

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS AEROBIAS PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

Julián Andrés Huartos Toro

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Programa de Ingeniería Ambiental

Manizales

2018

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS AEROBIAS Y ANAEROBIAS
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

Julián Andrés Huartos Toro

Trabajo dirigido por:

Doc. Javier Mauricio Naranjo Vasco

Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

Ingeniería Ambiental

Manizales

2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
SUMMARY	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
JUSTIFICACIÓN	5
1. OBJETIVOS	6
1.1 Objetivo General	6
1.2 Objetivos Específicos	6
2. METODOLOGÍA	7
2.1 Materiales	7
2.1.1 Herramientas Utilizadas	7
2.2 Procedimientos	7
2.2.1 Revisión del Estado del Arte	7
2.2.2 Análisis	7
2.2.3 Generación de Matrices	8
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	9
3.1 Tratamientos de las Aguas Residuales Urbanas	10
3.1.1 Pretratamiento	11
3.1.2 Tratamiento Primario	14
Tratamiento Secundario	14
3.1.3 Tratamiento Terciario	16
3.2 Tecnologías	18
3.2.1 Filtro Percolador	20
3.2.2 Reactor Biológico Secuencial (SBR)	31
3.2.3 Lodos Activados Convencionales	39

3.2.4	Lodos activados con película integrada fijas (IFAS).....	46
3.2.5	Biodiscos Rotativos (RBC)	52
3.2.6	Reactor Biológico de Membrana (MBR)	58
3.2.7	Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR)	66
3.2.8	Filtro biológico aireado (BAF).....	72
3.3	Comparación entre los Diferentes Sistemas para el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas.....	79
3.4	Costos de Inversión y Funcionamiento de una PTAR.....	82
3.5	Métodos de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales.	85
3.5.1	Selección de los Factores de Decisión.....	86
3.5.2	Peso Relativo	86
3.5.3	Evaluación de Los Factores de Decisión	87
3.5.4	Ejemplo: Métodos de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales.	87
4.	CONCLUSIONES.....	90
5.	BIBLIOGRAFÍA	91

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación Entre Cada Material de Relleno.....	25
Tabla 2. Tipos de Filtros Percoladores Según la Carga con la que Trabajan.....	26
Tabla 3. Porcentaje de Remoción del Filtro Percolador.....	27
Tabla 4. Ventajas y Desventajas del Filtro Percolador.....	28
Tabla 5. Porcentaje de Remoción de un Reactor tipo SRB.....	35
Tabla 6. Ventajas y Desventajas de un Reactor tipo SRB.....	35
Tabla 7. Porcentaje de Remoción de un Proceso de Lodos Activados.....	42
Tabla 8. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Lodos Activados.....	42
Tabla 9. Porcentaje de Remoción para Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS).	49
Tabla 10. Ventajas y Desventajas del Proceso de Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS).....	50
Tabla 11. Porcentaje de Remoción para Biodiscos Rotativos.....	54
Tabla 12. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Biodiscos Rotativos.....	55
Tabla 13. Membrana Sumergida vs Membrana Externa.....	61
Tabla 14. Porcentaje de Remoción para el Reactor tipo MBR.....	62
Tabla 15. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Reactor Tipo MBR.....	63
Tabla 16. Porcentaje de Remoción para un Sistema MBBR.....	68
Tabla 17. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Reactor Biológico de Lecho Móvil...	69
Tabla 18. Porcentaje de Remoción para Filtro Biológico Aireado.....	73
Tabla 19. Ventajas y Desventajas de un Sistema tipo Filtro Biológico Aireado (BAF).	75
Tabla 20. Remoción de DBO.....	80
Tabla 21. Remoción de DQO.....	80
Tabla 22. Remoción de SST.....	81
Tabla 23. Remoción de N.....	81
Tabla 24. Remoción de P.....	81
Tabla 25. Costos Relacionados con la Implementación de un Sistema de Tratamientos de Aguas Residuales.....	83
Tabla 26. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales: Factor de Decisión.....	88

Tabla 27. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales: Tecnologías Escogidas	88
Tabla 28. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales: Peso Relativo y Evaluación de los factores de decisión.	89

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas.....	10
Figura 2. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas con Pretratamiento de Rejillas, desarenador y trampa de grasas.....	19
Figura 3. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas con Pretratamiento de Pozo Séptico.	19
Figura 4. Tren de Tratamiento Filtro Percolador.....	21
Figura 5. Configuraciones Posibles Para el Filtro Percolador.....	23
Figura 6. Etapas de Funcionamiento de un Reactor Biológico Secuencial.	32
Figura 7. Tren de Tratamiento para el Reactor Biológico Secuencial.	34
Figura 8. Tren de Tratamiento para Lodos Activados.....	41
Figura 9. Reactor de Lodos Activados.	41
Figura 10. Tren de Tratamiento para Lodos Activados con Película Integrada Fija.....	47
Figura 11. Reactor de Lodos Activados con Película Integrada Fija.	48
Figura 12. Tren de Tratamiento para un Sistema de Biodiscos Rotativos.	53
Figura 13. Reactor de Biodiscos Rotativos.	54
Figura 14. Tren de Tratamiento para un Sistema de Reactor tipo MBR.....	60
Figura 15. Membrana Integrada o Sumergida.....	60
Figura 16. Membrana Externa o con Recirculación de Lodos.....	61
Figura 17. <i>Tren de Tratamiento para Reactor Biológico de Lecho Móvil.</i>	67
Figura 18. Reactor Biológico de Lecho Móvil Aerobio.....	68
Figura 19. Tren de Tratamiento para Filtro Biológico Aireado.	73

TABLA DE IMÁGENES

Imagen 1. Sedimentador Circular.....	11
Imagen 2. Rejillas de Desbaste.....	12
Imagen 3. Desarenador.....	12
Imagen 4. Trampa de Grasas.....	13
Imagen 5. Tanque Séptico.....	13
Imagen 6. Microorganismos Responsables de la Depuración de las Aguas Residuales.....	16
Imagen 7. Oxidación Ultravioleta.....	17
Imagen 8. Filtro Percolador.....	20
Imagen 9. Relleno de Piedras, Pieza de Plástico y Módulos de Plástico.....	22
Imagen 10. Filtros Percoladores de la PTAR Puchukollo.....	29
Imagen 11. Reactor Biológico Secuencial (SBR).....	31
Imagen 12. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Funza.....	37
Imagen 13. Lodos Activados.....	39
Imagen 14. Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre.....	43
Imagen 15. Lodos Activados con Película Integrada fija (IFAS).....	46
Imagen 16. Biodiscos Rotativos.....	52
Imagen 17. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Solita” de Mantilla – La Habana.	56
Imagen 18. Reactor Biológico de Membrana.....	58
Imagen 19. Instalaciones de la EDAR de Guadalajara.....	64
Imagen 20. Reactor Biológico de Lecho Móvil.....	66
Imagen 21. Piezas de Plástico Reactor Biológico de Lecho Móvil.....	66
Imagen 22. Sjölanda WWTP.....	71
Imagen 23. Filtro Biológico Aireado.....	72
Imagen 24. Ravensview Water Pollution Control Plant – Canadá.....	77

TABLA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)
Demanda Biológica de Oxígeno después de cinco días (DBO₅)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)
Sólidos Suspendidos (SS)
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)
Sólidos Suspendidos Totales (SST)
Nitrógeno (N)
Fósforo (P)
Nitrógeno Total (NT)
Fósforo Total (PT)
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)
Aguas Residuales Urbanas (ARU)
Efluente Final (EF)
Reactor Biológico Secuencial (SBR, siglas en inglés)
Lodos Activos con Película Integrada Fija (IFAS, siglas en inglés)
Reactor Biológico de Membrana (MBR, siglas en inglés)
Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR, siglas en inglés)
Filtro Biológico Aireado (BAF, siglas en inglés)
Biodiscos Rotativos (CBR, siglas en inglés)
Kilogramos (Kg)
Metros Cúbicos (m³)
Día (d)
Porcentaje (%)
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, siglas en ingles)

RESUMEN

Se realizó una revisión del estado del arte de varias tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales con el fin de comparar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST, entre otros. El reactor biológico de membrana presenta una remoción de DBO y SST de 99% y 99,9% respectivamente siendo esta la más eficiente para remover dichos parámetros mientras que el reactor biológico de lecho móvil (MBBR) remueve el 96% de DQO.

También se realizaron tablas en donde se identificaron las ventajas y desventajas presentadas por cada tecnología y se propuso una metodología que servirá de herramienta para la elección de un sistema de tratamiento de aguas residuales atendiendo a las necesidades y prioridades de quien desee construir e implementar una PTAR.

Palabras claves: Tratamiento de aguas residuales, sistemas de tratamiento de aguas residuales, lodos activados, reactor biológico de membrana.

SUMMARY

A review of the state of the art of several aerobic technologies for the treatment of wastewater was carried out in order to compare the efficiency of removal of BOD, COD and SST, among others. The membrane biological reactor presents a removal of BOD and SST of 99% and 99.9% respectively. This reactor is the most efficient to remove these parameters while the mobile bed biological reactor (MBBR) removes 96% of COD.

Tables were also made where the advantages and disadvantages presented by each technology were identified. It was proposed a methodology that will serve as a tool for the choice of a wastewater treatment system according to the needs and priorities of those who wish to build and implement a wastewater's treatment plant (WWTP).

Keywords: Wastewater treatment, wastewater treatment systems, activated sludge, biological membrane reactor.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años a nivel mundial se ha experimentado un aumento en la contaminación del recurso hídrico provocando grandes impactos ambientales negativos, la contaminación del agua representa disminución de la fauna y flora de los ecosistemas, disminución en la calidad de vida de la población humana, aparición de enfermedades, agotamiento del recurso hídrico, entre otros.

El aumento de la contaminación del recurso hídrico se debe a las diferentes actividades humanas en los centros poblados o ciudades, los vertimientos de aguas residuales urbanas son un factor importante en el aumento de la contaminación hídrica. Según la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CorpoCaldas) la ciudad de Manizales - Colombia cuenta con una población de 369.981 personas y aporta a la contaminación del agua 8'023.989 KgDBO₅/año y 8'023.989 KgSST/año (CorpoCaldas, 2016)

Una forma de combatir la contaminación del agua y mitigar los impactos ambientales que conlleva la disminución de la calidad del recurso hídrico es la implementación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) la cual tiene como objetivo disminuir los contaminantes presentes en las Aguas Residuales antes de su vertimiento a los ríos.

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en las ciudades requiere de un riguroso estudio para determinar el tipo de tecnología que mejor se acople a las necesidades del municipio, es importante tener en cuenta aspectos como porcentaje de remoción que necesita las aguas residuales del municipio para cumplir con la normativa, los costos que se deben asumir en las fases de construcción, operación y mantenimiento, el consumo energético, la disponibilidad de área, entre otros.

Existen diferentes tipos de tecnologías para tratar las aguas residuales urbanas, en Colombia las más usadas son; Lodos activados, Reactor UASB, lagunas facultativas y lagunas de maduración. Cada tecnología tiene como objetivo remover los contaminantes presentes en las aguas de desecho como son la DBO, la DQO, SST, NT, PT, entre otros. Aunque las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales tienen un objetivo en común presentan características operacionales, de diseño, eficiencia, mantenimiento, requerimiento energético, área superficial ocupada, impactos visuales y ambientales diferentes.

La gran diversidad de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales permite tener diferentes opciones para implementar en el diseño y construcción de una PTAR, sin embargo, es necesario tener una visión general de los principales sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas, por este motivo en la presente tesis se analiza y compara ocho tecnologías propias del tratamiento de aguas residuales urbanas.

JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto nace de la necesidad que tiene Aguas de Manizales de conocer a fondo cada tecnología propuesta por las empresas licitadoras en el diseño y construcción de la PTAR Manizales, A partir de allí la Universidad Católica de Manizales brinda asesoría.

La mayoría de la literatura que se encuentra disponible sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales se enfocan en pocas características sobre cada sistema, algunos artículos hablan del funcionamiento y de las ventajas y desventajas, otros hablan de los porcentajes de remoción, otros sobre el manejo y operación y muy pocos sobre el requerimiento energético, los costos de construcción y costos operacionales o sobre el espacio requerido para la implementación de cualquier sistema. Este trabajo trata de reunir todas las características anteriormente mencionadas que pueden traer los sistemas para el tratamiento de aguas residuales.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Analizar y comparar tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas

1.2 Objetivos Específicos

- Reconocer el principio físico, operación y demás aspectos de cada tecnología abordada.
- Realizar un cuadro por tecnología que permita identificar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.
- Desarrollar matrices que permitan comparar las eficiencias de remoción entre las tecnologías estudiadas.

Se adicionaron los siguientes objetivos

- Reconocer los costos de inversión y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales.
- Investigar una metodología para escoger una tecnología para el tratamiento de aguas residuales.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

2.1.1 Herramientas Utilizadas

- Artículos científicos
- Tesis de pregrado
- Tesis de postgrado
- Libros sobre tratamiento de aguas residuales

2.2 Procedimientos

2.2.1 Revisión del Estado del Arte

Se realizó una revisión del estado del arte de las siguientes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas:

- Filtro percolador
- Lodos activados
- Reactor biológico de membrana
- Reactor biológico de lecho móvil
- Filtros biológicos aireados
- Biodiscos rotativos
- Reactor biológico secuencial
- Lodos activados con película integrada fija

Revisión bibliográfica de los costos de inversión y funcionamiento de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Revisión de Metodología para escoger un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas.

2.2.2 Análisis

La revisión del estado del arte de cada tecnología permitió identificar el principio físico de cada una de ellas, su funcionamiento básico y las ventajas y desventajas. Gracias a la

información encontrada se obtuvo los porcentajes de remoción de DBO, DQO, NT, PT, SST, entre otros.

2.2.3 Generación de Matrices

Una vez reunida toda la información se procedió a clasificarla en tablas que permitieron comprar los parámetros establecidos (porcentajes de remoción de DBO, DQO, SST,), además de generar tablas para identificar los costos de inversión y funcionamiento de una PTAR y descripción de una metodología “Métodos de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales” para la escogencia de tecnología para el tratamiento de aguas residuales.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Las Aguas Residuales Urbanas (ARU) poseen características generales como una alta concentración de sólidos suspendidos (SS) que bloquean el paso de la luz y generan poca transparencia en el agua, objetos como madera que son arrojados al alcantarillado público, grasas y aceites, compuestos orgánicos e inorgánicos, un color café oscuro muy cercano al color negro y un olor fuerte que provoca náuseas y mareo en los seres humanos.

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) en las ARU suele rondar en los 500 mg/L, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las ARU suele rondar entre los 625 mg/L a 830 mg/L, es importante aclarar que la tanto la DBO como la DQO varían dependiendo de la cultura ambiental de la ciudadanía.

La cultura ambiental de la población juega un papel importante en las características de las ARU, las personas al desechar por los lavaplatos residuos de alimentos, aceites o químicos contribuyen al aumento de la DBO, DQO y los SS.

La importancia de tratar las aguas residuales urbanas radica en la protección del medio ambiente, protección la fauna, protección la flora y el aumento en la calidad de vida de los seres humanos. Además, el 25 de noviembre del año 2015 Colombia se comprometió con la ‘Nueva agenda del desarrollo sostenible’ y con los diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) celebrado en Rio de Janeiro, Brasil. El objetivo número seis de los ODS hace referencia al ‘Agua limpia y Saneamiento’ el cual pretende garantizar la disponibilidad de agua libre de impurezas para toda la población.

3.1 Tratamientos de las Aguas Residuales Urbanas

En el tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas como se muestra en la figura 1, se compone de un pretratamiento en donde se separan cierta cantidad de materia presente en el agua, un tratamiento primario en donde se degrada parte de la materia orgánica (DBO) presente en el agua y se remueve los sólidos en suspensión a través de tanques sedimentadores primarios (imagen 1), en el tratamiento secundario se remueve materia orgánica fina como las partículas coloidales (los coloides son partículas de diámetro muy bajo y son las responsables del aumento de la turbidez en el agua) convirtiéndolas en floc's sedimentables (los floc son cúmulos de partículas sólidas) que serán removidas en un sedimentador secundario (Imagen 1), el tratamiento terciario o también llamado tratamiento avanzado se requiere para la eliminación de nutrientes como el nitrógeno (N) y el fosforo (P).

Los sedimentadores son tanques en donde por acción de la gravedad se separan las partículas con masa del agua, los floc's se sedimentan en el fondo del tanque y el agua de salida del sedimentador presenta un porcentaje menor de sólidos en suspensión que cuando entró al sedimentador



Figura 1. Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas.



Imagen 1. Sedimentador Circular.

Fuente: (Adminmgv, 2015) Adming. (23 de Junio de 2015. Tratamientodelagua. Obtenido de tratamientodelagua: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/teoria-de-sedimentacion/>

3.1.1 Pretratamiento

Las aguas residuales urbanas antes de someterse a un tratamiento biológico o químico, se someten a un pretratamiento que comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento. (Alianza por el agua - España, 2006)

El pretratamiento es necesario e indispensable para el correcto tratamiento de las aguas residuales, en esta etapa del proceso se eliminan sólidos grandes, grasas, aceites y arenas que si no son eliminadas antes de entrar a un tratamiento biológico el efluente final estaría por debajo de la calidad esperada. Por lo general para esta etapa del proceso se usan rejillas de desbaste, desarenadores, trapa de grasas y/o tanques sépticos (Imagen 2, 3, 4 y 5).

