demanda de oxígeno para garantizar una buena oxigenación del sistema (Jia Zhu, 2016). En la tabla 16 se muestra Requisitos de oxígeno para la remoción de DBO y remoción de DBO combinado con nitrificación.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
R_o : Suministro de oxígeno, kg O_2 / kg DBO_5	<i>Oxígeno para remoción de DBO</i> $R_o = \left(\frac{20\text{kg}}{\text{kg}}\right) [0.8e^{-90LR} + 1.2e^{-0.170LR}]PF$
OLR: Carga de DBO , en kg / m ³ • día	
N_{OX}/DBO_5 : relación de nitrógeno ¹ oxidado de entrada DBO_5	<i>Oxígeno para remoción de DBO y nitrificación</i> $R_o = \left(\frac{40\text{kg}}{\text{kg}}\right) \left[0.8e^{-90LR} + 1.2e^{-0.170LR} + 4.6\frac{N_{OX}}{BOD_5}\right]PF$
N_{OX} : Nitrógeno oxidado	
DBO_5 : Entrada DBO_5 , mg / L	
PF : factor de pico ²	

*Tabla 17 Requisitos de oxígeno para la remoción de DBO y remoción de DBO combinado con nitrificación
¹calculado teniendo en cuenta la entrada y salida de N y su rendimiento Neto. Rendimiento neto de nitrógeno
orgánico: 0.07 ²típicamente 1,3 para grandes plantas y 1,75 para las plantas pequeñas (WEF , 2000).*

La tasa de aireación se basa en el requerimiento de oxígeno AR_{20} , pero el índice de aireación real necesita corregirse en función a la temperatura AR_T ; además si la temperatura de las AR es mayor que 20 °C se requiere una corrección adicional $AR_{T>20}$; como se muestran en la tabla 17; y en la tabla 18 para la ecuación para la caída de presión a través de los medios plásticos.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
AR_{20} : Tasa de flujo de aire a 20 C y 1.0 atm, m ³ / min	$AR_{20} = \frac{(R_o)(Q_{in})(S_o)(3.5N \text{ m}^3/\text{kg oxygen})}{\left(\frac{1,000\text{g}}{\text{kg}}\right)\left(1,440\frac{\text{min}}{\text{day}}\right)}$
Q_{in} : Flujo de aguas residuales, m ³ / día	$AR_T = AR_{20} \left(\frac{273 + T_0}{273}\right)$
S_o : Concentración de entrada de BOD_5 , g/m ³	$AR_{T>20} = AR_T + AR_T(1\%)(T - 20)$

AR_T : flujo de aire real corregido por temperatura,

m³/min

T_0 : Temperatura ambiente, °C

$AR_{T>20}$: Flujo de aire real a temperatura mayor

que 20 °C

Tabla 18 Calculo de tasa de aireación; indice de aireacion corregido y correccion adicional para temepaturas mayores a 20 °C. (Jia Zhu, 2016)

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
ΔP : pérdida de carga total, kPa	
V : velocidad del aire superficial, m / s	$\Delta P = N \left(\frac{v^2}{2g} \right)$
g : aceleración de la gravedad, 9,8 m / s ²	
N : la pérdida de carga en la torre por resistencia	

Tabla 19 Caída de presión a través de medios plásticos. (Jia Zhu, 2016).

5.10 Recirculación

A lo largo de los años se ha comprobado que la recirculación mejoraba la eficiencia y el rendimiento de los filtros de materiales de piedra, en estudios más recientes, se ha corroborado que las ventajas de la recirculación son principalmente, al mejor lavado por arrastre y al riego del filtro (Metcalf y Eddy, 1995).

Davis (2010) define la recirculación como: “un elemento importante en el diseño de filtros de percoladores, que consiste en el retorno de una parte del efluente para que vuelva a fluir a través del filtro” (c.24-p.10).

El efluente del filtro al ser recirculado se mezcla con las aguas residuales entrantes antes de pasar filtro percolador y permite la dilución de las cargas hidráulicas y orgánicas que va a tratarse en el sistema (C.P. Leslie Grady, 2011).







En la práctica la fracción de líquido recirculado en el sistema se colecta en la salida del tanque clarificador. Por otro lado, el operador debe realizar comprobaciones a la tasa de recirculación para cerciorarse que cumpla con las especificaciones de diseño, dado a que si la velocidad es mayor se generara sobrecarga hidráulica y si es menor se presentara una subcarga hidráulica, generando los correspondientes efectos negativos en el funcionamiento del filtro (Spellman, 2004).

La configuración se define con relación de recirculación entre caudal de diseño y el caudal retornado al filtro. Con la relación de circulación se debe tener cuidado porque puede o no mejorar la eficiencia del tratamiento; si se diluye demasiado se pierde la capacidad de mejorar la eficiencia (Davis, 2010). Lin (2007) menciona que: “esta relación de retorno de caudal a la entrada del filtro debe mantenerse dentro del rango de 0 a 4 unidades” (p.698).

La recirculación es un factor de control de la carga orgánica y la carga hidráulica en la entrada de un filtro, lo cual es muy importante porque por ejemplo; Mediante el adecuado control de la carga hidráulica, se ha conseguido mantener, de forma uniforme, una capa de biomasa más fina que resulta en una mejor eficiencia (Metcalf y Eddy, 1995).

La recirculación aumenta la velocidad de humectación del lecho; además el efluente recirculado permite un mejor rendimiento de oxígeno disuelto en filtro y ayuda a controlar el espesor de la biopelícula (Jia Zhu, 2016).

En ocasiones el caudal de planta por sí solo no puede lograr una adecuada humectación del medio, en esos casos la recirculación se diseña para alcanzar la velocidad de carga hidráulica adecuada en el filtro. La velocidad de carga hidráulica recomendada por Dow Chemical Company es $0,5 \text{ L} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ con el fin de lograr un máximo rendimiento de remoción de DBO5 (WEF, 2000). En el recorte 4 se presentan otras razones por las que debe llevarse a cabo la operación de recirculación:

-  Para aumentar la eficiencia de contacto con el material biológico activo.
-  *Para amortiguar las variaciones de cargas durante el día, dado a que la carga del líquido recirculado es inferior a la de las AR entrantes generando dilución y manteniendo las cargas hidráulicas y orgánicas más uniformes.*
-  Reducción de la población de moscas de filtro.
-  *Para elevar la OD del afluente.*
-  Para hidratar el limo biológico continuamente y evitar la muerte de los microorganismos durante los periodos nocturnos cuando los caudales disminuyen.
-  *Adelgazamiento de la capa de limo biológico mejorando la eficiencia del tratamiento; y reducción de la posibilidad de obstrucción del filtro.*

Recorte 4 Razones de la operación de recirculación. Adaptado de (C.P. Leslie Grady, 2011)

La recirculación se debe tener muy en cuenta, cuando se trabaja con lechos de medio plástico, estos podrían tener un tiempo de retención hidráulico bajo que haría necesario asegurarse de aportar una mejor humectación para mantener a los microorganismos en

buena forma, lo que es indispensable en la horas de bajo caudal de afluente (Davis, 2010). Metcalf y Eddy (1995) menciona que: “ los medios plásticos habituales necesitan un caudal específico de riego por unidad de área, enfocado para favorecer el desarrollo de la capa biológica a lo largo de la profundidad del filtro,” (p.473), Indicando de esta manera una necesidad de hacer recirculación para mantener la humedad adecuada para el medio específico que se esté implementando.