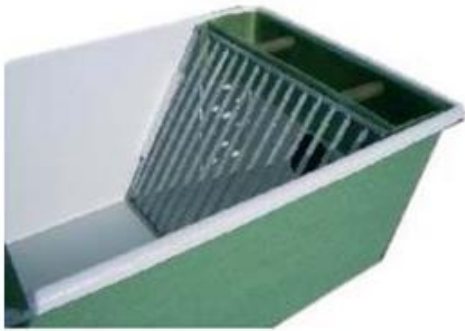


Imagen 2. Rejillas de Desbaste.

Fuente: (Farias de Marquez, 2016) Farias de Marquez,B. (12 de Septiembre de 2016). *iagua*.

Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/usuarios/bettys-farias-marquez>

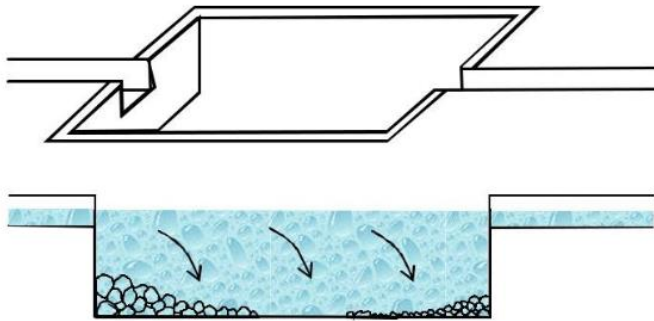


Imagen 3. Desarenador.

Fuente: (Cajias & Villablanca F, 2017) Cajias, E., & Villablanca F,A. (31 de Mayo de 2017).

agriculturers. Obtenido de agriculturers: <http://agriculturers.com/disenio-de-un-desarendor-para-el-pre-filtrado-de-agua-de-riego/>

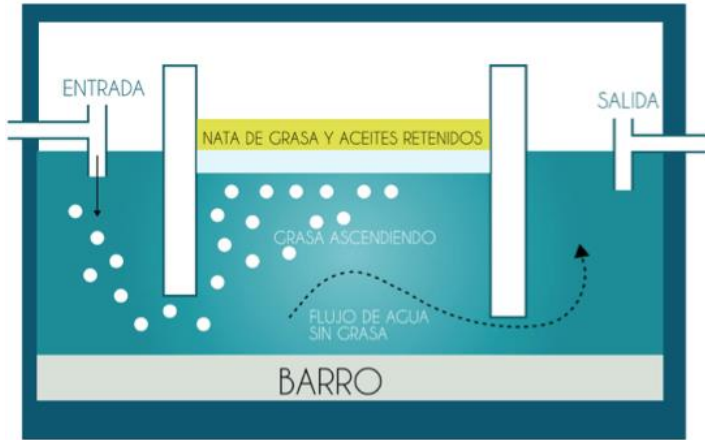


Imagen 4. Trampa de Grasas.

Fuente: (Ingeniería de Servicios Ambientales - ISA, 2015) Ingeniería de Servicios Ambientales – ISA. (16 de Diciembre de 2015). ISA. Obtenido de ISA: <http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/trampas-de-grasa-un-pre-tratamiento-de-aguas-residuales>

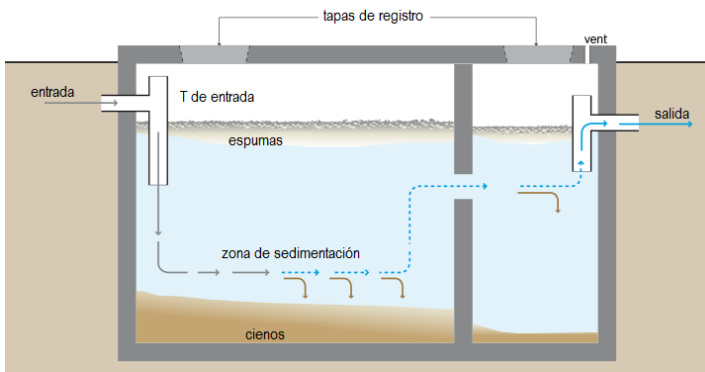


Imagen 5. Tanque Séptico.

Fuente: (Wikipedia, 2018) Wikipedia. (27 de Enero de 2018). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Fosa_s%C3%A9ptica

3.1.2 Tratamiento Primario

El objeto de este tratamiento es básicamente la remoción de los sólidos suspendidos y DBO en las aguas residuales, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación. (Melo Luna & Orjuela Guerrero, 2016)

El tratamiento primario reduce la carga orgánica presente en el agua residual antes de entrar al proceso biológico o al tratamiento secundario.

Tratamiento Secundario

Los procesos biológicos o tratamientos secundarios, se emplean para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual en floc biológico sedimentable y sólidos inorgánicos que pueden ser removidos en tanques de sedimentación. Estos procesos se emplean junto con procesos físicos y químicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual. (Zapata Restrepo, Hernandez Galvis, & Oliveros Montes, 2011)

Los tratamientos secundario remueven la mayor cantidad posible de materia orgánica reduciendo la concentración de la demanda biológica de oxígeno presente en el agua residual, existen dos tipos de tratamientos; tratamientos biológicos anaerobios y tratamientos biológicos aerobios.

Tratamientos Aerobios

Los tratamientos aerobios proporcionan a las aguas residuales a tratar, alto contenido de oxígeno para que los organismos puedan degradar la materia orgánica presenta en el agua residual a dióxido de carbono y agua en presencia de oxígeno. Las unidades de tratamiento aeróbico, usan un mecanismo de inyección y circulación de aire dentro del tanque de tratamiento. (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013)

Algunos sistemas aerobios usados en el tratamiento de aguas residuales son:

- Lodos Activados
- Filtro Percolador
- Biodiscos Rotativos

- Filtro Biológico Aireado

Tratamientos Anaerobios

El tratamiento anaerobio es el proceso de degradación de la materia orgánica por la acción coordinada de microorganismos, en ausencia de oxígeno u otros agentes oxidantes fuertes. Como subproducto de ella se obtiene un gas, denominado usualmente biogás, cuya composición básica es metano CH₄ y dióxido de carbono CO₂ en un 95%, pero con la presencia adicional de nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno, usualmente en proporciones inferiores al 1%. (Zapata Restrepo, Hernandez Galvis, & Oliveros Montes, 2011)

Algunos sistemas anaerobios usados en el tratamiento de aguas residuales son:

- Reactores UASB
- Filtros Anaerobios
- Lagunas Anaerobias
- Reactores Anaerobio de Flujo Ascendente a Pistón (RAP)

Microrganismos en el Tratamiento de las Aguas Residuales

Los microorganismos juegan un papel crucial e indispensable en los procesos de tratamientos de las aguas residuales, son los encargados de degradar la materia orgánica presente en el agua residual. Según (Bejarano Novoa & Escobar Carvajal, 2015) “Los microorganismos más comunes presentes en los flóculos de lodo activado son bacterias, hongos, protozoos y rotíferos”.

Las bacterias constituyen el grupo más importante de microorganismos en el tratamiento de aguas residuales, utilizan sustrato en solución, son heterótrofas o autótrofas, aerobias, anaerobias o facultativas. Los hongos junto con las bacterias son responsables principales de la descomposición de la materia orgánica y, a diferencia de las bacterias, pueden tolerar ambientes de humedad baja y pH ácido. (Bejarano Novoa & Escobar Carvajal, 2015)

Los protozoos pueden ser considerados como bioindicadores del estado del funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua residual, y constituyen una herramienta útil para el

control de las mismas así como para la detección y prevención de posibles problemas operativos. Adicionalmente, los protozoos son los principales consumidores de las poblaciones bacterianas en los sistemas acuáticos e intervienen en la formación de flóculos sedimentables (Luna Pabello, 2006)

Los rotíferos son organismos que se unen al flóculo y desarrollan dos importantes funciones en él: (a) eliminan las bacterias libres que no se han agregado al flóculo, y (b) contribuyen a la formación del flóculo mediante la producción de materia fecal rodeada de capas de mucus.

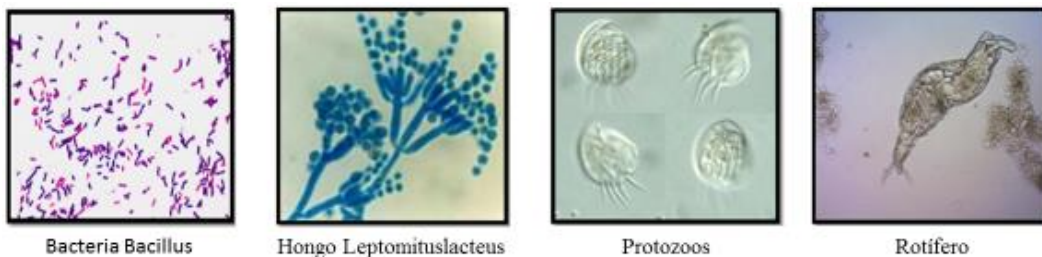


Imagen 6. Microorganismos Responsables de la Depuración de las Aguas Residuales

Fuente: (Bejarano Novoa & Escobar Carvajal, 2015) Bejarano Novoa, M. E., & Escobar Carvajal, M. (Junio de 2015). *Eficiencia del uso de Microorganismos Para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en una Planta de Tratamiento de Agua Residual*. Bogotá D.C, Colombia. Obtenido de: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18014/41091011_2015.pdf?sequence=1

3.1.3 Tratamiento Terciario

Los tratamientos terciarios son llamados también tratamientos avanzados, estos son necesarios cuando se requiere eliminar grandes presencias de nutrientes que existen en el agua residual como en nitrógeno o el fósforo. Pueden ser procesos biológicos o químicos. Un ejemplo de este tipo de tratamiento es la oxidación avanzada. Según (Alianza por el agua - España, 2006) “los tratamientos terciarios o tratamientos avanzados permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados.”

Algunos sistemas de tratamiento terciario o tratamiento avanzado son:

- Intercambio Iónico
- Precipitación
- Coagulación
- Adsorción
- Oxidación Química
- Oxidación Avanzada por tecnología ultravioleta (UV)



Imagen 7. Oxidación Ultravioleta.

Fuente: (Oxicom Grup , 2016) Oxicom Grup. (16 de Marzo de 2016). *Oxicom*. Obtenido de Oxicom: <http://oxicom.es/product-tag/ultravioletas/>

3.2 Tecnologías

En el marco de cooperación entre la Universidad Católica de Manizales y la empresa del servicio de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Manizales, Aguas de Manizales, se realizó una revisión del estado del arte de las siguientes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales urbanas:

- Filtro Percolador (FP)
- Reactor Biológico Secuencial (SBR)
- Lodos Activados Convencionales
- Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS)
- Biodiscos Rotativos (CBR)
- Reactor Biológico de Membrana (MBR)
- Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR)
- Filtro Biológico Aireado (BAF)

Los sistemas mencionados anteriormente fueron propuestos por las empresas licitadoras del diseño y construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Manizales.

El agua residual antes de entrar a un tratamiento biológico o secundario debe someterse a un pretratamiento y a un tratamiento secundario con la finalidad de remover arenas, aceites y grasas, solidos grandes, solidos suspendidos y materia orgánica (DBO).

En existen diferentes formas de pretratamiento del agua residual para las tecnologías estudiadas en la presente tesis (Figura 2 y 3), la primera se conforma por rejillas de desbaste, desarenador y trampa de grasas (Imagen 2, 3, y 4), la segunda forma de realizar el pretratamiento es a través de un pozo séptico (imagen 5). El tratamiento primario se realiza a través de sedimentadores.

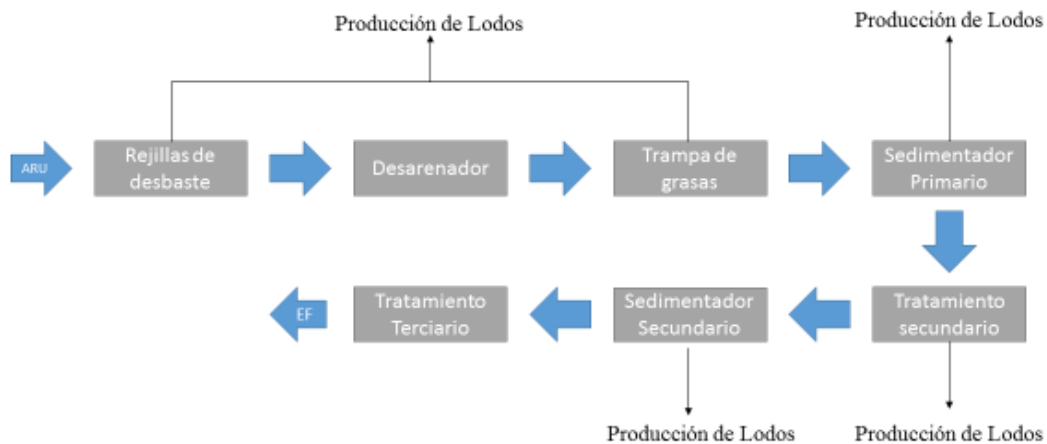


Figura 2. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas con Pretratamiento de Rejillas, desarenador y trampa de grasas.

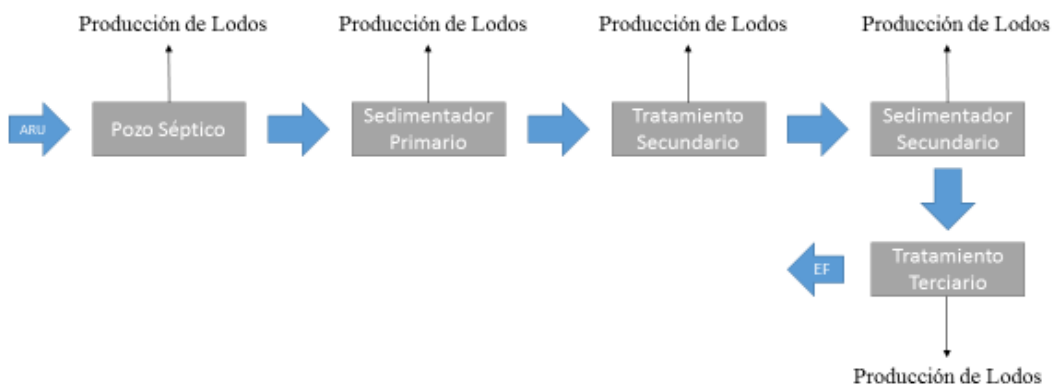


Figura 3. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas con Pretratamiento de Pozo Séptico.

Las tecnologías estudiadas en la presente tesis corresponden a tratamientos o sistemas secundarios, en dichos sistemas se remueve la materia orgánica, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, solidos suspendidos totales, entre otros. Cada tecnología trabaja con un principio físico diferente, algunas son mejoras de otras, la eficiencia de remoción varía entre cada una de ellas.

3.2.1 Filtro Percolador



Imagen 8. Filtro Percolador.

Fuente: (Tratamiento del agua, 2015) Tratamiento del agua. (10 de Abril de 2015).
Tratamientodelagua. Obtenido de *tratamientodelagua:*
<http://www.tratamientodelagua.com.mx/filtros-percoladores-1/>

Filtración - Percolación

El proceso de filtración es aquella operación de separación sólido – fluido en la que se produce la separación de partículas sólidas o gotas de líquidos o gases a través de un medio filtrante – filtro, aunque a veces se utiliza en otros procesos de separación. En el caso de filtración sólido líquido, el líquido separado se denomina filtrado, efluente, permeado o agua clara. (Martín, Salcedo, & Font, 2011) La percolación es el flujo del agua o de otro líquido a través de los poros o espacios muy pequeños de una capa permeable (Universidad Tecnológica de Panamá, 2006)

Generalidades

Los filtros percoladores pertenecen a un tipo de reactores de crecimiento asistido, esto quiere decir que los microorganismos crecerán en un medio de soporte dentro del reactor, el medio de soportes suelen ser módulos de plástico, piezas de plástico o rocas (Imagen 9).

El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual. Normalmente el agua residual se distribuye en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno mediante un distribuidor rotativo del flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo. (Ralmalho, 1990)

Los sistemas de filtro percolador tienen varios componentes, un pozo séptico, un tanque de dosificador/sedimentador, un filtro percolador y un campo de aplicación superficial, que trabajan en conjunto para mejorar la calidad del efluente. (Enciso, 2002)

Componentes del Sistema de Filtro Percolador:

1. Pozo Séptico: Elimina los sólidos los cuales se asientan y elimina las grasas.
2. Tanque dosificador/Sedimentador: Es un tanque de hormigón o de fibra de vidrio que permite que los materiales biológicos se sedimenten del agua. También tiene una bomba para dosificar el agua por encima del filtro.
3. Filtro Percolador
4. Sedimentador secundario



Figura 4. Tren de Tratamiento Filtro Percolador

Características

Los filtros percoladores por lo general miden entre 1 a 12 metros de profundidad, están rellenos de materiales como rocas, módulos de plástico o piezas de plástico como se muestra en la Imagen 9, el agua residual se percola a través del relleno poniéndose en contacto con la capa de limo biológico, es decir que el agua residual se percola a través de las piezas de plástico o piedras poniéndose en contacto con los microorganismos quienes se encargan de degradar la materia orgánica.

Para el correcto funcionamiento del filtro percolador es necesaria una etapa de pretratamiento en donde se eliminarán sólidos grandes, arenas y grasa, una etapa de sedimentación para eliminar sólidos más pequeños y evitar acumulaciones futuras dentro del filtro percolador y finalmente un sedimentador para la eliminación de los lodos producidos en el reactor (Figura 4).



Imagen 9. Relleno de Piedras, Pieza de Plástico y Módulos de Plástico.

Fuente: (Observatorio del agua el salvador, 2015) Observatorio del agua el salvador. (2015). *Filtro Percolador*. Obtenido de Observatorio del Agua de El Salvador: http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAguas2015/FiltroPercoladorFinal_Sup-Costes.pdf

Existen diferentes configuraciones para utilizar el filtro percolador, la escogencia dependerá del criterio y necesidades con el que se pretenda diseñar una planta de tratamiento de aguas

residuales, costos, normativa respecto a la remoción y máximos permisibles entre otros (Figura 5).

La configuración tipo A es la más sencilla, consiste en pasar el agua tratada directamente a un sedimentador y de allí sale como efluente final, en esta configuración puede o no existir recirculación de agua, esto dependerá principalmente del porcentaje de remoción que se desea alcanzar.

La configuración tipo B consiste en pasar el agua pretratada en dos filtros percoladores y dos tanques de sedimentación, el agua pretratada se dividirá en dos caudales el primero pasará por el filtro percolador I, sedimentador I, filtro percolador II, sedimentador II y finalmente como efluente final, el segundo caudal entrará en el filtro percolador II, sedimentador II, filtro percolador I, sedimentador I y finalmente como efluente final, el propósito de esta configuración es doble, como primera medida se realiza para aumentar el eficiencia del sistema y como medida cautelar, es decir, si un filtro percolador falla se tiene el segundo filtro para tratar el agua residual.

La configuración tipo C consiste en pasar el agua en un filtro percolador I, Sedimentador I, filtro percolador II, sedimentador II y finalmente sale como efluente final.

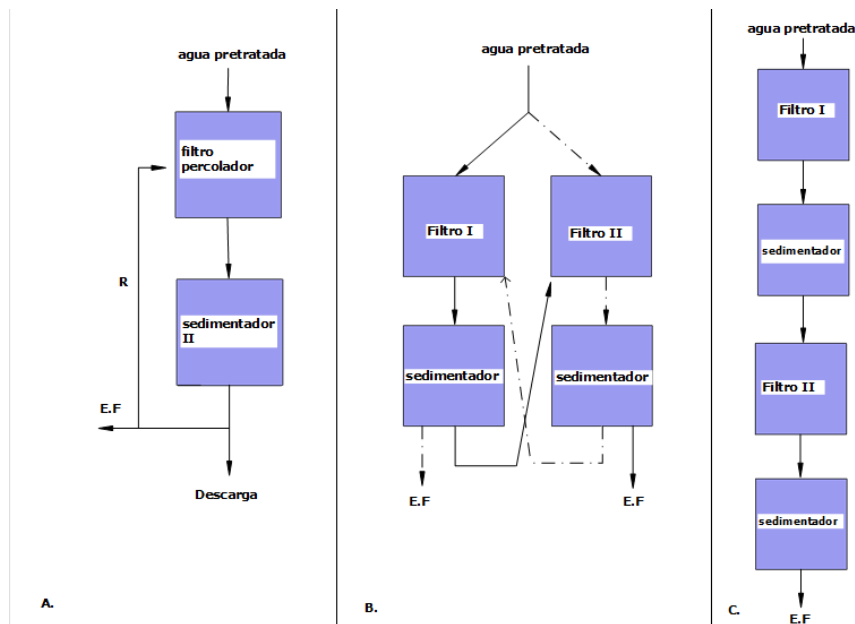


Figura 5. Configuraciones Posibles Para el Filtro Percolador.

Fuente: (Ramalho, 1996). Ramalho R. (1996). *Filtros Percoladores*. Obtenido de Tratamientos de Aguas Residuales: http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/FILTROS_PERCOLADORES.pdf

Tipos de Relleno

El material de relleno es fundamental en la tecnología de filtro percolador ya que en él es donde se desarrollarán los microorganismos que intervienen en el proceso de depuración.

El relleno debe permitir un buen contacto entre el agua a tratar y el aire circulante con la biopelícula fijada (los microorganismos sobre el material de plástico o roca) y, al mismo tiempo, la evacuación de los lodos que se va desprendiendo del soporte para evitar la colmatación del filtro, es decir, que el filtro no sufra de estancamiento del agua residual durante el proceso. (Obsevatorio del agua el salvador, 2015)

Los principales materiales de relleno (como se muestra en la imagen 9) en un filtro percolador son:

- Piedra
- Piezas de plástico
- Módulos de plástico

En la tabla 1 se comparan los tipos de relleno de acuerdo con su tamaño, densidad, superficie específica e índice de huecos. Para escoger el tipo de relleno que llevará un filtro percolador dependerá de los parámetros de diseño.

Tabla 1. Comparación Entre Cada Material de Relleno.

Tipo de soporte	Tamaño (mm)	Densidad (kg/m ³)	Superficie específica (m ² /m ³)	Índice de huecos (%)
Piedra	50-100	1,44	40	60
Pieza de plástico	Variable	32-64	85-100	>95
Módulo de soporte	600*600*1200	32-80	85-110	>95

Fuente: (Ramalho, 1996). Ramalho R. (1996). *Filtros Percoladores*. Obtenido de Tratamientos de Aguas Residuales:

http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/FILTROS_PERCOLADORES.pdf

Superficie específica (m²/m³): Mide el área expuesta del material de relleno por unidad de volumen, a mayor superficie específica, mayor capacidad para la fijación de la película bacteriana y, por tanto, mayor capacidad de tratamiento del filtro percolador. Esta superficie debe ser superior a 40 m²/m³

Índice de huecos (%): A mayor índice de huecos, menos riesgo de colmatación del material de relleno. Cuanto mayor es la carga orgánica aplicada al filtro percolador, mayores deben ser las dimensiones de los huecos o intersticios, dado que la biopelícula que se forma, bajo estas condiciones, presenta un mayor espesor. Este índice debe ser siempre superior al 50% y el tamaño de los huecos, o intersticios, nunca debe ser inferior a 1-1,5 cm.

Densidad (kg/m³): Entre más baja sea la densidad del material de relleno mayores alturas se permitirán en el diseño del filtro percolador, por lo tanto, se necesitará un menor espacio.

Tipos de Filtro Percolador

Existen cuatro tipos de filtro percolador los cuales se diferencian por la cantidad de carga orgánica con la que trabaja Cada tipo de filtro presenta porcentajes de remoción diferentes en cuanto a DBO se refiere (tabla 2).

Tabla 2. Tipos de Filtros Percoladores Según la Carga con la que Trabajan.

Tipo de filtro	Carga orgánica (KgDBO ₅ /m ³ d)	Remoción de DBO ₅ (%)
Baja tasa	0,4	80-90
Tasa intermedia	0,64	50-70
Alta Tasa	0,64-1,60	65-85
Filtro de desbaste	1,60-4,80	40-65

Fuente: (Observatorio del agua el salvador, 2015) Observatorio del agua el salvador. (2015). *Filtro Percolador*. Obtenido de Observatorio del Agua de El Salvador: http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAguas2015/FiltroPercoladorFinal_Sup-Costes.pdf

Filtro Percolador de Baja Tasa

Tratan cargas por debajo de 0,4 kg DBO₅/m³d. Suelen tener lecho de piedra de 1,5 a 2,5 m de altura y se alimentan en cortos intervalos de tiempo a través de sifones que proporcionen la carga hidráulica necesaria. No precisan de recirculación en condiciones normales de funcionamiento, es decir sin puntas de cargas y con objetivos de rendimiento por debajo del 90%. El rendimiento que se alcanza en DBO₅ es del orden del 85%.

Filtros Percoladores de Mediana Tasa

Tratan cargas entre 0,4 a 0,8 kg DBO₅/m³d. Pueden ser lechos de piedra como máximo de 3m de altura o de plástico de hasta 5m de altura, con alimentación en continuo. Para asegurar

una buena distribución del efluente sobre el filtro, se suele recircular parte del agua clarificada en el sedimentador secundario, entre 0-1 veces el caudal medio de entrada. El rendimiento que se alcanza en DBO₅ es del orden del 60-70%.

Filtros Percoladores de Alta Tasa

Tratan cargas entre 0,8-1,6 kg DBO₅/m³d. Este tipo de filtros consiguen rendimientos menores que los anteriores en eliminación de materia orgánica y suelen operar como pretratamiento de otro proceso, o requerir de una segunda etapa para llegar al 80% de eliminación de DBO₅.

Trabajan normalmente en continuo, con cargas hidráulicas elevadas, por lo que precisan de una recirculación de entre 1-2 veces el caudal medio de entrada, para mantener estas condiciones. Este tipo de filtros suelen utilizar plástico como relleno. Los rendimientos en DBO₅ rondan el 70%

Filtro de Desbaste

Los filtros de este tipo generalmente tienen una carga de diseño que oscila entre 160-480 kg de DBO₅/100 m³d y su rendimiento no supera el 65% de remoción de DBO₅.

Porcentaje de Remoción

Como se muestra en la tabla 3, el sistema de filtro percolador presenta una remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno del 80% al 90%, una remoción de los Sólidos Suspendidos Totales del 80% al 90% y de la Demanda Química de Oxígeno del 70% al 80%.

Tabla 3. Porcentaje de Remoción del Filtro Percolador.

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO	80
SST	80
DQO	70

Ventajas y Desventajas del Filtro Percolador

El filtro percolador como cualquier tipo de tecnología para el tratamiento de agua residual presenta ventajas y desventajas, estas se muestran en la tabla 4. Entre las ventajas que presenta el sistema de filtro percolador se encuentra que no se requiere de grandes extensiones de tierra para su implementación en comparación con otras tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, esto se debe a que el filtro basa su funcionamiento en la caída del flujo a tratar por lo que necesita ser más alto que ancho, dentro de las desventajas se encuentra la constante atención del operario encargado, esto es debido a que dentro del soporte del filtro se acula la biomasa generada afectado el rendimiento del filtro.

Tabla 4. Ventajas y Desventajas del Filtro Percolador.

Ventajas	Desventajas
Proceso biológico sencillo y confiable	Puede ser necesario un tratamiento adicional para cumplir con las normas de descargas dependiendo el país
Adecuando en áreas donde grandes extensiones de tierra no están disponibles	Posible acumulación de biomasa lo cual perjudica el rendimiento del sistema
Eficaz para el tratamiento de altas concentraciones de sustancias orgánicas	Requiere constante atención del operador
Apropiado para comunidades pequeñas y medianas	Problemas del caracol
Bajos requerimientos energéticos	La flexibilidad y el control son limitados en comparación con otros procesos biológicos

Nivel moderado de habilidad de conocimientos técnicos necesarios para administrar y operar el sistema	Problema de vectores y olores
Reduce rápidamente la DBO soluble	

Fuente: (CAR Cundinamarca, 2011) Cundinamarca. (Junio de 2011). *Información compilada de los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Puchukollo



Imagen 10. Filtros Percoladores de la PTAR Puchukollo.

Fuente: (Naciones Unidas, 2011) Naciones Unidas. (Junio de 2011). *Estudio de Caracterización de las Aguas Residuales Afluentes al Sistema de Tratamiento de Puchukollo*. La Paz. Obtenido de http://www.bivica.org/upload/ag_aguas-residuales.pdf

Según (Iagua, 2018), la PTAR de Puchukollo opera desde el año 1998, ocupa un área de 127 hectáreas y se destinaron 48 hectáreas para la construcción de dos series de lagunas. En el año 2013 se realizó una ampliación donde se construyeron tres filtros percoladores y cárcamos de bombeo que abarcan 2 hectáreas.

Según (Naciones Unidas, 2011) la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Puchukollo presenta unos porcentajes de remoción de 80% de DBO, 79% de DQO, 85% de SS, 24% de Fosforo y 15 de Nitrógeno.

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Filtro Percolador como Tratamiento secundario

- Annacis Island Wastewater Treatment Plant (WWTP)

Ubicación: Vancouver, Canadá

Caudal promedio: 5,7 m³/s

- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Managua

Ubicación: Nicaragua

Caudal promedio: 2,0 m³/s

- Duck Creek Wastewater Treatment Plant

Ubicación: Galdand, Texas, USA

Caudal Promedio: 1,8 m³/s

- Boulder WWTP

Ubicación: Boulder, Colorado, USA

Caudal promedio: 2,0 m³/s

- Aguas Calientes WWTP

Ubicación: México

Caudal promedio: 2,0 m³/s

3.2.2 Reactor Biológico Secuencial (SBR)



Imagen 11. Reactor Biológico Secuencial (SBR).

Fuente: (iagua, 2015) iagua. (15 de Octubre de 2015). *Iagua*. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/noticias/aema/15/10/15/aema-ampliara-depuradora-bodegas-lopez-morenas-fuente-maestre-badajoz>

Generalidades

El Reactor Biológico Secuencial (SBR) fundamenta su funcionamiento en un sistema de llenado y vaciado. Todos los procesos se llevan a cabo en un solo reactor y siguen una secuencia de llenado, reacción, reposo, sedimentación y vaciado (Figura 6). Según (Paredes, 2014) “La configuración del ciclo depende de las características del agua residual y los requisitos legales a cumplir, y sigue fundamentalmente las siguientes etapas:”

- Etapa de llenado
- Etapa de reacción
- Etapa de reposo
- Etapa de sedimentación
- Etapa de vaciado

Como todo tratamiento biológico, la eliminación de la materia orgánica se realiza gracias a la acción de los microorganismos dentro del reactor. La tecnología SBR funciona con presencia de oxígeno en la etapa de reacción.

El Reactor Biológico Secuencial requiere de un pretratamiento donde se eliminen sólidos, grasas y aceites, también necesita de un tratamiento primario, un homogeneizador, filtración y desinfección (Figura 7).

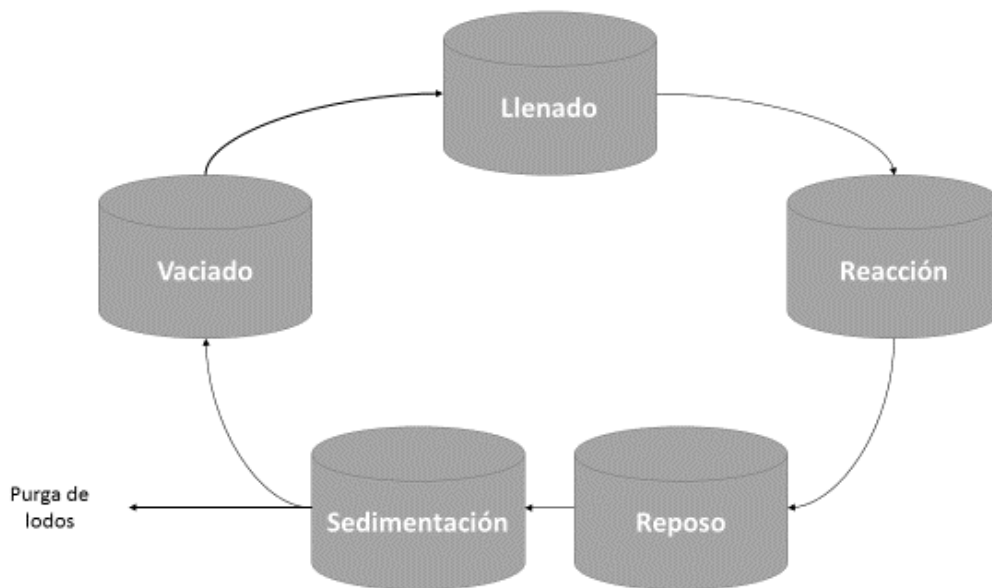


Figura 6. Etapas de Funcionamiento de un Reactor Biológico Secuencial.

Descripción de las Etapas

Llenado

En esta etapa el efluente entra en el tanque y se pone en contacto con la biomasa que se encuentra en el reactor, el reactor recibe el flujo hasta llenarse.

Reacción

En la etapa de reacción se llevan a cabo los procesos biológicos que permiten remover la materia orgánica gracias a la acción microbiana, la nitrificación y desnitrificación.

Reposo

En esta etapa los lodos producidos en la etapa de reacción se decantan por gravedad al fondo del reactor dejando el agua clarificada en la parte superior del tanque.