En la figura 17 se representan las configuraciones más comunes de procesos de percolado: para un sistema de filtro único trabajando sin recirculado del efluente (a). Ramalho (1983) menciona que: “cuando se lleva a cabo recirculado es para obtener una calidad mayor o bien si la DBO del agua residual está por encima de 500 mg/l”.

Para una filtración doble alternativa (b). El primer filtro es responsable de la mayor parte de la eliminación de la DBO, el segundo sirve para mejorar la calidad del efluente, lo que conlleva a que la mayor parte del crecimiento de limo ocurra en el primer filtro, este debe manejar de manera cíclica alternando el inicio de percolador entre los dos (Ramalho, 1983). En la parte b de la figura indicándose con la línea discontinua. Según el autor de esta forma se controla el espesor de la biopelícula en las dos unidades en el lecho de una manera sencilla, logrando así la obtención de un tratamiento de más alta calidad. Y para filtración en dos etapas (c). El primer filtro es grueso, relleno normalmente con material sintético y el segundo filtro más delgado actúa como sistema de mejora del efluente, donde el crecimiento de biopelícula es menor (Ramalho, 1983).

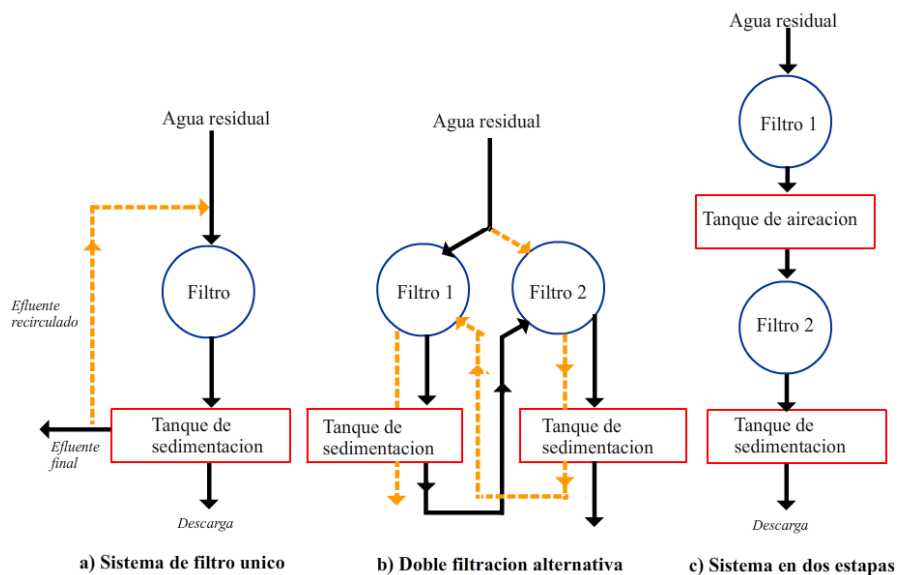


Figura 18 Sistemas de filtración por percolación. Adaptado de (Ramalho, 1983)

Además con este sistema de una o varias etapas es posible muchas formas de recirculación, luego de pasar a través de los tanques de clarificado o sedimentación, la figura 18 y 19 muestra modelos de recirculación usados para filtros percoladores de una y dos etapas respectivamente. (Ramalho, 1983).

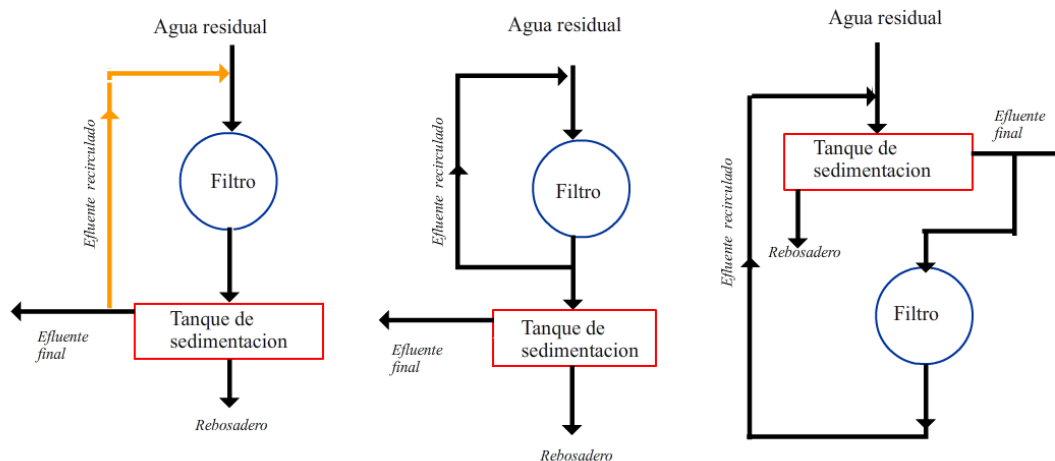


Figura 19 Filtración de una sola etapa con recirculación. Adaptado de (Ramalho, 1983)