Sedimentación

En la etapa de sedimentación los sólidos terminan de decantarse por la acción de la gravedad, finalmente se extraen los lodos producidos en el reactor.

Vaciado

En esta etapa se evacua el agua clarificada, se descarga hasta cierto nivel del reactor según los parámetros de diseño esto puede variar entre el 75% hasta el 15%.

Los ciclos para aguas residuales urbanas suelen ser de 2 a 6 ciclos por día, la duración de cada ciclo suele ser de 4 o 6 horas.

Proceso

En una planta de tratamiento de aguas residuales, el afluente generalmente pasa a través de rejillas y desarenadores antes de llegar a los SBR. Las aguas residuales entonces entran en un reactor discontinuo parcialmente lleno con biomasa que se ha aclimatado a los componentes de las aguas residuales. Una vez que el reactor se llena, se comporta como un sistema convencional de lodos activados, pero sin flujo continuo de entrada y de salida. La "carga" de las aguas residuales tratadas, por lo general es trasladada a un depósito de homogeneizador de caudales, filtrada para eliminar los sólidos adicionales, y desinfectada. Los SBR pueden alcanzar una buena remoción de DBO y nutrientes. (CAR Cundinamarca, 2011)

El uso de energía de este sistema se encuentra dentro de un rango similar al de lodos activados convencionales

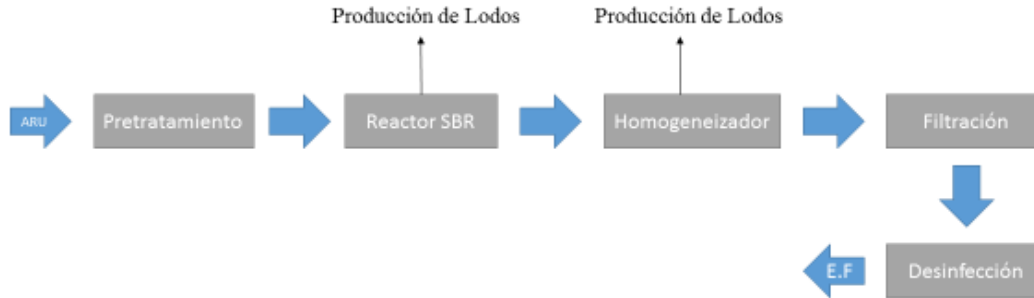


Figura 7. Tren de Tratamiento para el Reactor Biológico Secuencial.

Se debe enfatizar también que normalmente los sedimentadores primarios no son requeridos con anterioridad al SBR en aplicaciones de aguas residuales municipales. En la mayoría de las plantas de sistemas convencionales de lodos activados se requiere el uso de sedimentadores primarios antes del sistema biológico. Sin embargo, el uso de sedimentadores primarios puede ser recomendado por el fabricante del sistema SBR si el total de sólidos suspendidos totales (SST) o la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son mayores a valores entre 400 y 500 mg/L. El historial de datos debe ser evaluado para determinar si es recomendable el uso de sedimentadores primarios o la homogenización de caudales para aplicaciones municipales o industriales. (EPA, 1999)

En algunos casos el tratamiento biológico y el homogeneizador pueden lograrse dentro del reactor SBR.

Porcentaje de Remoción

La efectividad de un sistema SBR es comparable a la de sistemas convencionales de lodos activados y depende del diseño del sistema y de criterios específicos del sitio de la planta. Los sistemas SBR logran una buena remoción de DBO y nutrientes dependiendo del modo de operación. Para los SBR la eficiencia de remoción de DBO generalmente es del 85 al 95 por ciento. (EPA, 1999)

El Reactor Biológico Secuencial presenta eficiencia de remoción de 92% para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), 70 % para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), 47% de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y 44 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).

Tabla 5. Porcentaje de Remoción de un Reactor tipo SRB.

Parámetro	Porcentaje de Remoción
DBO	92
DQO	70
SST	47
SSV	44

Ventajas y Desventajas

La tabla 6 se muestran las ventajas y desventajas que presenta el reactor biológico secuencial, las ventajas más importantes son la de no requerir una bomba para el retorno de lodos y el sedimentador secundario es de menor tamaño, esto permite reducir los costos de inversión, dentro de las desventajas se encuentra el riesgo de taponamiento en los dispositivos de aireación, esto afecta directamente el rendimiento del sistema e incluso podría ocasionar una suspensión del sistema.

Tabla 6. Ventajas y Desventajas de un Reactor tipo SRB.

ventajas	Desventajas
Toleran variaciones de carga orgánica	Requiere mayor mantenimiento que lodos activados convencional
Eficiente en la eliminación de DBO, Nutrientes (N y P) y compuestos refractarios	Riesgo de taponamiento en los dispositivos de aireación durante los ciclos operativos
Permite mayor control sobre el crecimiento de microorganismos filamentosos	La presencia de compuestos tóxicos puede afectar significativamente el rendimiento del reactor

Mayor retención de Biomasa en comparación a otras tecnologías como lodos activados convencionales	Requiere de ecualización después del SBR, dependiendo de los procesos posteriores
Los Reactores Biológicos Secuenciales requieren de un área superficial de construcción menor a la de otros sistemas convencionales de Lodos Activados pues permiten eliminar la necesidad de sedimentadores primarios y secundarios	Debido a los controles automatizados y el equipo temporizado, los Reactores Discontinuos Secuenciales presentan costos de operación y mantenimiento mucho más altos comparados con los sistemas convencionales de Lodos Activados.
Requiere menor espacio que el sistema de lodos activados convencional	
Sin impacto visual, puede ser instalado bajo tierra.	
Generalmente no requiere sedimentador primario	
Menores costos de inversión al no requerir bomba para el retorno de lodo	

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2011) Hazen and Sawyer. (2011) *MEMORIA TÉCNICA DE LA SELECCIÓN JUSTIFICADA DE TRES SISTEMAS DE TRATAMIENTO VIABLES*. Bogotá. Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec91983d9dd.pdf>

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Funza



Imagen 12. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Funza.

Fuente: (El Tiempo, 2015) El Tiempo. (3 de Noviembre de 2015). Cuatro municipios hacen la tarea para sanear el río Bogotá. *El Tiempo*. Obtenido de: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16419363>

Según (El Tiempo, 2015), “La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del Municipio de Funza fue optimizada con un costo alrededor de 7.000 millones de pesos colombianos, y trata alrededor de 8.000 m³ de agua al día usando como tratamiento biológico la tecnología de Reactor Biológico Secuencia (SBR) y cumplimiento con la normativa sobre vertimientos”.

Según (Caracol Radio, 2015) “La PTAR del municipio de Funza beneficia alrededor de 100.000 personas, fue financiada en un 35% por la Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca y en un 65% por el municipio de Funza. Además la PTAR alcanza un porcentaje de remoción de contaminantes del 95%. Las aguas tratadas son vertidas al Humedal Güali”

Según un artículo sin fecha de SolucionesBless (<http://www.solucionesbless.com/emaaf2/images/archivos/servicios/PTAR.pdf>) la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de Funza funciona con un Pretratamiento que consiste en rejas de cribado, bombeo y desarenador, un tratamiento primario que consiste en tamices de cribado fino, tratamiento secundario que consiste en un Reactor Biológico Secuencia y un sedimentador secundario, además hacen tratamiento de lodos a través de lechos de secado.

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Reactor Biológico Secuencial como Tratamiento secundario

- Cardiff Gales WWTP

Ubicación: Cardiff, Gales

Caudal promedio: 3,5 m³/s

- Ringsend WWTP

Ubicación: Dublin City, Irlanda

Caudal promedio: 5,6 m³/s

3.2.3 Lodos Activados Convencionales



Imagen 13. Lodos Activados.

Fuente: (Ingeniería y Servicios Ambientales ISA, 2015) Ingeniería y Servicios Ambientales ISA. (22 de Octubre de 2015). *Isa.ec*. Obtenido de isa.ec: <http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/lodos-activados-vs-contactores-biologicos-rotatorios-rbc-s-vs-reactores-de-lecho-fijo-movil>

Generalidades

El tratamiento de aguas residuales con lodos activados es la tecnología más difundida en todo el mundo. Lodos activados son un tratamiento biológico para aguas residuales industriales o aguas residuales domésticas que se llevan a cabo dentro de un reactor, consiste en agitación y aireación en una mezcla de agua residual y un lodo de microorganismos. Los microorganismos oxidan la materia orgánica llevándola a una forma más estable y menos contaminante. Se debe proporcionar constantemente oxígeno al reactor.

Los microorganismos se utilizan para oxidar la materia orgánica coloidal y soluble, convirtiéndola en dióxido de carbono y agua, en presencia de oxígeno molecular. Este proceso es usualmente precedido por una sedimentación primaria. La mezcla de microorganismos y aguas residuales producida en los tanques de aireación es conocida como licor mixto, y se transfiere a los sedimentadores para la separación de líquidos y sólidos. (CAR Cundinamarca, 2011)

En los lodos activados, la materia orgánica sirve como fuente de energía para la producción de nuevas células en presencia de oxígeno. La transferencia de oxígeno proveniente del aire a las aguas residuales se puede hacer mediante aireadores superficiales o sumergidos. La aireación por difusores sumergidos es generalmente más eficiente que la conseguida con aireadores mecánicos superficiales. (Hazen and Sawyer, 2011)

Proceso

En el proceso de lodos activados los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de sustrato alimenticio. Es importante indicar que la mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos superficiales o sopladores sumergidos, los cuales tiene doble función 1) producir mezcla completa y 2) agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle. (Aguas residuales word press, 2008)

Todas las aguas negras sedimentadas se mezclan con los lodos activados recirculados a la entrada del tanque de aireación. El volumen de lodos recirculados es de 20 a 30% del volumen de aguas residuales que se van a tratar. Los tanques de aireación se diseñan de manera que proporcionen un tiempo de residencia hidráulica de seis a ocho horas. (Valencia, 2003)

Es importante resaltar que el tratamiento de las aguas residuales con la tecnología de lodos activados necesita de un pretratamiento que se hace generalmente con rejillas de cribado, trampa de grasas y desarenador, también se necesita un sedimentador primario y un sedimentador secundario, del sedimentador secundario se recirculan los lodos generados allí hacia el reactor de lodos activados, esto con el fin de obtener la mayor eficiencia de remoción de contaminantes (Figura 8).



Figura 8. Tren de Tratamiento para Lodos Activados.

En el proceso de lodos activados, los clarificadores primarios son generalmente usados para reducir la carga orgánica y de sólidos, y clarificadores secundarios son requeridos para sedimentar la biomasa producida en el tratamiento biológico (Hazen and Sawyer, 2011)

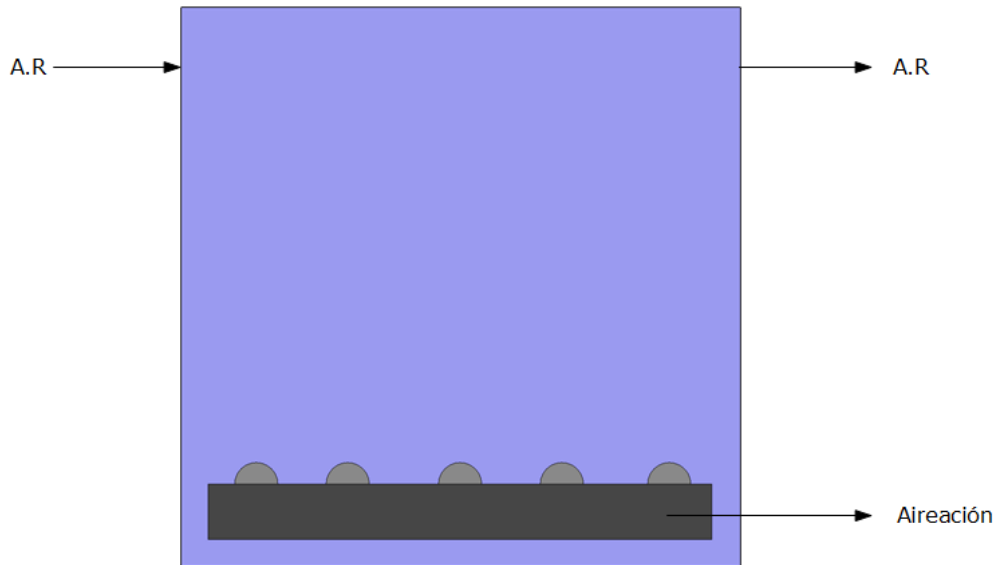


Figura 9. Reactor de Lodos Activados.

Porcentaje de Remoción

Lodos activados remueve entre el 90 y 95% de la DBO y entre 85 y 95% de los sólidos suspendidos totales del agua residual tratada como se aprecia en la tabla 12.

Ventajas y Desventajas

Dentro de las ventajas que presenta el sistema de lodos activados se encuentra que es un proceso muy utilizado en Colombia por lo que se puede obtener gran cantidad de referencias en cuanto la conveniencia de aplicar esta tecnología en la ciudad de Manizales, además, es altamente eficiente para la remoción de contaminantes. En cuanto a las desventajas se encuentra que es un proceso costoso debido a la constante aireación que necesita el reactor para cumplir con la eficiencia esperada.

Tabla 7. Porcentaje de Remoción de un Proceso de Lodos Activados.

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO	90
SST	85
Nitrógeno Total	70
Fosforo Total	70
Coliformes fecales	60
DQO	73

Tabla 8. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Lodos Activados.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia de remoción de carga orgánica	Requiere un mantenimiento cuidadoso y sofisticado
Minimización de olores y vectores	Dependencia de la temperatura del efluente a tratar
Se puede incorporar desnitrificación al proceso	Riesgo de taponamiento en los dispositivos de aireación
Es un proceso muy común en Colombia lo que permite conocer experiencias nacionales	Requiere un control permanente tanto operativo como análisis de laboratorio
Bajo costo inicial	Alta producción de lodos
Buena confiabilidad de las unidades de proceso	Altos costos operacionales debido a la aireación
Mínimo riesgo de producción de olores	Requerimiento de 4 a 8 horas como tiempo de aireación

Alta experiencia a nivel mundial

Complejidad operacional por el mantenimiento de los difusores

Fuente: (CAR Cundinamarca, 2011) Cundinamarca. (Junio de 2011). *Información compilada de los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*.
Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre – Bogotá



Imagen 14. Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre.

Fuente: (El Nuevo Siglo, 2016) El Nuevo Siglo. (23 de Mayo de 2016). Inicia ampliación de la PTAR Salitre. *EL NUEVO SIGLO*. Obtenido de: <http://elnuevosiglo.com.co/articulos/5-2016-inicia-ampliacion-de-ptar-salitre>

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas El Salitre se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá en la calle 80 entre las localidades de Suba y Engativá. Según (El Nuevo Siglo, 2016) “En el año 2016 se inició las obras de ampliación de la PTAR Salitre con un costo superior a los \$430 millones de dólares, la ampliación surge gracias a la gestión de crédito de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca con el Banco Mundial”.

Según (El Espectador, 2018) “La PTAR salitre Servirá para tratar el 80% de las aguas residuales que producen los residentes entre la calle 26 y la 220, lo equivalente a tratar 605 millones de litros diarios de agua residual, es decir, pasará de tratar 4 m³/s de aguas residuales a 7 m³/s. Además, mediante un proceso avanzado se estabilizará los lodos convirtiendo la

materia orgánica en gas metano con la finalidad de suministrar alrededor del 30% de la energía que requiere la planta para su funcionamiento”.

La Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre cuenta con un proceso biológico aerobio de Lodos Activados.

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Reactor de Lodos Activados Convencionales como Tratamiento secundario

- PTAR Detroit

Ubicación: Detroit, USA.

Caudal promedio: 31,7 m³/s

- PTAR Stickney

Ubicación: Chicago, USA.

Caudal promedio: 26,4 m³/s

- PTAR Seine Aval

Ubicación: París, Francia.

Caudal promedio: 19,66 m³/s

- PTAR Gabal El-Asfar

Ubicación: El Cairo, Egipto

Caudal promedio: 19,66 m³/s

- PTAR Bailonggan

Ubicación: Shangai, China.

Caudal promedio: 13,8 m³/s

- PTAR Gaobeindian

Ubicación: Beijing, China.

Caudal promedio: 11,56 m³/s

- PTAR la Farana

Ubicación: Santiago de Chile, Chile.

Caudal promedio: 8,80 m³/s

3.2.4 Lodos activados con película integrada fijas (IFAS)



Imagen 15. Lodos Activados con Película Integrada fija (IFAS).

Fuente: (Tratamiento del Agua, s.f.) Tratamiento del Agua (s.f). *Lodos Activados de Lecho Fijo (IFAS)*. Obtenido de Tratamiento del Agua: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/sample-page/>

Generalidades

Lodos activados con película integrada fija (IFAS) es una tecnología relativamente nueva que describe cualquier sistema de crecimiento de microorganismos en suspensión, esta tecnología incorpora un medio de cultivo fijo en el reactor (EPA, 2010)

Existen dos tipos de biomasa: una parte se desarrolla en forma de biomasa floculada de tipo lodo activado, la otra se fija sobre los soportes móviles en suspensión en el fango activado. (Degrémont S.A, 2012)

Este proceso se utiliza por lo general para mejorar el agua de salida de plantas de tratamiento de aguas residuales ya existentes que funcionan utilizando como reactor biológico la tecnología de lodos activados convencionales, la finalidad de esta mejora es aumentar la densidad de la población bacteriana que degradará la materia orgánica presente en el agua residual.

Como todo tratamiento biológico, el agua residual requiere pasar por un pretratamiento para la separación de sólidos, grasas y aceites y un tratamiento primario antes de ingresar al reactor IFAS.

Se estima que el costo de inversión de un sistema IFAS es mayor que el de lodos activados debido a la energía adicional requerida para mantener el medio en suspensión. Los costos de operación y mantenimiento dependen de la calidad deseada en el efluente. Sin embargo son muy similares a los de un proceso de lodos activados. (Hazen and Sawyer, 2011)



Figura 10. Tren de Tratamiento para Lodos Activados con Película Integrada Fija.

La tecnología IFAS consisten en dentro de un reactor convencional de lodos activados implementar soportes, los soportes pueden ser de diferentes materiales desde piezas de plástico e incluso cuerdas corrientes. En la figura 11 se observa un reactor de lodos activados con película integrada visto desde arriba. Es importante elegir el tipo de bacteria que crecerá en el lecho fijo si es que se desea obtener una nitrificación y desnitrificación adecuado.

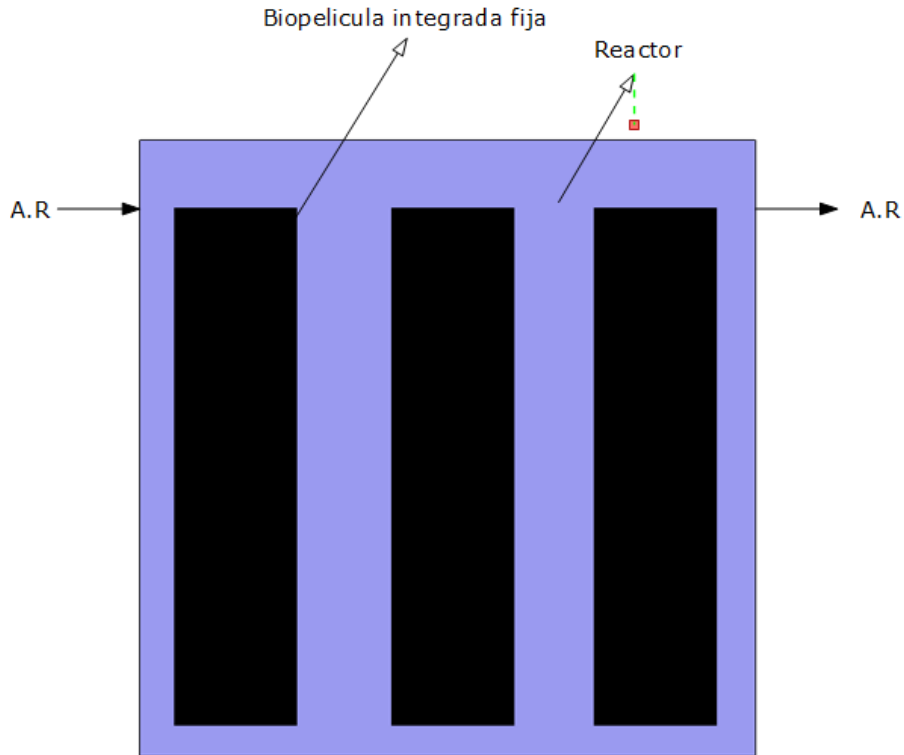


Figura 11. Reactor de Lodos Activados con Película Integrada Fija.

Proceso

Es un proceso similar al lodo activado, pero la biomasa fija combina las zonas aerobias, anaerobias y anóxicas y aumenta el tiempo de retención de Lodos, promoviendo una mejor nitrificación en comparación con sistemas de crecimiento suspendido simple. (BRENTWOOD, 2009) Mejorando la eficiencia del sistema (tabla 9). El sistema de lodo activado en película integrada fija (IFAS) presenta ventajas que se evidencian en la tabla 10. Es un proceso estable y mejorado, aumentando la eficiencia del proceso en cuanto a una mejora en la nitrificación, se reduce la producción de lodos entre otros.

La ventaja de los IFAS sobre los lodos activados convencionales es que permiten una expansión significativa del tratamiento sin la necesidad de proveer tanques de aireación adicionales, lo cual resulta muy efectivo para la remoción de nutrientes biológicos. Esta alternativa de tratamiento secundario también posee una alta resistencia a choques de carga y aumenta significativamente la capacidad de los sedimentadores existentes. A diferencia del

sistema convencional de lodos activados, esta tecnología requiere un mayor control de los procesos y mantenimiento de las unidades. Esto, debido a que es necesario llevar a cabo un estricto control de la biopelícula en el medio y un mantenimiento adecuado de este (CAR Cundinamarca, 2011)

Porcentaje de Remoción

Lodos activados con película integrada fija es una versión mejorada de lodos activados lo que le permite en teoría obtener mejores resultados en cuanto a remoción de parámetros indicadores de deterioro del agua, además reduce la producción de costos, sin embargo es más costosa que los lodos activados convencionales tanto para construcción como en la operación y mantenimiento.

Tabla 9. Porcentaje de Remoción para Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS).

Parámetro	Porcentaje de remoción
DQO	95
PT	70
NT	75

Fuente: (Sriwiriyarat, 2015) Sriwiriyarat, T. (2015). Evaluation of integrated fixed film activated sludge Wastewater Treatment Processes at Hing Mean Cells Residence Time And Low Temperatures. *M.ASCE*.

Ventajas y Desventajas

Tabla 10. Ventajas y Desventajas del Proceso de Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS).

Ventajas	Desventajas
Se reduce la producción de lodos debido a que la mayoría de las bacterias crecerán en los soportes y no estarán suspendidas en el agua	Se requiere constante aireación en el sistema
Es un proceso estable	Las piezas mecánicas son de difícil disponibilidad
Aumenta la biomasa sin aumentar la carga al sedimentador secundario	Mayor número de aireadores son necesarios dado al aumento de la biomasa en el medio
Es una versión mejorada del sistema de lodos activados convencional	Altos costos de operación debido a la aireación
Mayor capacidad por volumen comparada con los lodos activados convencionales	Altos costos de construcción debido a la gran cantidad de materia prima que se necesitan para la construcción
	Requiere trampas de espuma por problemas de éstas en la superficie
	Requiere el manejo y el mantenimiento del medio

Fuente: (CAR Cundinamarca, 2011) CAR Cundinamarca. (Junio de 2011). *Información compilada de los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>

Tallman Island WWTP - New York, USA

La tecnología de Lodos Activados con Película Integrada Fija hasta la actualidad ha sido poco usada, en esta investigación solo se encontró una planta de tratamiento de aguas residuales que trabaja con dicha tecnología como tratamiento secundario. La PTAR de Tallman Island, Ubicada en Tallman Island es Estados Unidos posee un reactor tipo IFAS y trata un caudal promedio de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$

3.2.5 Biodiscos Rotativos (RBC)

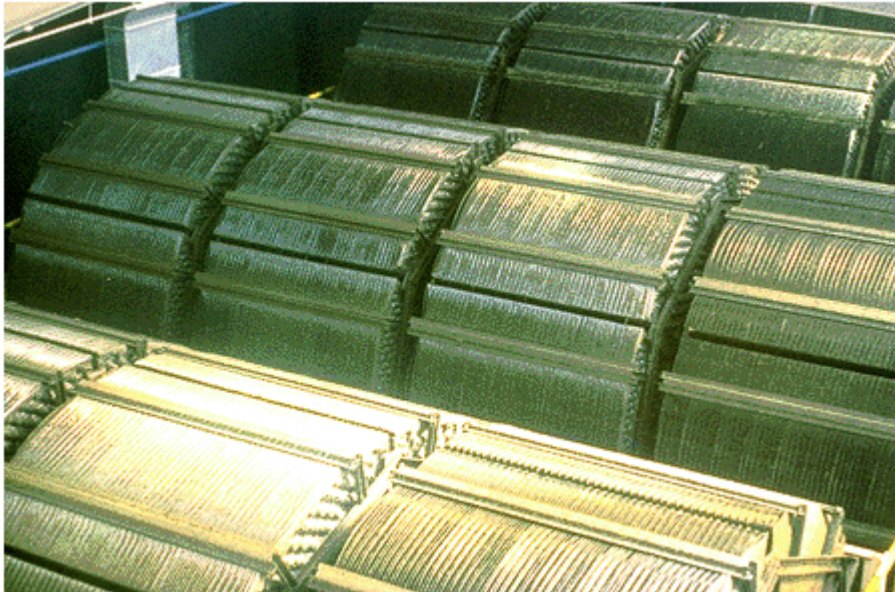


Imagen 16. Biodiscos Rotativos.

Fuente: (Tratamiento del Agua, 2016) Tratamiento del Agua. (24 de Junio de 2016) *Tratamiento del agua.* Obtenido de Tratamiento del agua: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/contactor-biologico-rotativo/>

Generalidades

La tecnología de biodiscos rotativos para el tratamiento de aguas residuales consiste en el crecimiento de una película de microorganismos en una serie de discos que giran sobre un eje, los discos se encuentran parcialmente sumergidos en el agua residual, el movimiento giratorio de los discos permite a los microorganismos poner en contacto con el oxígeno.

Los Discos Biológicos Rotatorios constituyen una tecnología reciente que se ha vuelto muy popular para aplicaciones de mediana y pequeña escala. Aunque los Discos Biológicos implican una construcción relativamente sencilla, emplean una mayor área de construcción que los Lodos Activados con Difusores de Aire. Adicionalmente, algunos sistemas de control y discos requieren ser importados, lo que aumentaría los costos de Construcción. (Hazen and Sawyer, 2011)

Como cualquier proceso de tratamiento biológico aerobio de biomasa fija, el fundamento del mismo consiste en disponer de un medio soporte donde se desarrolla una capa de

microorganismos (biofilm) que, en continuo contacto con el agua residual y el aire, absorben el oxígeno necesario del mismo para metabolizar la materia orgánica del agua residual difundida a través del biofilm. (Cudinach, 2005)



Figura 12. Tren de Tratamiento para un Sistema de Biodiscos Rotativos.

El sistema de biodiscos se complementa con un pretratamiento, un sedimentador primario y un sedimentador secundario como se muestra en la figura 12.

Proceso

El sistema de biodiscos remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el agua residual, bajo condiciones aeróbicas. Consiste en una serie de discos de plástico de 3 a 4 m de diámetro, colocados en una flecha (eje) horizontal e instalados en un tanque de concreto. Los discos giran a velocidades entre 1 y 2 r.p.m. y aproximadamente el 40% del área superficial de los discos está sumergida en el agua residual que está contenida en un tanque de concreto. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos que se cubre con una película biológica (biomasa) de 2 a 4 milímetros de espesor. (Martínez A. D., 2001)

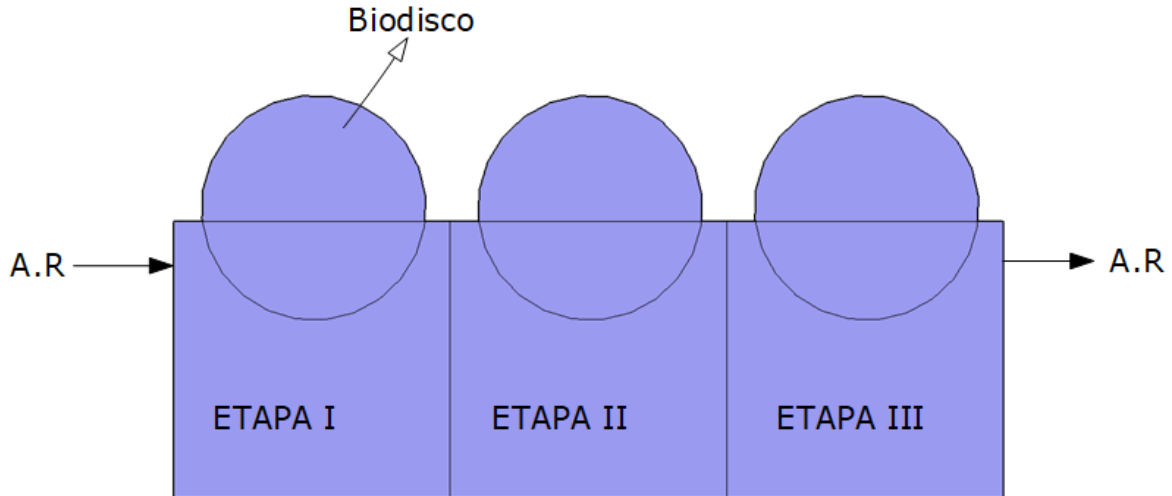


Figura 13. Reactor de Biodiscos Rotativos.

Consideraciones

- No se precisa recirculación de lodos ya que la producción de biomasa es alta.
- La temperatura del agua no puede ser menor a 13°C, véase la figura 7.
- Este sistema fue diseñado para atender núcleos poblacionales pequeños.
- Los discos deben estar 40% sumergidos.

Porcentaje de Remoción

La tecnología de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales presenta porcentajes de remoción de 88% de DBO, 90% de DQO y 92 de solidos suspendidos totales (Tabla 11)

Tabla 11. Porcentaje de Remoción para Biodiscos Rotativos.

parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	88
DQO	90
SST	92

Ventajas y Desventajas

Dentro de las ventajas que presenta el sistema de biodiscos rotativos para el tratamiento de aguas residuales se encuentra que no existe conflicto de uso del suelo por ruido, tampoco presenta problemas de olores ni de vectores, el sistema se recupera rápidamente de la entrada de compuestos tóxicos al sistema en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residual, sin embargo encontramos que para el arranque del sistema se requiere un tiempo largo para alcanzar la estabilidad en comparación con otros sistemas, un elevado consumo energético y la obligación de importar el sistema desde México o Estados Unidos lo cual elevaría el costo de construcción (tabla 12).

Tabla 12. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Biodiscos Rotativos.

Ventajas	Desventajas
No existe problemas de ruido	El proceso requiere un tiempo muy largo para alcanzar la estabilidad
No existe problemas de olores ni vectores	El costo del sistema es elevado debido a que debe importarse de México o Estados Unidos
Los biodiscos se recuperan en menor tiempo que los demás sistemas de tratamiento de aguas residuales en cuanto a entrada de tóxicos se refiere	Alto requerimiento energético o que provoca un aumento en los costos operacionales
No es necesario un equipo de retro lavado debido a la rotación de los discos, esto elimina el exceso de biomasa que se adhiere a los discos	
Se pueden añadir nuevos discos al sistema	
Los biodiscos se recuperan más rápido de la entrada de tóxicos al sistema que cualquier otro sistema biológico	

Requerimiento de área menor en comparación a otros sistemas de tratamiento de aguas residuales	
--	--

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Solita” de Mantilla – La Habana



Imagen 17. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Solita” de Mantilla – La Habana.

Fuente: (eldiariodelamarina, 2018) el diario de la marina (14 de Mayo de 2018). *El diario de la marina*. Obtenido de El diario de la Marina: <https://eldiariodelamarina.com/fernando-garcia-casas-se-reunio-con-el-consejo-de-residentes-espanoles-en-cuba/>

La Planta de Tratamientos de Aguas Residuales “La Solita” se encuentra ubicada en la ciudad de La Habana en Cuba, según (aguasresiduales, 2018) “la PTAR beneficia a 6150 habitantes y contribuyen a disminuir la carga contaminantes de las aguas de la bahía” además agrega que “la PTAR cuenta con un pretratamiento, estación de bombeo, tratamiento primario a través de un tanque Imhoff, Biodiscos y Decantador Lamelar Secundario, con lechos de secado para el tratamiento de los lodos”.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “la Solita” Presenta un porcentaje de remoción de materia orgánica de 64%, Fosforo de 26,7% y Nitógeno de 8,6%. (Cuevas, 2017)

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Reactor de Biodiscos Rotativos como Tratamiento secundario

- Iron Bridge WWTP

Ubicación: Orlando, USA.

Caudal promedio: m³/s

3.2.6 Reactor Biológico de Membrana (MBR)



Imagen 18. Reactor Biológico de Membrana.

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2011) Hazen and Sawyer. (2011) *MEMORIA TÉCNICA DE LA SELECCIÓN JUSTIFICADA DE TRES SISTEMAS DE TRATAMIENTO VIABLES*. Bogotá.
Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec91983d9dd.pdf>

Generalidades

Se trata de un proceso de depuración de agua residual ya sea doméstica o industrial que consiste en degradar biológicamente los contaminantes presentes en el agua residual y separar los sólidos suspendidos y los microorganismos encargados de la biodegradación del agua a través de membranas. En este sistema la producción de biomasa permanece en el reactor, esto quiere decir que el agua que sale de las membranas se descarga directamente al cuerpo de agua receptor. Los lodos producidos en el reactor saldrán del sistema por decantación.