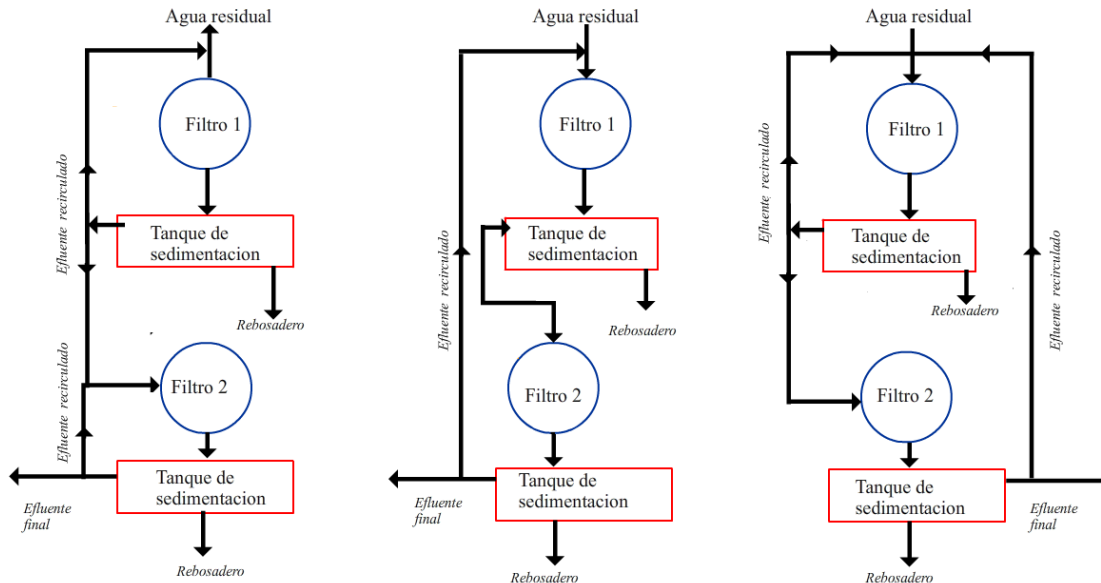


Figura 20 Filtración en dos etapas con recirculación. Adaptado de (Ramalho, 1983)

En la figura se representa otras configuraciones de recirculación según (Spellman, 2004). (a) una sola etapa, (b) dos etapas.

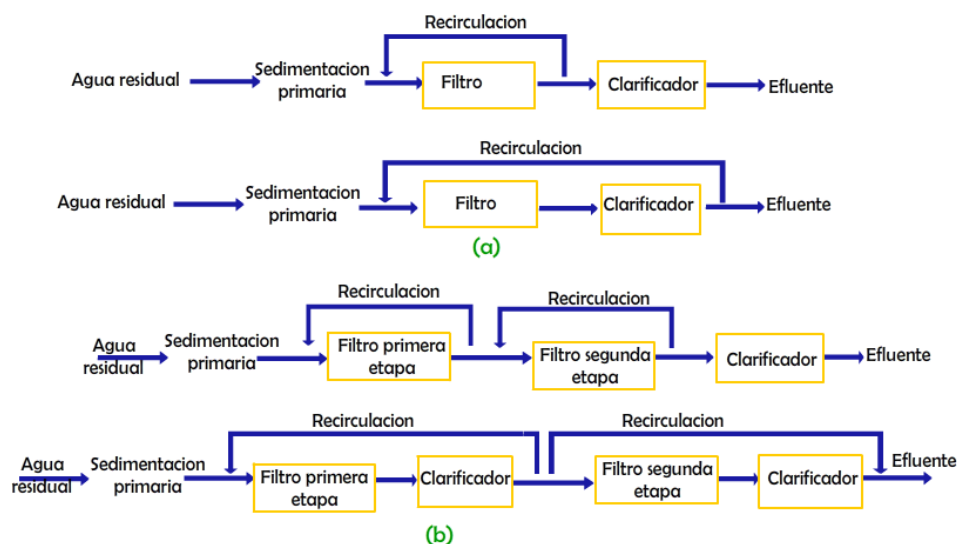


Figura 21 Configuración de flujo de filtro percolador con distintos modos de recirculación. Adaptado de (Spellman, 2004)

Para las operaciones de lavado los distribuidores mecánicos permiten una mayor versatilidad en la velocidades de dosificación durante la operación de limpiado (Jia Zhu, 2016).

El control de espesor de biopelícula es un aspecto importante en los filtros percoladores y más cuando se tratan altas cargas orgánicas (Jia Zhu, 2016), se recomienda “llevar a cabo una operación periódica de lavado a baja velocidad de giro de rociador, esta puede realizarse una vez al día durante una hora” (WEF, 2007)

5.11 Vectores

Factores como el flujo obstruido de las boquillas o los brazos pueden crear problemas con la moscas (Australian Meat Processor Corporation, 2015)

Las larvas de moscas en los filtros de nitrificación se pueden remediar usando la estrategia de carga muy intermitente con cambio de flujo se ceros a máximo. (Wik, 2004).

La contribución de la población de hongos es significativa a pH bajos, porque ayudan a la estabilización del AR, sin embargo también el crecimiento excesivo contribuirá al taponamiento del filtro limitando el flujo de aireación (Metcalf y Eddy, 1995).

Las algas que se desarrollan en los filtros solo prosperan en la parte superior de estos para añadir oxigenación al AR que está fluyendo durante las horas de luz, sin embargo pueden originar el taponamiento de la superficie filtrante, que conduce a la producción de olores (Metcalf y Eddy, 1995). El apacentamiento de larvas, caracoles y gusanos puede disminuir considerable la capacidad de los filtros (Timpany y Harrison 1989). (*Harrison T. P., 1989*).

Metcalf y Eddy (1995) describe que “la población de gusanos, insectos y caracoles se alimentan con la capa biológica del filtro, ayudando a conservar la biopelícula en estado crecimiento” y además que “la macro fauna no es tan usual en los filtros de alta carga” y menciona que “la caracoles son particularmente problemáticos en los filtros de nitrificación, pueden llegar a consumir la mayoría del crecimiento de la biopelícula nitrificantes” (p.463). La macro fauna de caracoles pueden ser controlada por lavado del filtro, otra solución comprobada solo requerirá elevar el pH de las AR por cerca de diez minutos conllevando a un aumento de concentración de amoníaco libre que es agente tóxico para esta especie (Jia Zhu, 2016).

5.12 Factores de operaciones en el rendimiento

WEF (2007) resalta que las variables de control de proceso para filtros de goteo incluyen: los patrones de recirculación, operación en serie o en paralelo de las unidades, las velocidades de distribución y recirculación para diluir la fuerza de las AR, aumentar la velocidad de carga

hidráulica para reducir los vectores del filtro y mantener la humectación durante flujos los bajos; como también el desprendimiento de biomasa por esfuerzo cortante del líquido.

Para mejorar el rendimiento del filtro percolador se requiere un mantenimiento y control adecuado a los procesos de tratamiento que estén asociados a este sistema, cuestiones como la operación y mantenimiento del tratamiento primario para lograr la remoción de sólidos suspendidos y reducir la DBO del líquido.

El despejado adecuado de los sólidos acumulados, mantenimiento del equipo mecánico, y el mantenimiento de los procedimientos de productos químicos aplicados para conservar un óptimo rendimiento; como también el mantenimiento y operación de clarificadores secundarios y eliminación de lodos (Jia Zhu, 2016).

Los estudios demuestran que el espesor de la crecimiento biológico se correlaciona directamente con la carga orgánica aplicada, es decir mayores cargas aumentara el grosor de la capa biológica (Australian Meat Processor Corporation, 2015). Entonces para orgánicas altas habrá la necesidad de reducir la carga orgánica aumentando la recirculación (EPA, 2000) Corbitt (1999) dice que para tratamiento de alta tasa o desbaste, se necesita aumentar la carga hidráulica que removerá el material desprendido y evitara condiciones anoxicas por obstrucción en el lecho. Canter (2010) apoya que el aumento de la tasa de dosificación por unidad de superficie, a causar un desprendimiento más consistente y uniforme del exceso de biomasa.

Otra necesidad de operación que requiere prioridad es la energía de bombeo para la operación de recirculación (C.-D. Henrich, Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology, 2013). Por otra parte, el adecuado registro de datos sobre

características del AR entrante para gestionar adecuadamente problemas imprevistos que se presenten en el sistema.

5.12.1 Control de olores

El olor desprendido de un filtro percolador es primordialmente causado por el desarrollo de condiciones anaeróbicas en el lecho, resultado de cargas orgánicas muy altas, alto desarrollo de macro fauna, o aumento excesivo de biopelícula que generan fallos en el flujo de aireación y/o obstrucciones en el drenaje; por otra parte, puede ser razón de una inadecuada clarificación primaria o captación inapropiada del efluente para recirculación (Jia Zhu, 2016).

Para solucionar estos problemas se debe actuar según corresponda si razón de carga excesiva, reducir la carga aumentando la remoción de DBO en las unidades de tratamiento de aguas arriba (Jia Zhu, 2016), o reconfigurando la relación de recirculación aplicada.

Si es razón del de oxigenación se debería hacer una comprobación del sistema de aireación, tal que este optimizado el flujo de aire, además se puede probar con el aumento de la velocidad de carga hidráulica generando lavado por elevada dosificación o la limpieza de los canales del efluente (Jia Zhu, 2016).

5.13 Vida útil del lecho filtrante

Cuando los lechos plásticos se acercan al final de su período útil que puede variar entre 20 y 30 años (Jia Zhu, 2016), es importante hacer planes para el sustituirlos a fin de evitar un fallo estructural de los mismos (Harrison J. , 2013); para lo cual se debe considerar factores como, si el rendimiento la unidad ha empezado a disminuir durante un largo periodo y se descartan otras posibles causas es indicador de taponamiento por fallas parciales del lecho, resultando en la disminución del área superficial y la aireación del sistema, y la disminución tratamiento; por otro

lado, también, si el desagüe irregular en parte inferior del filtro puede indicar el taponamiento del lecho filtrante (Jia Zhu, 2016).

5.14 Métodos de diseño para la remoción de la DBO en filtros percoladores.

Los métodos de diseño se basan en conceptos de equilibrio empíricos, semi-empíricos, y de masas; formulados por los investigadores para desarrollar modelos de correlación entre los datos de operación y los parámetros de diseño de los filtros percoladores (Lin, 2007).

5.14.1 Modelo NRC national research council

Es una ecuación formulada por el consejo nacional de investigación de estados unidos específicamente para filtros percoladores con lecho de soporte de material de piedra con una o varias fases y variadas relaciones de recirculación (Metcalf y Eddy, 1995), en las tablas 19, 20 se describe matemáticamente el modelo para la primera y segunda etapa del sistema respectivamente.

<i>Ecuación</i>	<i>Componentes</i>
$E_1 = \frac{100}{1 + 0.4425 \sqrt{\frac{W}{VF}}}$	<p>E 1: rendimiento de la eliminación de la DBO a 20 °C, incluyendo efectos de recirculación y sedimentación, [porcentaje]</p> <p>W: DBO suministrada, kg/día</p> <p>V: volumen lecho filtrante.</p> <p>F: factor recirculación.</p>
Rendimiento	

$$F = \frac{1 + R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2}$$

R: tasa recirculación, Q_r/Q .

Q_r: caudal recirculación.

Factor recirculación

Q: caudal agua residual.

Tabla 20 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, etapa inicial. Tomado de (Metcalf y Eddy, 1995).

El factor de recirculación trata de la media de veces que circula por el filtro la materia orgánica del afluente, y el término $R/10$ tiene en cuenta la disminución de la materia orgánica a medida que aumenta el número de pasadas a través del sistema (Metcalf y Eddy, 1995).

Ecuación

Componentes

$$E_1 = \frac{100}{1 + \frac{0.4425}{1 - E_1} \sqrt{\frac{W'}{VF}}}$$

E 2: rendimiento de eliminación DBO a 20 °C en filtro

secundario, teniendo en cuenta efecto de sedimentación y de recirculación [porcentaje]

E 1: fracción DBO removida por filtro de la primera etapa.

W': DBO entrante al filtro de la segunda etapa.

Tabla 21 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, etapa secundaria. Tomado de (Metcalf y Eddy, 1995).

Dos de los modelos más frecuentemente usados para lechos filtrantes de plástico son los propuestos por Eckenfelder, y Germain y Schultz (Metcalf y Eddy, 1995).

5.14.2 Modelo de Eckenfelder

El modelo de Eckenfelder se presenta en la tabla 21

<i>Ecuación</i>	<i>Componentes</i>
$\frac{S_e}{S_i} = \exp[-KS_a^m D(Q_v)^{-n}]$	Se: DBO5 total salida del filtro sedimentado, [mg/l].
	Si: DBO5 total de entrada, [mg/l]
$S_a = \frac{A_s}{V}$	K: constante de velocidad de reacción observada (valor obtenido de estudios piloto), m/día.
	Qv: caudal volumétrico suministrado al filtro por unidad de área del filtro = Q/A, [m/día].
	A: área transversal filtro [m ²]
	Q: caudal suministrado al filtro sin recirculación, m ³ /día.
	m, n: constantes empíricas
	Sa: superficie específica del filtro, [m ²].
	V: unidad de volumen, [m ³].
	As: superficie del filtro

Tabla 22 Ecuaciones de diseño de filtro percolador, Eckenfelder. Tomado de libro (Metcalf y Eddy, 1995)

5.14.3 Modelo de Velz

Un diseño de proceso para utilizar los principios fundamentales propuesto por Velz en 1948 ver tabla 22, su ecuación denota la eliminación de DBO como función de la altura de lecho filtrante:

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
-----------------	-----------------

S_o : Entrada DBO5, mg / L

S_D : DBO extraíble en la profundidad D, mg / L

$$\frac{S_D}{S_o} = 10^{-K_v D}$$

D : Profundidad del medio, m

KV : Velz de primer orden constante, d-1

Tabla 23 Modelo de Velz. (Jia Zhu, 2016)

5.14.4 Modelo de Germain

Schultz reformo la ecuación Velz para incluir la tasa de carga hidráulica, y más tarde Germain aplica la fórmula de Schultz a lechos filtrantes de plástico, la ecuación se presenta en la tabla 23

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
S_o : Entrada de DBO5, sin recirculación, mg / L	
S_e : DBO5 de efluente clarificado, mg / L	
D : profundidad del medio, m	$\frac{S_e}{S_o} = e^{-k_G D / WHL^n}$
WHL: Tasa de carga hidráulica, sin recirculación, L / m ² • s	
n : característica exponente de los medios de plástico ¹	
K_G : tratabilidad de AR y el coeficiente de embalaje, (L / s) ^{0.5} / m ²	

Tabla 24 Modelo de Germain (Jia Zhu, 2016). ¹por lo general supone que es 0,5

El valor k se relaciona con las diferencia del AR, la profundidad media, el área superficial y configuración del lecho filtrante (Jia Zhu, 2016).