Los Bioreactores de Membrana combinan un reactor biológico de crecimiento en suspensión, con la remoción de sólidos vía filtrado, lo que constituye una remoción ideal del material sólido. Las membranas se componen de material de celulosa o de un polímero, frecuentemente están configuradas como fibras huecas agrupadas en paquetes o en platos planos, y pueden ser sumergidas en un reactor biológico o en un recipiente separado donde circula la mezcla de los sólidos (CAR Cundinamarca, 2011)

La tecnología de depuración de las aguas residuales con membranas requiere de un pretratamiento y un sedimentador primario, no requiere de un sedimentador secundario como se muestra en la figura 14.

La Membrana

Los materiales con los que se construyen las membranas son muy variados, desde polietileno a poliamidas, pero las propiedades básicas de una membrana para ser apta para este tipo de tratamiento incluyen: alta resistencia mecánica, alta resistencia a la degradación bacteriana y al ataque químico, alto paso del permeato deseado, fina capa de membrana, alta porosidad y poro de tamaño uniforme. (Gonzales, 2002)

La limpieza y mantenimiento de las membranas son componentes importantes de los sistemas de Reactores de Membranas Biológicas porque pueden incrementar la vida útil de las membranas y reducir la frecuencia de remplazo. Como medida preventiva se recomienda utilizar limpiadores suaves como por ejemplo el hipoclorito de sodio o ácido cítrico. Al mismo tiempo, se utiliza aire turbulento para reducir las incrustaciones y depósitos de materiales en las membranas. Sin embargo se ha reportado que la cantidad de aire requerida para la limpieza duplica la utilizada para la aireación en los sistemas convencionales de lodos activados. (CAR Cundinamarca, 2011)

Existen dos tipos de reactores biológicos de membrana; reactor biológico de membrana integrada o sumergida y el reactor biológico de membrana externa o con recirculación de lodos al reactor.

Reactor Biológico de Membrana Integrada o Sumergida

La unidad de membrana que realiza la separación física está inmersa en el tanque biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada presurizando el bioreactor o creando presión negativa en el lado permeado de la membrana. (Martínez I. , 2008)

Reactor Biológico de Membrana Externa o con Recirculación de Lodos

Esta configuración de MBR implica que el licor de mezcla es recirculado desde el bioreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. La fuerza

impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo a través de la superficie de la membrana (Centro Canario Del Agua, 2003)

Una ventaja importante que se tiene al adoptar el sistema de reactor tipo MBR es que debido a su eficiencia en la retención de sólidos no necesita tener un sedimentador secundario, el agua tratada sale del reactor directamente como efluente final o de descarga como se muestra en la Figura 16.



Figura 14. Tren de Tratamiento para un Sistema de Reactor tipo MBR.

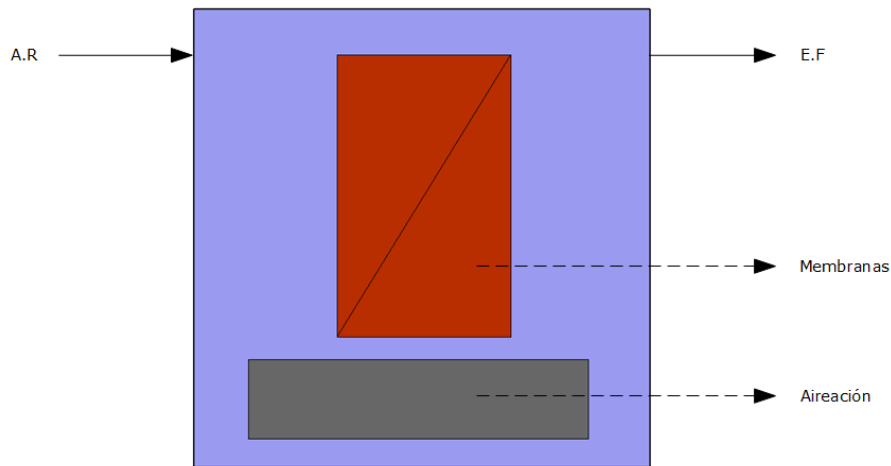


Figura 15. Membrana Integrada o Sumergida.

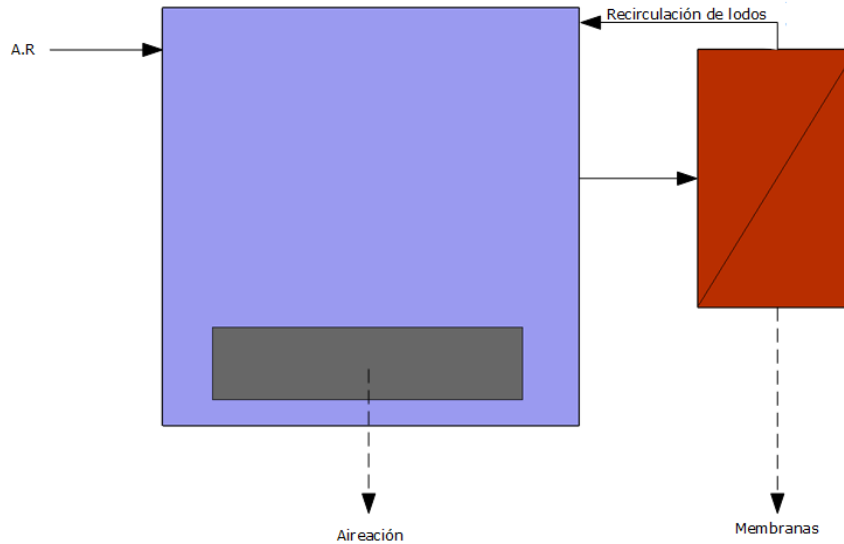


Figura 16. Membrana Externa o con Recirculación de Lodos.

Comparación de la Membrana Sumergida vs la Membrana Externa

En la tabla 13 se comparan las características de la membrana sumergida con la membrana externa.

El costo de aireación de la membrana sumergida es 90% mayor que el costo de aireación de un reactor convencional de lodos activados, el coste de bombeo es muy bajo y menores costos de operación comparados con el sistema de membrana externa.

Los costos de aireación de la membrana externa se 20% más bajo que los costos de aireación de un sistema convencional de lodos activados, sin embargo los costes de bombeo son muy altos en comparación con otros sistemas, además, los costos de operación son elevados por la complejidad del sistema en sí.

Tabla 13. Membrana Sumergida vs Membrana Externa.

Membrana sumergida	Membrana externa
Costes de aireación altos (90%)	Costes de aireación bajos (20%)
Costes de bombeo muy bajos	Costes de bombeo altos (60-80%)

Flujo bajo (compactación menor)	Flujo alto (mayor compactación)
Frecuencia de limpieza baja	Requiere mayor frecuencia de limpieza
Costes de operación menores	Costes de operación elevados
Inversión inicial fuerte	Inversión inicial menor

Fuente: (Centro Canario Del Agua, 2003) Centro Canario del Agua (2003). Introducción a los bioreactores de membranas. 8. Islas Canarias: fcca. Obtenido de http://fcca.es/documentos/05_documentos_por_temas/Recursos%20educativos%20IntroM BR.pdf

Porcentaje de Remoción

El Reactor Biológico de Membrana presenta porcentajes de remoción de 99% en DBO, 99,9% en SST, 99,2% en nitrógeno, 96,6% en fosforo y 86,6% en DQO (Tabla 14).

Tabla 14. Porcentaje de Remoción para el Reactor tipo MBR

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	99
SST	99,9
N	99,2
P	96,6
DQO	86,6

Ventajas y Desventajas

El Reactor Biológico de Membrana es una tecnología relativamente nueva, algunos investigadores se atreven a decir que es el sistema para tratamiento de aguas residuales del futuro, esto se debe a su gran eficiencia de remoción de contaminantes, sin embargo, sigue

siendo una tecnología costosa en cuanto a sus construcción, operación y mantenimiento, esto es debido a la complejidad de la membrana, su riguroso mantenimiento, alto consumo energético entre otros.

Tabla 15. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Reactor Tipo MBR.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia de remoción	Los costos de operación y mantenimiento de los MBR son mucho más altos que los asociados con sistemas de lodos activados convencionales. Las bombas temporizadas, válvulas y sistemas de aireación asociados con esta tecnología requieren de operarios entrenados y extensivas rutinas de mantenimiento
No requiere sedimentador secundario	Limitaciones hidráulicas por la cantidad de agua que las membranas pueden tratar
Ocupa un espacio reducido en comparación con otras tecnologías	Riguroso mantenimiento
Corto tiempo de retención hidráulico	Se requiere operadores altamente capacitados
Mínima generación de Lodos	Las condiciones de operación favorecen la producción de espuma
Potenciales ahorros de costos de capital debido a la eliminación de sedimentadores y otros equipos	Alto precio de la membrana
	Aunque los bioreactores de membrana no requieren sedimentadores secundarios, el

	costo de los módulos de membranas puede ser aproximadamente tres veces el costo requerido para su construcción
--	--

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2011) Hazen and Sawyer. (2011) *MEMORIA TÉCNICA DE LA SELECCIÓN JUSTIFICADA DE TRES SISTEMAS DE TRATAMIENTO VIABLES*. Bogotá.

Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec91983d9dd.pdf>

Estación Depuradora de Aguas Residuales de Guadalajara – España.



Imagen 19. Instalaciones de la EDAR de Guadalajara.

Fuente: (cadenaser, 2017) Cadenaser. (29 de Noviembre de 2017). *La Depuradora de Guadalajara produce biogás para el consumo de vehículos*. Obtenido de cadenaser: http://cadenaser.com/emisora/2017/11/29/ser_guadalajara/1511960241_544327.html

La Estación Depuradora de Aguas Residuales de Guadalajara (EDAR) en España, fue inaugurada el 14 de noviembre del año 2008, funciona las 24 horas del día y tiene una capacidad de depuración de 45.000 m³/día.

La EDAR cuenta con un pretratamiento en donde mediante a rejillas y tamices se separan arenas y sólidos, también cuenta con desarenadores y trampas de grasas para la remoción de arenas y grasas, la siguiente fase es el tratamiento primario a través de sedimentadores donde

se elimina el 65% de la materia en suspensión, el tratamiento secundario consta de un reactor biológico y como tratamiento terciario cuenta con un reactor de membranas.

Según (cadenaser, 2017) la EDAR de Guadalajara está realizando un proyecto pionero en España para transformar el gas resultante del tratamiento de lodos en combustible para vehículos, una iniciativa que reduce la emisión de gases efecto invernadero en un 80% y abarata costes de combustible. La depuradora de Guadalajara genera gas capaz de abastecer, si todo se recuperase, a unos 70 camiones. El proyecto no podría ir a una comercialización masiva de este combustible, pero sí para autoconsumo de flotas municipales y servicios de basura, transporte público.

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Reactor Biológico de Membrana como Tratamiento secundario

- Ulu Pandan Water Reclamation Plant

Ubicación: Singapore

Caudal promedio: 4,2 m³/s

3.2.7 Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR)

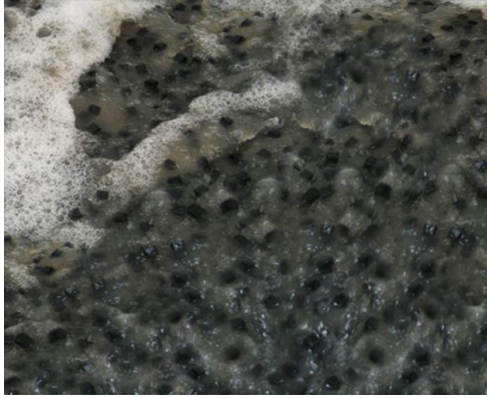


Imagen 20. Reactor Biológico de Lecho Móvil.

Fuente: (NyFdecolombia, 2017) NyFdecolombia. (2017) Plantas MBBR (Lecho Movil – Lecho Fluidizado). Obtenido de NyFdecolombia: <https://www.nyfdecolombia.com/plantas/plantas-mbbr>



Imagen 21. Piezas de Plástico Reactor Biológico de Lecho Móvil.

Fuente: (NyFdecolombia, 2017) NyFdecolombia. (2017) Plantas MBBR (Lecho Movil – Lecho Fluidizado). Obtenido de NyFdecolombia: <https://www.nyfdecolombia.com/plantas/plantas-mbbr>

Generalidades

El MBBR es un reactor Biológico de lecho móvil (proceso MBBR, por sus siglas en inglés: Moving Bed Biofilm Reactor) diseñado e implementado especialmente para el tratamiento de aguas residuales (Domesticas, comerciales y Municipales) de alta complejidad cuyo principio de funcionamiento se basa en un proceso biológico avanzado cuyo medio de soporte utiliza Diferentes Rellenos (Principalmente MUTAG Biochip, FLOCOR o Tirillas de BIOFLEX), dichos rellenos poseen una densidad ligeramente inferior a la del agua lo que le permite mantenerse en suspensión en el agua (NyFdecolombia, 2017).

El medio dentro del reactor se mantiene en suspensión utilizando difusores de aire de burbuja fina o gruesa si el sistema es aeróbico o con mezcladores mecánicos si el sistema es anaeróbico. Dentro de los procesos llevados a cabo en el MBBR no existe un retorno de lodos activados. El medio usado en los sistemas de MBBR es elaborado en polietileno de forma cilíndrica y con una capacidad máxima de llenado del 70%. La cantidad de éste utilizada depende de la carga orgánica e hidráulica, la temperatura, la capacidad de transferencia de oxígeno y el grado de tratamiento requerido. (CAR Cundinamarca, 2011)

El relleno permite tener mayor concentración de microorganismos depuradores de agua, lo que aumenta la eficiencia del reactor, cabe resaltar que este sistema es una mejora de la tecnología lodos activados convencional, dicha mejora suele utilizarse en plantas de tratamiento de aguas residuales donde no se alcanza la remoción esperada.

Los Reactores de Biopelícula de Lecho Móvil son un proceso similar al de Lodos Activados, sin embargo usan un medio diferente y no recirculan los lodos activados. Se estima que la construcción de una planta bajo esta tecnología tendrá costos de construcción similares al de una planta de tratamiento de Lodos Activados, solo que un poco más alto debido al lecho móvil. Sin embargo, no se considera que esto podría aumentar los costos en más del 15%. (Hazen and Sawyer, 2011)



Figura 17. *Tren de Tratamiento para Reactor Biológico de Lecho Móvil.*

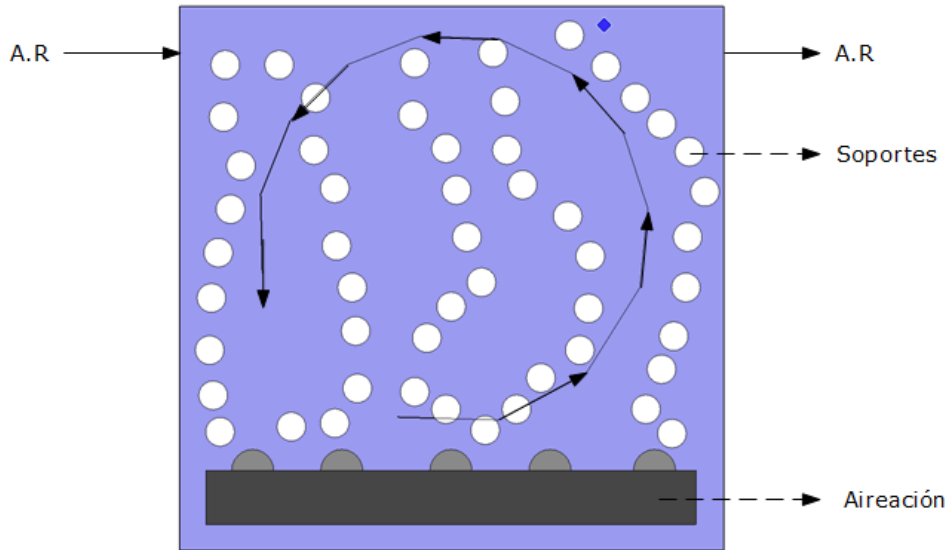


Figura 18. Reactor Biológico de Lecho Móvil Aerobio.

Proceso

El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico mediante la agitación generada por sistemas de aireación o por sistemas mecánicos. Los soportes son de material plástico con densidad próxima a 1gr/cm^3 que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70%. (Larrea, 2004)

La tecnología de lecho móvil está basada en el crecimiento de biomasa en soporte plástico que está en continuo movimiento en el reactor biológico. Es conveniente que el soporte tenga una elevada superficie específica por unidad de volumen, para posibilitar el crecimiento de gran cantidad de biomasa y brindar una mayor efectividad. (Hazen and Sawyer, 2011)

Porcentajes de Remoción

Tabla 16. Porcentaje de Remoción para un Sistema MBBR.

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO	92
DQO	96

SST	95
-----	----

El reactor biológico de lecho móvil, como se muestra en la tabla 16, es un sistema confiable para la remoción de DBO, DQO y SST en donde la eficiencia es de 92%, 96% y 95% respectivamente, esto se debe a que el sistema es una mejora de lodos activados convencional.