El extenso estudio para los valores de k ha resultado en valores con amplias variaciones, lo que sugiere que siempre es necesario un estudio piloto al AR a tratar con el fin de determinar un valor de k fiable para realizar el diseño del filtro percolador (WEF , 1998).

La formulación de la ecuación Germain se fundamentó en estudios de lecho considerable alta profundidad que respondía a una alta carga de aplicación y resultaba en una humectación adecuada del mismo, por lo cual aunque no incluye el efecto de la recirculación sin embargo, en

los estudios piloto realizados no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Jia Zhu, 2016).

Los filtros percoladores de poca profundidad con pequeñas carga hidráulica de recirculación debería favorecer el rendimiento del sistema como resultado del aumento de humectación medios de comunicación (Jia Zhu, 2016).

5.14.5 Modelo Modificado Velz

El lecho de flujo transversal combina elevada área superficial con alto número de puntos de Se desarrolló una ecuación modificada de Velz, para la eliminación de DBO soluble que incluye los efectos de la superficie de los lechos filtrantes (WEF , 1998), se expresa en la tabla 24.

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
$S_{o,s}$: Entrada de DBO5, sin recirculación, mg / L	$S_{e,s} = \frac{S_{o,s}}{(R + 1) \exp \left\{ \frac{k_{20,MV} A_s D \theta^{T-20}}{WHL [(R+1)^n]} \right\} - R}$
S_e : Entrada DBO soluble, mg / L	
$k_{20,MV}$: Coeficiente global de tratabilidad a 20 °C, (L / s) ^{0.5} / m ²	
A_s : área de superficial de los medios, m ² / m ³	
D : profundidad del medio, m	
θ : coeficiente de corrección de la temperatura, 1.035	
WHL: Tasa de carga hidráulica, sin recirculación, L / m ² • s	
n : característica exponente de los medios de plástico ¹	
R : relación de recirculación (flujo de reciclado / flujo entrada)	

Tabla 25 Modelo modificado Velz. (Jia Zhu, 2016) ¹ por lo general supone que es 0,5.

5.14.6 Procedimiento de diseño para remoción combinada de carga orgánica y nitrificación

Los filtros percoladores enfocados a la remoción combinada se diseñan tipo torre con la finalidad que en la parte superior ocurra una remoción de DBO y en la parte inferior se lleve a cabo el proceso de nitrificación. Jia Zhu (2016), resalta que se “debe a que el crecimiento nitrificante sólo puede ser predominante cuando se ha removido la parte más soluble del sustrato orgánico es la zona superior de sistema, proporcionando una menor competencia del oxígeno y la superficie del lecho; además, la recirculación permite aumentar el potencial de nitrificación debido a la dilución de la DBO”. (p.309-311).

Jia Zhu (2016), cita que, el diseño de filtros percoladores de proceso combinado se hizo de manera empírica dado a la complejidad de la cinética de la biopelícula y el limitado conocimiento técnico de los factores que intervienen (WEF , 2000).

Los investigadores han estudiado que se necesitan concentraciones de DBO soluble menores a 20 mg/l para iniciar la nitrificación, por otro parte varias plantas a gran escala han logrado altos niveles de nitrificación con cargas orgánicas menores $0,2 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \text{día}$, y se resalta que el uso de lecho modular cruzado es más eficiente en el funcionamiento de esos sistemas de proceso combinado (Jia Zhu, 2016).

WEF (2000) cita un proceso de diseño basado en el estudio de Okey y Albertson desarrollado a partir de un análisis de datos de cuatro EDAR, en la que se compararon las relaciones de entrada de DBO con los efluentes de los filtros percoladores de proceso combinado, el estudio derivó en la ecuación de la tabla 25:

<i>Términos</i>	<i>Ecuación</i>
TKN _{OX} : tasa de nitrificación, g / m ² • día a aproximadamente 15 °C	$\text{TKN}_{\text{OX}} = 1.086 \left(\frac{S_o}{S_{\text{TKN}}} \right)^{-0.44}$
S _o : influente DBO ₅ , mg / L	
S _{TKN} : influente nitrógeno total Kjeldahl (TKN) de concentración, en mg / L	

Tabla 26 Diseño empírico para filtros percoladores de proceso combinado

La remoción de fósforo en una planta de filtro percolador se consigue generalmente por precipitación química en los procesos de clarificación primaria o secundaria, si se requiere un límite de fosforo estricto se recomienda la precipitación química en el clarificador primario (Jia Zhu, 2016).

5.14.7 Remoción del Nitrógeno amoniacal

La eliminación de nitrógeno amoniacal se puede lograr usando recirculación de efluentes nitrificado, de esta manera este método puede usarse para dar cumplimiento a límites poco estrictos de descarga (Pearce, 2004) y (Farmer, 2013)

Jerry Bounds, (2010) ha demostrado que el sistema de nitrificación por filtros percoladores puede ser un proceso terciario eficiente para efluentes de lagunas aireadas para lograr efluentes, con valores de vertimiento de nitrógeno amoniacal de hasta de 2,0 mg / l.

Una comparativa sobre los costes energéticos operativos revela que el sistema de nitrificación por filtros percoladores de lecho modular corrugado de plástico es significativamente pequeño comparado con otras alternativas de película fija, e incluso una tercera parte del costo de la energía consumida por un proceso de reactor de biopelícula de lecho móvil MBBR (Jerry Bounds, 2010).

Con una condición de temperatura favorables, es posible el buen funcionamiento de un sistema de eliminación de carbono y nitrificación casi sin ninguna entrada de energía (C.-D. Henrich, Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology, 2013).

Cuando se diseña un tratamiento terciario de filtro percolador nitrificante el afluente tiene muy baja carga de DBO, con un diseño adecuado, estos filtros pueden lograr concentraciones de nitrógeno amoniacal a la salida de hasta 0,5-3 mg / L (Jia Zhu, 2016).

6. Aspectos de mejora

Los aspectos de mejora para las unidades de filtro percolador están enmarcadas entre tres conceptos, el diseño la construcción y la operación.

Para el concepto de diseño se puntualiza la optimización de las funciones para transferencia de oxígeno, flujo de AR y recirculación.

Para los aspectos constructivos se da énfasis en los materiales que favorezcan las técnicas de diseño y a su vez permita reducciones de costos

Sobre la operación se resalta el monitoreo y registro de datos para reaccionar de manera asertiva a los inconvenientes que se puedan presentar.

6.1 Mejoras técnicas de diseño

Las mejoras técnicas de diseño de un filtro percolador se deben enfocar en las formas de optimizar cuestiones como la elección del tipo de lecho filtrante, la dosificación de caudal, la aireación y la relación de recirculación, pero sin dejar de lado el tratamiento necesario que debe traer el influente a la entrada del filtro.

El tratamiento que se le debe hacer al AR aguas arriba es fundamental para aprovechar las características brinda el filtro percolador. Es necesario garantizar la remoción de arenas y solidos suspendidos en general como también las grasas, factores que si llegan al lecho filtrante pueden resultar obstruyendo los orificios o inhibiendo la digestión bacteriana.

Para la elección del lecho filtrante adecuado se debe tener en cuenta el objetivo de tratamiento que se quiere obtener, ya sea una remoción de DBO de una alta carga orgánica en un proceso de desbaste; una eliminación típica de materia orgánica; un proceso combinado en torre; o si es un proceso terciario, es decir esencialmente nitrificante.

Para proceso de desbaste se resalta el empleo de medio modulares de flujo vertical que vendrá acompañado de una alta relación recirculación.

Los medios de flujo vertical u cruzado tienen cada uno sus ventajas, generalmente los medios de flujo vertical se deben utilizar para remoción de altas cargas porque son menos propensos a taponamientos por excesivo crecimiento biológico, además de que se confieren una mayor resistencia estructural y los de flujo cruzado se permiten un mayor tiempo de retención, homogenizando mucho mejor el líquido y logrando mejor eficiencia frente a los módulos de flujo vertical; es por esta razón que las configuraciones de lecho mixto para unidades de sistema combinado mejoran significativamente el desempeño del lecho.

Sin embargo, un buen asesoramiento con el fabricante es importante dado que, hay que tener en cuenta las especificaciones en cuestiones de límites de carga de los medios, es decir la altura máxima de encarrado para las que se pueden implementar, existen medio modulares que se soportan para cargas máximas de altura de hasta 9 metros, razón más que suficiente para no considerarlos para diseñar unidades de 12 metros de profundidad de lecho, pues podría generarse falla estructural por la fluencia del material y resultar catastrófico, además es importante recalcar

que lo medio de material aleatorio presentan menos capacidad de auto soporte de cargas estructurales, los de mayor resistencia no sobrepasan la posibilidad de 5 metros de profundidad de lecho.

Un autor destaco una configuración de lechos con una disminución de espacios vacíos a medida que desciende el líquido, esta cuestión sería un poco polémica, puesto que otros autores han descrito la importancia de los espacios vacío en la parte baja del lecho filtrante, razón de que se necesita más funcionalidad para el paso de la biomasa desprendida, sin embargo es un planteamiento muy interesante que podría funcionar bajo una calibración del sistema adecuada, cuestión que conseguiría como lo dice el autor una reducción de costos de energía de bombeo en la recirculación, debido un relación menor; desde luego como el comportamiento biológico a veces es imprevisible en ocasiones, este concepto de diseño plantea un reto operativo importante.

Una cuestión a discutir es el relativo alto costo de estos medios plástico además de que se requiere su importación, sin embargo, estos precios se podrían compensar otros aspectos de diseño de los que se hablara más adelante.

Se denota que hacen falta estudios para la fabricación o utilización de nuevos medios de soporte enfocados desde otra perceptiva que permita disminuir los costos de producción, para el desarrollo o implementación de estos materiales se debe tener en cuenta sus resistencias a la corrosión, la facilidad de configuración, sus bajas densidades, pero buen desempeño antes cargas auto portadas, esta razón muestra a las fibras poliéster o de otros polímeros como una opción de estudio, podrían estructurarse como cintas continuas sobre un marco estructural liviano.

Por su parte la dosificación de caudal es importante para el buen funcionamiento del sistema, factores como el flujo dosificado a las distintas distancias del eje es importante, porque garantiza un distribución homogénea y consistente del caudal por unidad de superficie. Otras cuestiones

como la altura a la que se hace dosificación es relevante, los autores recomiendan alrededor de 15 centímetros, sin embargo, el uso de rejillas sobre el lecho con absorción del impacto hidráulico debería permitir una mayor altura de dosificación y con ello logra oxigenación adicional, por otro lado, la calidad del esparcimiento generado por boquillas también ayuda tanto a minimizar el impacto hidráulico sobre el lecho como también a la oxigenación del líquido.

Resulta considerable también el equilibrio que debe tener la velocidad de carga hidráulica con el espesor de la biopelícula, una cuestión que eliminaría en gran medida la eliminación de olores al mismo tiempo que las condiciones poco favorables para producción de moscas.

Ahora bien, acotando la aireación, esta puede optimizarse diseñando en la base de la estructura una mayor área de abertura, no tendría por qué limitarse, si se aprovecha el perímetro máximo permisible a nivel estructural para abertura de ventilación alrededor del sistema de drenaje; se reduciría la posibilidad de realizar inundado del filtro para control de macro fauna, pero por los investigadores sabemos que si se gestiona bien no es necesario este procedimiento.

Una propuesta sería estudiar la posibilidad de usar aberturas adicionales en los filtro tipo torre, puesto que los investigadores afirman que a profundidades mayores a 6 metros es necesario aireación forzada aunque también sería aplicable a unidades de menos altura si es necesario y confluye en menores costos de construcción, la idea sería llevarla a cabo sobre el perímetro del cuerpo del filtro a distancias x de la base del filtro; para asegurar el concepto de flujo de aire por diferenciales de temperatura una idea apropiada sería añadirle alerones inclinados hacia abajo sobre las aberturas tal que la masa de aire importante tenga más posibilidad de fluir hacia dentro del filtro, además estos eliminarían la entrada excesiva de luz que pudiera generar crecimiento de algas, también la aberturas podría configurarse intercaladas en el plano horizontal de manera que el aire que entre por una abertura en la parte inferior termine su recorrido en la parte superior del

filtro; por otro lado, como los lechos auto portantes tienen la ventaja del bajo peso, esta idea se podría optimizar construyendo lechos por niveles planteando cámaras de aireación en medio de cada nivel, el goteo de agua a través de la cámara incrementaría el oxígeno disuelto.

También a esta idea se podría configurar que a la parte alta donde se requiere más oxígeno las aberturas o las cámaras en medio de los niveles sean más grandes. Los alerones podrían ser de material geotextil u otro material liviano.