Ventajas y Desventajas

El reactor biológico de lecho móvil es un sistema económico de implementar debido a la poca área requerida para su funcionamiento en comparación con otros sistemas de tratamiento de aguas residuales como lodos activados, la poca superficie que requiere el sistema MBBR se debe principalmente a los soportes móviles dentro del reactor ya que estos aumentan la concentración de microorganismos para un volumen menor de agua residual, además su producción de lodos es menor en comparación con sistemas convencionales.

El sistema MBBR presenta desventajas principalmente por el alto consumo energético en su etapa operacional y la necesidad de adicionar productos químicos al proceso lo que ocasiona incremento en los costos de operación.

Tabla 17. Ventajas y Desventajas de un Sistema de Reactor Biológico de Lecho Móvil.

Ventajas	Desventajas
Larga vida útil	Alto consumo energético debido a la aireación
Requiere un área de terreno pequeña	Altos costos debido al consumo energético en la aireación
Económicamente viable para la construcción	El mantenimiento es complejo

Efectividad demostrada a bajas temperaturas	Puede requerirse adición de productos químicos para mejorar las características del licor mixto estabilizado
No es necesaria la recirculación de lodos	Requiere de tamizado para prevenir pérdida del medio plástico y daños en las bombas
Los sólidos producidos son fácilmente sedimentables	La información al respecto del diseño de este tipo de tecnología es muy escasa y este es generalmente realizado por el proveedor
La retención de biomasa en el sedimentador es independiente, por lo tanto, la carga de sólidos en la unidad de la separación sólidos/líquidos se reduce considerablemente comparando a los sistemas de lodos activados.	Como parte del proceso de tratamiento, dentro de un reactor MBBR existen zonas anóxicas e inclusive, zonas anaeróbicas. Esta configuración produce olores indeseables que requieren de sistemas para el control
Al ser un proceso de flujo continuo no requiere de un ciclo operacional especial para el control del grosor de la biopelícula	
Es adaptable a actualizaciones o expansiones para Plantas a nivel Municipal	
Puede adaptarse a los tanques existentes del sistema de lodos activados	
Operación simple en comparación con otros sistemas como el IFAS	
Menor producción de lodos en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales	

Estos sistemas tienen tanques con condiciones anóxicas donde la producción de lodo es menor que en cualquier proceso aeróbico	
---	--

Fuente: (CAR Cundinamarca, 2011) CAR Cundinamarca. (s.f). *Información compilada de los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*.
Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>

Sjölunda WWTP - Malmö, Suecia



Imagen 22. Sjölunda WWTP.

Fuente: (Climate Technology Center & Network CTCN, s.f.). Climate Technology Center & Network CTCN. (s.f). ctc-n. Obtenido de Sjölunda Wastewater Treatment Plant, Malmö: <https://www.ctc-n.org/products/sj-lunda-wastewater-treatment-plant-malm>

Encontrar Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que tengan dentro de su sistema la tecnología de Reactor Biológico de lecho Móvil es complejo debido a que ha sido poco utilizada para el tratamiento de aguas residuales urbanas, en este estudio se encontró la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Sjölunda ubicada en la Ciudad de Malmö de Suecia, la PTAR trata un caudal promedio de $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2.8 Filtro biológico aireado (BAF)



Imagen 23. Filtro Biológico Aireado.

Fuente: (INGESAM, 2014) INGESAM. (19 de Junio de 2014). Producto 3. Informe de Diseño. *Informe producto No. 3 “Informe de diseño conceptual”*. Bogotá. Obtenido de: <file:///C:/Users/DirPlantaFisica/Downloads/informe-de-diseno-conceptual.pdf>

Generalidades

Los filtros biológicos aireados son sistemas de tratamiento de aguas residuales que contienen medios de soporte para el desarrollo de una biopelícula y proporcionan oxígeno en la base del reactor para procesos microbianos aeróbicos. Los orígenes de este tipo de filtro se remontan a principios de 1900, y los diseños modernos pueden proporcionar un alto nivel de tratamiento en "huellas" de reactores pequeños. (Williams, 1999).

El efluente primario alimenta el filtro por la parte superior y este fluye hacia abajo a través del empaque, el cual es un medio granular. Este medio provee a los microorganismos un área superficial extensa para crecer. El aire se introduce al empaque del lecho y fluye en dirección opuesta a las aguas residuales (CAR Cundinamarca, 2011)

El medio filtrante en estas unidades es utilizado para permitir el crecimiento de organismos en su superficie y al mismo tiempo retiene material particulado contaminante y biomasa producida en la unidad. Para estos sistemas de tratamiento no se necesita una unidad de sedimentación. Los BAF han sido utilizados ampliamente en PTARs con caudales de diseño

menores a 7,0 m³/s. Los sistemas BAF pueden mantener una gran cantidad de biomasa utilizando el medio filtrante para promover el crecimiento de los microorganismos. Como resultado, los requerimientos de área son menores para mantener un mismo rendimiento. Los sistemas de BAF generalmente son utilizados para tratamiento terciario. (INGESAM, 2014)

Existen dos tipos de filtros biológicos aireados, el BAF de flujo ascendente y el BAF de flujo Descendente.

Proceso

Los microorganismos se adhieren a un medio soporte y crecen sobre él, formando la película que degrada la materia orgánica y sustancias contaminantes. Como los microorganismos no son arrastrados fuera del sistema por el líquido, en estos reactores se alcanza no solo una alta concentración de microorganismos sino también elevadas edades de lodo. (Ingeniería hidráulica y ambiental, 2003)



Figura 19. Tren de Tratamiento para Filtro Biológico Aireado.

Porcentajes de Remoción

Como se muestra en la tabla 18, el sistema BAF presenta una eficiencia elevada en remoción de DBO, DQO, y SST siendo esta mayor al 80%.

Tabla 18. Porcentaje de Remoción para Filtro Biológico Aireado.

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO	80
DQO	90
SST	85

Inversión, operación y mantenimiento

Los costos de inversión para los filtros BAF suelen ser menores que para otras tecnologías como lodos activados debido a la ausencia de sedimentador secundario, sin embargo los costos de operación y mantenimiento suelen ser mayores debido a que se necesita sistemas de bombes y aireación.

Se estima que debido a los procesos de limpieza y lavado que requiere la tecnología BAF, y a que está asociada a una mayor cantidad de bombeo y válvulas que requieren de un cuidadoso mantenimiento, los costos de operación y mantenimiento de esta tecnología son aproximadamente 15% más que los de un proceso de Lodos Activados Convencionales. Se estima que el consumo de energía de los BAF es más del doble que en un sistema de lodos activados aunque el requerimiento de oxígeno en el filtro BAF es menor que el requerimiento de oxígeno para el reactor de Lodos Activados (Hazen and Sawyer, 2011)

Ventajas y Desventajas

El sistema de filtro biológico aireado es una tecnología que no necesita sedimentador secundario reduciendo el requerimiento de área, no presenta problemas de olores ni vectores y se adapta a efluentes de distintas características lo que lo hace un sistema versátil y adaptable a diferentes tipos de agua residual y el manejo de un amplio rango de caudales pueden llevar a esta tecnología a posicionarse sobre otras, sin embargo dentro de sus desventajas se encuentra el requerimiento de personal altamente capacitado debido a la complejidad del mantenimiento y operación del sistema, en caso de que el filtro BAF este mal operado se puede presentar problemas de atascamiento o acumulación de biomasa en el soporte repercutiendo en una deficiencia en la calidad del agua tratada, al igual que el filtro percolador el sistema BAF necesita recircular el agua tratada para alcanzar los niveles de remoción deseados, existe el riesgo de acumulación de biomasa generando condiciones anaerobias, entre otras desventajas.

Tabla 19. Ventajas y Desventajas de un Sistema tipo Filtro Biológico Aireado (BAF).

Ventajas	Desventajas
Se adapta a efluentes de distintas características	Es necesaria la circulación de agua tratada al sistema para reducir considerablemente las concentraciones de DBO y SST
Sin problemas de olores	Se requiere un personal altamente capacitado para la operación
Se pueden obtener altos niveles de nitrificación	Pocos Beneficios en combinación con otros procesos de tratamiento (como filtros percoladores y lodos activados convencionales), lo que limita la posibilidad de ajustes.
No necesita sedimentador secundario	Puede necesitar un reciclado del efluente tratado para reducir las concentraciones de DBO y SST a niveles aceptables
Reducción de necesidades de terreno como resultado de la disminución de los requerimientos de sedimentador secundario	Debido a los procesos de limpieza y lavado que requiere esta tecnología, y a que está asociada a una mayor cantidad de bombeo y válvulas que requieren de un cuidadoso mantenimiento.
Su puesta en marcha es muy fácil y rápida	Crecimiento Excesivo de la biopelícula lo que puede causar la formación de condiciones anaerobias (lo cual disminuye la eficiencia de remoción) y liberación de gases ofensivos.

La tecnología BAF puede manejar un amplio rango de caudales	Constituye una tecnología nueva distribuida por muy pocos proveedores extranjeros, lo que dificulta la prontitud para operaciones de mantenimiento y reparación.
Reducción del número de parámetros que deben ser controlados, permitiendo facilidades de operación	
Conviene en municipios con población variable	
Esta tecnología puede ser mejorada utilizando un materia de soporte con mayor área superficial	

Fuente: (CAR Cundinamarca, 2011) CAR Cundinamarca. (Junio de 2011). *Información compilada de los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. Obtenido de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>

Ravensview Water Pollution Control Plant – Canadá



Imagen 24. Ravensview Water Pollution Control Plant – Canadá.

Fuente: (Richards, 2010) Ricards, J. (2010) Ravensview Water Pollution Control Plant Upgrades. Kingston, Canadá. Obtenido de: <http://www.jlrichards.ca/all-projects/ravensview-water-pollution-control-plant-upgrades/>

La Planta de Control de la Contaminación del Agua de Ravensview trata las aguas residuales de la ciudad de Kingston que cuenta con la tecnología de Filtro Biológico Aireado como tratamiento biológico para la descontaminación de sus aguas residuales. La Planta se construyó en 1957 y fue la primera en la ciudad de Kingston, fue sometida a ampliaciones en 1974, 1993 y nuevamente en el año 2006, trata un caudal promedio de 1,2 m³/s de aguas residuales.

Según (Richards, 2010) La actualización del año 2006 se completó aproximadamente con un 10% por debajo del presupuesto y seis meses antes de lo previsto. La capacidad nominal de la planta es de 95,000 metros cúbicos por día de aguas residuales.

Otras Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales con Filtro Biológico Aireado como Tratamiento secundario

- Onondaga County WWTP

Ubicación: Syracuse, NY, USA

Caudal promedio: 3,7 m³/s

3.3 Comparación entre los Diferentes Sistemas para el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas

Se realizaron comparaciones de eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST como se muestra en las tablas 20, 21 y 22 respectivamente. Reactor biológico de membrana es la tecnología más eficiente para la remoción de DBO y SST con un 99 y 99.9% de eficiencia respectivamente, mientras que el reactor biológico de lecho móvil presenta una eficiencia de remoción de 96% de DQO. Las tecnologías que menor eficiencia presentan son el filtro biológico aireado con 80% de remoción de DBO y el reactor biológico secuencial con 70% de remoción de DQO y 47% de remoción de SST.

Lodos activados es una de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales más utilizadas en Colombia motivo por el cual merece un análisis especial, esta tecnología ocupa el cuarto lugar en remoción de DBO con una eficiencia de remoción de 90% por debajo del reactor biológico de membrana, reactor biológico secuencial y el reactor biológico de lecho móvil, en remoción de DQO lodos activados ocupa el puesto seis solo por encima de las tecnologías de filtro percolador y reactor biológico secuencial y en cuanto a la remoción de SST lodos activados ocupa el cuarto lugar por debajo del reactor biológico de membrana, reactor biológico de lecho móvil y el sistema de biodiscos rotativos. Esto se debe a que la mayoría de las tecnologías analizadas en esta tesis se diseñaron con el objetivo de mejorar o superar el sistema de lodos activados convencionales.

Tabla 20. Remoción de DBO.

Tecnología	Porcentaje de remoción de DBO
Reactor biológico de membrana	99
Reactor biológico secuencial	92
Reactor biológico de lecho móvil	92
Lodos activados	90
Biodiscos rotativos	88
Filtro percolador	80
Filtro biológico aireado	80

Tabla 21. Remoción de DQO.

Tecnología	Porcentaje de remoción de DQO
Reactor biológico de lecho móvil	96
Lodos activados con película integra fija	95
Biodiscos rotativos	90
Filtro biológico aireado	90
Reactor biológico de membrana	85
Lodos activados	70
Filtro percolador	70
Reactor biológico secuencial	70

Tabla 22. Remoción de SST.

Tecnología	Porcentaje de remoción de SST
Reactor biológico de membrana	99,9
Reactor biológico de lecho móvil	95
Biodiscos rotativos	92
Filtro biológico aireado	85
Lodos Activados	80
Filtro percolador	80
Reactor biológico secuencial	47

Tabla 23. Remoción de N.

Tecnología	Porcentaje de remoción de N
Reactor Biológico de Membrana	99,2
Lodos Activados con Pelicula Integrada Fija	75
Lodos Activados	70

Tabla 24. Remoción de P.

Tecnología	Porcentaje de remoción de P
Reactor Biológico de Membrana	96,6
Lodos Activados con Pelicula Integrada Fija	70
Lodos Activados	70

3.4 Costos de Inversión y Funcionamiento de una PTAR

En el presente inciso se mencionan los costos asociados a la implementación de un sistema para el tratamiento de aguas residuales, no se presentan valores monetarios debido a la complejidad para encontrarlos en la revisión bibliográfica además los costos de una planta de tratamiento de aguas residuales no son lineales ni proporcionales al caudal a tratar, sin embargo, es posible mencionar donde se encuentran los costos de diseño, construcción y operación de una PTAR.

Los costos de inversión inicial de los sistemas de tratamiento de aguas residuales están asociados con las inversiones necesarias para la construcción de la infraestructura física de la planta. En este sentido, incluye los costos de diseño, materiales, maquinaria, equipos y mano de obra. (Quintero, 2007)

La inversión hace referencia a todas aquellas actividades antes de la construcción como los estudios preliminares del suelo, el diseño del sistema, la compra del terreno, la construcción (en cuanto a los insumos necesarios como canaletas, cemento, bombas, etc), interventoría, gastos administrativos, legales y financieros y reposición. Los estudios preliminares hacen referencia a estudios de inversión, factibilidad del proyecto, diseño de las obras requeridas, estudio de impacto ambiental entre otros.

En la operación y mantenimiento los costos se encuentran en reposiciones, reparaciones, consumo energético (principalmente de aireación para sistemas aerobios, recirculación de lodos o aguas, entre otras), insumos químicos (como por ejemplo en la coagulación – floculación o tratamientos avanzados como oxidación avanzada), mano de obra y disposición de lodos, los costos de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales varían dependiendo de la tecnología utilizada, el tamaño y la complejidad.

Asumir los costos de operación y mantenimiento es quizás los costos más importantes a tener en cuenta debido a que una óptima operación y un adecuado mantenimiento garantizan el buen desempeño de la planta en el tratamiento de las aguas residuales.

Existen costos administrativos asociados al mantenimiento de equipos, personal, gastos generales y tasas ambientales. En la tabla 25 se muestran las principales actividades que incrementan los costos en una PTAR. La parte administrativa se desprende principalmente

de administrador, operadores, técnicos mecánicos, técnicos electricistas, secretarias, celadores, entre otros.

Finalmente es debe resaltar que los costos de inversión, operación y mantenimiento en la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas varían según las necesidades del municipio, por ejemplo los costos de compra y adecuación del terreno varían significativamente dependiendo de la topografía, en una ciudad como Manizales los costos de adecuación del terreno serán mucho mayores a una ciudad como Santiago de Cali, esto se debe a que en Manizales está ubicada en una zona montañosa de pronunciadas pendientes mientras que Santiago de Cali se encuentra ubicada en un plano.

Tabla 25. Costos Relacionados con la Implementación de un Sistema de Tratamientos de Aguas Residuales.

Costos	Actividad	
Inversión	Estudios preliminares	
	Diseño e ingeniería	
	Construcción	
	Terreno	
	Interventoría	
	Gastos administrativos, legales y financieros	
	Reposición	
Funcionamiento	Operación y mantenimiento	Reposiciones
		Reparaciones
		Energía
		Insumos químicos

		Monitoreo de los procesos de la calidad del agua
		Mano de obra para operación y mantenimiento
		Disposición de lodos
	Administrativos	Mantenimiento de los equipos
		Personal administrativo
		Gastos generales
		Tasas ambientales

Fuente: (Quintero, 2007) Quintero, D.S. (Diciembre de 2007). Modelo de costos para el tratamiento de aguas residuales en la región. Sientia et Technica, 593. Obtenido de: <file:///C:/Users/DirPlantaFisica/Downloads/4191-2643-1-PB.pdf>

Los costos para la construcción de una PTAR generalmente los asume la empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado y entidades gubernamentales como la alcaldía local donde se efectúa dicho proyecto, los costos de operación y mantenimiento son asumidos por la población lo que refleja un incremento en la factura de agua.