Con estas optimizaciones que podrían aplicarse en parte, se eliminaría el oxígeno disuelto en el líquido como factor limitante. Esta idea habrá que revisarse también con la combinación de una óptima recirculación para constatar a que nivel quedan la producción de olores y vectores en el sistema, cuestiones que afectan a las poblaciones aledañas, tanto la parte económica como la salud y el bienestar.

Ahondando en la cuestión del empaquetamiento del lecho filtrante por medio de mallas eslabonada citada por la Australian Meat Processor Corporation que bien podría construirse a menores costos usando el grado de espesor estructuralmente adecuado. Debería ser necesario de un recubrimiento a menos que este en la sombra durante el día, un recubrimiento de bajo costo sería un geotextil a una distancia x del perímetro del filtro y otra distancia z razonable de la superficie del suelo, lo que también eliminaría la formación de algas en el perímetro de la unidad una solución razonable sería la construcción, sin embargo, habría que revisarse el comportamiento de las corrientes de aire en el sistema.

Los lechos modulares como son auto portantes pueden ser recubiertos con algún tipo de geotextil y si se requiere optimizar el flujo de aire por diferencial de temperaturas podría diseñarse una campana invertida que confluya en la base del filtro ubicada desde una cierta altura desde la superficie, la campana sería de un material que tenga considerable absorción y transferencia térmica

generando un flujo de aire ascendente más eficiente por medio del lecho filtrante, en zonas de alta radiación solar e incluso en climas más templado permitiría bastante eficiencias de transferencia de oxígeno a la biopelícula.

Si la película de material de la campana es sensible a la corrosión se permitiría la unión de esta con un material más apropiado que soporte estas condiciones en la zona en que confluye con el inicio del lecho.

Esta aplicación podría reducir sustancialmente los costos de mano de obra y estructurales con posibilidades altas de mayores eficiencias y menores problemas operativos, sería un sistema bastante factible para desarrollarse permitiendo equilibrar la balanza de costos del lecho modular del filtro.

La recirculación es un factor a tener en cuenta, aunque requiera de gastos energético es indispensable cuando se usan medio filtrantes de alta eficiencia, como mínimo para las horas nocturna en las que disminuye el flujo hidráulico entrantes y se requiere mantener hidratado la biopelícula con el fin de evitar perder eficiencia de remoción o fallo total del sistema.

Por otra parte, los beneficios de la recirculación en los filtros percoladores no deben de relegados a un segundo lugar puesto que solucionan muchos inconvenientes operativos como la disminución de moscas, el control de espesor de la biopelícula que se traduce en condiciones aeróbicas más eficientes.

En la ingeniería de procesos para el desarrollo sostenible a veces hay que sacrificar costos en ciertos sectores que los límites tecnológicos aun no permiten optimizar y compensarlos con reducción de costo en otras áreas a partir de soluciones sustentables, que incluso podrían permitirse una disminución mayor del costo total del proyecto en cuestión.

6.2 Mejoras técnicas de construcción

Aunque, siendo tolerantes ante los inconvenientes que requieren afrontarse, los materiales pétreos aún son una solución para pequeñas unidades de tratamiento de filtro percolador. Sin embargo, es importante centrarse en analizar soluciones para tratamientos más complejos.

La construcción de un filtro se fundamenta sobre cimentación de concreto, pero de ahí para adelante ya es posible el uso de otros materiales, debido a las características de los lechos de plástico como la estructura de contención o tanque de empacamiento del filtro que da la posibilidad del uso de fibras de vidrio, poliéster con resistencia a la corrosión y a los factores de deterioro que presenta las AR. Por otro lado, está también la sustitución de vigas de hormigón por rejillas, y puntales autoajustables para soportar la carga vertical del lecho, que brindan una mejor versatilidad a la hora de permitir el flujo de aire ascendente como también el drenaje del líquido tratado, una solución permite también, menores necesidades de mantenimiento al sistema de drenaje.

Se sabe que el área superficial específica del material de soporte que conforma el lecho, debe mantener un factor de rendimiento, que garantice la mayor superficie para el hospedaje de microorganismos depuradores, al mismo tiempo que se conecten los espacios vacíos para facilitar el flujo ascendente de aireación, para la transferencia de oxígeno al líquido y disminuir el riesgo a taponamientos por desprendimiento de biomasa. Por otro lado, la superficie del material del medio debe estar adecuada para mejorar la adherencia de esta biomasa al lecho.

Esta aplicación es funciona tanto para recubrimiento de lechos de soporte aleatorios como modulares, con la ventaja que en los segundos será menos exigente las cargas que esta debe soportar, el uso de la fibra de vidrio elimina la necesidad de aplicación de recubrimiento resistente a la corrosión como se usa en las estructuras de concreto.

El relleno modular anula las cargas estructurales sobre la pared de empaquetamiento del filtro, debido a que son unidades auto portantes que se sustentan verticalmente sobre si mismas junto con el peso de biomasa adherida.

La desventaja principal de emplear el lecho modular es el precio, aunque como se mencionó anteriormente es posible compensar esta desventaja, además este mismo costo inicial puede ser indemnizado por las ventajas de construcción, y operación a lo largo de la vida útil del sistema.

Como se ha mencionado el sistema de roseo se liga a la forma del tanque, hay que tener en cuenta los materiales de los brazos de este sistema, deben ser livianos, resistentes a la corrosión y soportar el peso del agua continuamente. Si se garantiza un menor esfuerzo hidráulico para mover el brazo y generar el roseo es posible mayores diámetros del tanque sin ser necesario instalar un sistema mecánico movido por energía.

6.3 Mejoras técnicas de operación

Optimizar la operación de un filtro percolador se desarrolla a partir del control y el mantenimiento que se le lleva a cabo a la unidad como también al monitoreo del influente.

Principalmente se debe tener especial cuidado que el sistema de clarificado primario esté funcionando de correctamente, se debe hacer una adecuada remoción de los sólidos. Es necesario monitorear y controlar el crecimiento de macro fauna en filtro, esta tarea se puede desarrollar aumentando en periodos cortos la tasa de carga hidráulico sobre el lecho, disminuyendo la velocidad del sistema de roseo o aumentando el caudal de recirculación; por otra parte, se requiere llevar a cabo el limpiado periódico del sistema de drenaje.

Llevar un monitoreo de registro sobre las tasas y cargas orgánicas e hidráulicas, características efluente, temperaturas y pH permitirá reaccionar frente a cambios en la eficiencia del sistema u otros inconvenientes que se puedan presentar.

7. Conclusiones

Los conceptos de diseño para la mejora de un filtro percolador se distinguen por la eficiencia y el equilibrio en conjunto de todos los procesos del sistema.

Para la reducción de costos en la construcción de un filtro percolador, es aplicable el concepto de ingeniería de procesos para el desarrollo sostenible, donde se permiten precios en ciertos sectores fundamentales que los límites tecnológicos aun no permiten optimizar, y se compensan con la reducción de costos en otras áreas de procesos usando soluciones sustentables, que incluso podrían permitir una disminución mayor del costo total del proyecto en cuestión.

El control operativo de un filtro percolador es indispensable para mejorar la eficiencia y el equilibrio de los procesos involucrados en el funcionamiento del sistema.

La calibración de un sistema de filtro percolador para el concepto tecnológico configurativo de lecho filtrante enfocado a la reducción del área transversal de los canales hacia la parte baja del filtro, es una propuesta interesante a ser estudiada, considerando que en la parte alta del filtro existe mayor DBO, que sería favorecida por una mayor área transversal de los espacios vacíos, cuestión que es aplicable tanto a medios modulares como de resolución aleatoria; sin embargo también habrá que complementarse con un estudio de optimización de humectación en la parte inicial del lecho.

Lista de referencias

- Albertson OE, D. G. (1984). Analysis of process factors controlling performance of plastic bioreactors. *paper presented at 57th Annual Conference of Water*, New Orleans.
- Albertson OE, D. G. (1995). Excessive biofilm control by distributor-speed modulation. *J Environ.*
- Albertson OE, O. R. (1988). Trickling filter need to breathe too. *Paper presented at Iowa Water Pollution Control Federation meeting*. Des Moines.
- Arcadio P. Sincero, G. A. (2003). *Physical–chemical treatment of water and wastewater*. Baltimore: A. P. Sincero and G. A. Sincero.
- Australian Meat Processor Corporation. (2015). *Trickling Filter Technology for Treating Abattoir Wastewater*. AMPC.
- Bioplastdepuracion. (24 de Julio de 2019). *Bioplastdepuracion*. Obtenido de Bioplast Depuracion: <http://bioplastdepuracion.com/index.php?s=filtros>
- Brentwood Industries. (2011). *Bio-rejilla AccuGrid*. Comercial, 610 Morgantown Road, Reading, PA 1961. Obtenido de www.BrentwoodProcess.com
- Brentwood Industries. (2016). *Medio-mixto AccuPacc*. Obtenido de <http://www.sumyt.com/>
- Brentwood Industries, Inc. (2014). *Tratamiento biologico, procesos de crecimiento adherido*. Coldwater, Michigan. Obtenido de brentwoodindustries.com
- C.-D. Henrich, M. M. (2013). Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology. *Paper-TF-IWA-Water-reuse-conference-Namibia*, (págs. 1-12). Germany.
- C.-D. Henrich, M. M. (2013). Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology. *Paper-TF-IWA-Water-reuse-conference-Namibia* (págs. 1-12). Germany: EXPOVAL , BMBF.
- C.P. Leslie Grady, G. T. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. CRC Press: CRC Press Taylor & Francis Group and IWA Publishing .
- Canter, S. (2010). Trickling Filters. *Water World, Continuing Education*. Obtenido de www.WaterWorldCE.com
- CH2MHILL . (1984). A comparison of trickling filter media. *CH2MHILL*. Denver.
- Corbitt, R. (1999). *Standard handbook of Environmental Engineering* (2nd Ed. ed.). USA: McGraw Hill.
- Davis, M. L. (2010). *Water and wastewater engineering design principles and practice*. New York: McGraw-Hill.
- EPA. (2000). Trickling Filters Wastewater Technology Fact Sheet. *Trickling Filter Nitrification Wastewater Technology Fact Sheet*.
- Farmer, G. (2013). Littleton/Englewood WWTP. *A case study presented at Trickling Filter*. Honolulu, Hawaii: Media Webinar.
- Glen T. Daigger, G. T. (2011). Trickling Filter and Trickling Filter–Suspended Growth Process Design and Operation: A State-of-the-Art Review. *Journal Water Environment Research*, 83.
- Harrison, J. (2013). TFSC update or abandon practice. *Fixed Film Forum Webinar*. Honolulu, Hawaii.
- Harrison, T. P. (1989). Trickling filter solids. *Proceedings of 62th Annual Water Pollution Control Federation Conference*. San Francisco.

- Jerry Bounds, e. (2010). Nitrifying Trickling Filter Provides Reliable, Low-Energy, and Cost-Effective Tertiary Municipal Wastewater Treatment of a Lagoon Effluent. *WEFTEC* .
- Jia Zhu, F. M. (2016). *Municipal and Industrial Wastewater Treatment Using Plastic Trickling Filters for BOD and Nutrient Remova*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland .
- Lin, S. D. (2007). *Water and Wastewater Calculations Manual*. New York: Mc Graw Hill.
- Metcalf y Eddy, I. (1995). *Ingenieria de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilizacion* (Tercera Edicion ed.). (A. G. Brage, Ed., & J. d. Trillo, Trad.) Madrid: McGraw-Hill.
- Onda K, T. H. (1968). Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns. *J Chem Eng Jpn* , 1:56–6.
- Parker, D. (1998). Trickling filter mythology. In: ASCE 1998 National Conference on Environment Engineering. Chicago.
- Pearce, P. (2004). Trickling filters for upgrading low technology wastewater plants for nitrogen removal. *Water Sci Technol of denitrification potential in carbonaceous trickling filters. Water Res 37:4011–4017*, 49(11–12):47–52. *Water Res 37:4011–4017*.
- Piedra mundo. (24 de Julio de 2019). *Piedramundo*. Obtenido de Bolón de río canto rodado: <https://www.piedramundo.cl/producto/bolon-canto-rodado/>
- Ramalho, R. (1983). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. Quebec: Academic Press
- Spellman, F. R. (2004). *Mathehematics manual for Water and wastewater treatement plant operators*. Florida: CRC Press LLC.
- Sumyt. (24 de Julio de 2019). *Servicios y Suministros Sumyt*. Obtenido de Relleno tubular; Media de flujo vertical; Relleno de flujo cruzado: <http://www.sumyt.com/>
- Theme Horse. (2019). *Filtro percolador*. Obtenido de Tratamiento del Agua: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/filtros-percoladores-1/>
- Udo Wiesmann, I. S.-M. (2007). *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, .
- WEF . (1998). Design of municipal wastewater treatment plants, manual of practice 8, 4th edn. Alexandria: Water Environment Federation.
- WEF . (2000). Aerobic fixed-growth reactor. *Special Publication*. Alexandria: Water Environment Federation.
- WEF . (2009). Design of municipal wastewater treatment plants. *manual of practice 8, 5th edn*. Alexandria: Water Environment Federation.
- WEF. (2007). *Operation of municipal wastewater treatment plants, manual of practice 11, 5thedn*. Alexandria: Water Environment Federatio.
- WEF. (2007). Operation of Wastewater Treatment Plants. *Water Environment Federation (USA)*.
- Wik, T. (2004). Trickling filters and biofilm reactor modelling. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 193–212.