La escogencia un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas depende en gran parte al sobre costo que se evidenciará en la factura de agua, por este motivo se debe tener claridad de que tecnología se debe usar según el contexto, que no genere grandes inversiones y costos y a la vez cumpla con las exigencias legales de vertimientos. Por este motivo en el siguiente inciso se muestra una metodología de evaluación para escoger sistema de tratamiento de aguas residuales.

3.5 Métodos de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales.

MADCM es un método que ayuda a las personas involucradas en la toma de decisiones, cuando éstas enfrentan decisiones complejas que requieren la consideración de varios y diversos objetivos (CAR Cundinamarca, 2011), para trabajar con esta metodología se debe definir objetivos principales y secundarios del proyecto, seleccionar criterios de evaluación, determinar las escalas de medición para describir el rango de valores posibles, definir los pesos relativos de los criterios de evaluación, formular una matriz de evaluación, realizar los cálculos recomendados por la metodología y seleccionar la mejor tecnología.

La definición de los objetivos y la selección de los criterios dependerán del contexto y las necesidades del municipio que se pretenden cubrir con el diseño y construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, por ejemplo: Minimizar el área requerida, minimizar los costos de construcción y operación, proveer un proceso de fácil operación y mantenimiento, minimizar los problemas de olores, obtener el porcentaje de remoción deseado para cumplir con la normativa ambiental.

Como paso siguiente se deben seleccionar las posibles tecnologías de tratamiento de aguas residuales que puedan ser aplicadas a las necesidades del proyecto. Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, en la ampliación de la PTAR el Salitre se seleccionó 27 tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, las tecnologías seleccionadas se sometieron a un tamizado inicial de eliminación a partir de tres criterios (1) Requisitos mínimos de confiabilidad del sistema para alcanzar los estándares de calidad del efluente secundario, ¿puede el sistema cumplir con los estándares recomendados de calidad del efluente? (2) Requisitos de Área ¿puede esta tecnología ser implementada en el espacio disponible? (3) Experiencia demostrada a gran escala ¿ha sido esta tecnología demostrada en plantas de gran escala? (CAR Cundinamarca, 2011). De las tecnologías seleccionadas 17 continuaron el proceso. Cabe resaltar que los tres criterios mencionados con anterioridad se aplican para el contexto de la PTAR el Salitre.

3.5.1 Selección de los Factores de Decisión

Luego de tener las tecnologías seleccionadas, se deben elegir los factores de decisión, retomando el caso de la PTAR el Salitre en donde se escogieron 18 factores para evaluar las tecnologías restantes, los factores de decisión fueron los siguientes:

1. Costos de Construcción
2. Costos de Operación y Mantenimiento
3. Experiencia Comprobada
4. Flexibilidad o Riesgos de Rendimiento
5. Calidad del Efluente
6. Requerimientos de Área
7. Problemas Potenciales por Olores
8. Cantidad de Biosólidos
9. Capacidad de Expansión Modular
10. Requerimientos de Energía
11. Simplicidad Operacional
12. Confiabilidad Operacional
13. Facilidad para Mejorar Procesos
14. Seguridad Laboral
15. Problemas Ambientales
16. Impacto Social
17. Condiciones Locales
18. Reducción de emisión de gases de efecto invernadero

En la selección de los factores de decisión se deben tener en cuenta a todas las partes interesadas en el proyecto como la Corporación Autónoma Regional, la empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado, la población.

3.5.2 Peso Relativo

Después de escoger los criterios de evaluación se debe asignar el peso relativo para equilibrar la importancia de cada factor de decisión.

Un peso relativo de 5 se le aplica a un factor de decisión que tiene una importancia e implicación sobresaliente frente a los demás factores, mientras que un peso relativo de 3, se le otorga a un factor de decisión que tiene menores implicaciones e impactos. La determinación de una evaluación entre 3 y 5 obedece a un rango típico de calificación empleado alrededor del mundo, donde una puntuación de 5 significa sobresaliente, 3 suficiente y 1 muy deficiente. (CAR Cundinamarca, 2011)

3.5.3 Evaluación de Los Factores de Decisión

Para cada factor de decisión se evalúa la tecnología en estudio y se asigna un puntaje entre 1 y 5; siendo 5 la condición más beneficiosa para el proyecto y 1 la condición más desfavorable. Este puntaje se multiplica por el peso relativo asignado a cada factor de decisión, al final se suma los puntajes obtenidos, la tecnología con la puntuación más alta será la más favorable para el proyecto.

3.5.4 Ejemplo: Métodos de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales.

Para entender de manera adecuada el Método MADCM para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales se realizó un ejemplo hipotético en donde se definieron como factores de decisión los costos de construcción, costos de operación y mantenimiento, simplicidad operacional y mantenimiento, experiencia comprobada, calidad del efluente, requerimiento de área, requerimiento de energía, problemas por olores e impacto social (Tabla 26).

Las tecnologías escogidas fueron Lodos Activados (LD) Reactor Biológico Secuencial (SBR), Reactor Biológico de Membrana (MBR) y Filtro Percolador (tabla 27)

Tabla 26. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales:
Factor de Decisión.

Factor de Decisión	Peso Relativo
Costos de Construcción	5
Costos de Operación y Mantenimiento	5
Simplicidad Operacional y Mantenimiento	4
Experiencia Comprobada	4
Calidad del Efluente	4
Requerimientos de Área	4
Requerimientos de Energía	3
Problemas por Olores	3
Impacto Social	3

Tabla 27. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales:
Tecnologías Escogidas

Tecnología
Lodos Activados (LD)
Reactor Biológica Secuencial (SBR)
Reactor Biológico de Membrana (MBR)
Filtro Percolador (FP)

En la tabla 28 se muestra el peso relativo designado para cada factor de decisión y el puntaje obtenido por las tecnologías seleccionadas. Se determinó que la tecnología de lodos activos es la más adecuada para aplicar según el ejemplo con un puntaje 127, los factores de decisión de permitieron posicionar a lodos activos por encima de las demás tecnologías fueron los costos de construcción, la experiencia comprobada, la calidad del efluente.

Tabla 28. Ejemplo para la Evaluación de Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales:
Peso Relativo y Evaluación de los factores de decisión.

Factor de Decisión	Peso Relativo	Tecnologías							
		LD		SBR		MBR		FP	
		Puntaje (1-5)	Puntaje Total	Puntaje (1-5)	Puntaje Total	Puntaje (1-5)	Puntaje Total	Puntaje (1-5)	Puntaje Total
Costos de Construcción	5	5	25	4	20	2	10	3	15
Costos de Operación y Mantenimiento	5	3	15	2	10	1	5	3	15
Simplicidad Operacional	4	4	16	2	8	1	4	3	12
Experiencia Comprobada	4	5	20	2	8	1	4	3	12
Calidad del Efluente	4	4	16	4	16	5	20	3	12
Requerimientos de Área	4	2	8	4	16	5	20	4	16
Requerimientos de Energía	3	2	6	3	9	1	3	5	15
Problemas Potenciales por Olores	3	4	12	5	15	5	15	1	3
Impacto Social	3	3	9	5	15	5	15	3	9
		Suma	127	Suma	117	Suma	96	Suma	109

4. CONCLUSIONES

- El reactor biológico de membrana, reactor biológico secuencial y reactor biológico de lecho móvil son las tecnologías que mejor remueven la DBO de un agua residual con un 99, 92 y 92% de eficiencia respectivamente, mientras que las tecnologías de biodiscos rotativos, filtro percolador y filtro biológico aireado son las que menor DBO remueven del agua residual con un 88, 80 y 80% de eficiencia respectivamente.
- El reactor biológico de lecho móvil, lodos activados con película integrada fija y biodiscos rotativos son las tecnologías que mejor remueven la DQO de un agua residual con un 96, 95 y 90% de eficiencia respectivamente, mientras que las tecnologías de lodos activados, filtro percolador y reactor biológico secuencial son las que menor DQO remueven con un 73, 70 y 70% de eficiencia respectivamente.
- El reactor biológico de membrana, el reactor biológico de lecho móvil y biodiscos rotativos son las tecnologías que mejor remueven los SST de un agua residual con 99.9, 95 y 92% de eficiencia respectivamente, mientras que el reactor biológico secuencial es la que menor eficiencia presenta para la remoción de SST con 47%
- Los Reactores Biológicos de Lecho Móvil (MBBR) y Lodos Activados con Película Integrada Fija (IFAS) son tecnologías relativamente nuevas por lo que la información bibliográfica es reducida
- Los costos de inversión y funcionamiento de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas depende del contexto en que se encuentra el municipio, el valor varía dependiendo las condiciones topográficas, los requerimientos legales, la población beneficiada, el caudal a tratar, las posibles tecnologías que se aplican, entre otros factores.
- La selección de una tecnología para el tratamiento de aguas residuales urbanas depende de factores de decisión como la eficiencia, los costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, complejidad del sistema, requerimiento de energía, entre otros.
- El método de Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MADCM) para la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales es eficiente y comprobado

5. BIBLIOGRAFÍA

- Adminmgv. (2015, Junio 23). *tratamientodelagua*. Retrieved from *tratamientodelagua*:
<http://www.tratamientodelagua.com.mx/teoria-de-sedimentacion/>
- Aguagest. (2000). *Utilización de la tecnología basada en Contactores Biológicos Rotativos (Biodiscos) para el diseño y construcción de EDAR's*. Retrieved from
<file:///C:/Users/Julian/Downloads/Antoni%20Ventura%20i%20Ribal%20Edcion%2045.pdf>
- Aguas residuales word press. (2 de Junio de 2008). *Aguas residuales word press*. Obtenido de *Aguas residuales word press*: <https://aguasresiduales.wordpress.com/tag/lodos-activados/>
- aguasresiduales. (2018, Mayo 24). *aguasresiduales*. Retrieved from *aguasresiduales*:
<https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/en-funcionamiento-la-planta-de-depuracion-de-aguas-residuales-de-mantilla-en-la-haban-gH9Zr>
- Alianza por el agua - España. (2006). *Manual De Depuración De Aguas Residuales Urbanas*. Retrieved from <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
- Aquagest. (2000). *Utilizacion de la tecnología basada en Contactores Biológicos Rotativos (Biodiscos) para el diseño y construcción de EDAR's*. Retrieved from
<file:///C:/Users/Julian/Downloads/Antoni%20Ventura%20i%20Ribal%20Edcion%2045.pdf>
- Bejarano Novoa, M. E., & Escobar Carvajal, M. (2015, Junio). *Eficiencia del uso de Microorganismos Para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en una Planta de Tratamiento de Agua Residual*. Bogotá D.C, Colombia. Retrieved from
http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18014/41091011_2015.pdf?sequence=1
- BRENTWOOD. (2009). *Integrated fixed film activated sludge (IFAS) technology*. Desing and application .

- cadenaser. (2017, Noviembre 29). *La depuradora de Guadalajara produce biogás para el consumo de vehículos*. Retrieved from cadenaser : http://cadenaser.com/emisora/2017/11/29/ser_guadalajara/1511960241_544327.htm
- 1
- Cajias, E., & Villablanca F, A. (2017, Mayo 31). *agriculturers*. Retrieved from agriculturers: <http://agriculturers.com/disenio-de-un-desarendor-para-el-pre-filtrado-de-agua-de-riego/>
- CAR Cundinamarca. (2011). *Información Compilada de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. Retrieved from <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>
- Caracol Radio. (2015, Septiembre 18). *Funza Optimiza su Planta de Tratamiento de Aguas Residuales*. *Caracol*. Retrieved from http://caracol.com.co/emisora/2015/09/18/bogota/1442601798_248820.html
- Caro, R. (2010). Estudio de aplicación de Biorreactores de Membrana (MBR) en la depuración de las aguas residuales. *Universidad de Cadiz* .
- Centro Canario Del Agua. (2003). INTRODUCCIÓN A LOS BIOREACTORES DE MEMBRANAS. 8. Islas Canarias: fcca. Retrieved from http://fcca.es/documentos/05_documentos_por_temas/Recursos%20educativos%20IntroMBR.pdf
- Climate Technology Center & Network CTCN. (n.d.). *ctc-n*. Retrieved from Sjölanda Wastewater Treatment Plant, Malmö: <https://www.ctc-n.org/products/sj-lunda-wastewater-treatment-plant-malm>
- CorpoCaldas. (2016). *Informe "Línea base usuarios generadores de vertimientos puntuales a corrientes superficiales"*. Caldas, Manizales. Retrieved from <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1296/2016-09-16/InformeLineaBaseUsuariosProcesoConsulta2016.pdf>

- Cudinach, N. S. (2005). Biodiscos, una tecnología para la depuración de pequeños núcleos de población. *Procesos y sistemas* .
- Cuevas, O. (2017). Evaluación de la PTAR La Solita de Mantilla. Retrieved from <http://tesis.cujae.edu.cu/handle/123456789/8331>
- Degrémont S.A. (2012, Julio). *Las fichas técnicas del manual técnico del agua degrémont*.
- Devine, T. W. (2005, Diciembre). Onondaga County Department of Water Environment Protection: Process Optimization Saves Energy at Metropolitan Syracuse Wastewater Treatment Plant. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/38076.pdf>
- Díaz, M. (2002). *Digestión Anaerobia* . Bogotá .
- El Espectador. (2018, Marzo 15). Avanzan obras de la PTAR Salitre: ¿En qué van? *EL ESPECTADOR*. Retrieved from <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/avanzan-obras-de-la-ptar-salitre-en-que-van-articulo-744713>
- El Nuevo Siglo. (2016, Mayo 23). Inicia ampliación de la PTAR Salitre. *EL NUEVO SIGLO*. Retrieved from <http://elnuevosiglo.com.co/articulos/5-2016-inicia-ampliacion-de-ptar-salitre>
- El Tiempo. (2015, Noviembre 3). Cuatro municipios hacen la tarea para sanear el río Bogotá. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16419363>
- eldiariodelamarina. (2018, Mayo 14). *eldiariodelamarina*. Retrieved from <https://eldiariodelamarina.com/fernando-garcia-casas-se-reunio-con-el-consejo-de-residentes-espanoles-en-cuba/>
- Enciso, B. L. (2002). Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras . *TexasA&M*.
- EPA. (1983). The Biological Aerated Filter. *Environmental Protection Agency*.
- EPA. (1999, Septiembre). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Reactores secuenciales por tandas*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency. Retrieved from

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1007MHF.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>

Farias de Marquez, B. (2016, Septiembre 12). *iagua*. Retrieved from *iagua*:
<https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-modulo-i>

Gonzales, M. (2002). Bioreactores de membrana (MBR). Barcelona, Catalunya, España. Retrieved from
http://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02_1037_1045.1990.pdf

Hazen and Sawyer. (2011). *MEMORIA TÉCNICA DE LA SELECCIÓN JUSTIFICADA DE TRES SISTEMAS DE TRATAMIENTO VIABLES*. Bogota. Retrieved from
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec91983d9dd.pdf>

iagua. (2015, Octubre 15). *iagua*. Retrieved from *iagua*:
<https://www.iagua.es/noticias/aema/15/10/15/aema-ampliara-depuradora-bodegas-lopez-morenas-fuente-maestre-badajoz>

iagua. (2018, Marzo 6). *iagua*. Retrieved from El Gobierno boliviano licita la nueva Planta de Tratamiento de Puchukollo: <https://www.iagua.es/noticias/mmaya/gobierno-boliviano-licita-nueva-planta-tratamiento-puchukollo>

Ingenieria de Servicios Ambientales - ISA. (2015, Diciembre 16). *ISA*. Retrieved from *ISA*:
<http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/trampas-de-grasa-un-pre-tratamiento-de-aguas-residuales>

Ingenieria hidraulica y ambiental. (2003). Filtros Biológicos sumergidos y areados. *INGENIEIA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*. Retrieved from
<http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Hidraulica/Vol-XXIV/2003/1-2003/09-filtros%20biol%C3%B3gicos%20sumergidos-pag42-47.pdf>

- Ingeniería y Servicios Ambientales ISA. (2015, Octubre 22). *isa.ec*. Retrieved from isa.ec:
<http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/lodos-activados-vs-contactores-biologicos-rotatorios-rbc-s-vs-reactores-de-lecho-fijo-movil>
- INGESAM. (2014, Junio 19). Producto 3. Informe de Diseño. *Informe Producto No.3 "Informe de diseño conceptual"*. Bogotá. Retrieved from
<file:///C:/Users/DirPlantaFisica/Downloads/informe-de-diseno-conceptual.pdf>
- Larrea, L. (2004). *Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales*. Guipúzcoa: Universidad de Navarra.
- Larrea, L. (n.d.). Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales. *Universidad de Navarra*.
- Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutierrez, M. I. (2013). *Sistemas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia*. Bogotá, Colombia. Retrieved from
<http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>
- Luna Pabello, V. M. (2006, Enero). *Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales*. Mexico D.F. Retrieved from
<https://books.google.com.co/books?id=zqpbBITrwrMC&printsec=frontcover&dq=Atlas+de+ciliados+y+otros+microorganismos&hl=es419&sa=X&ved=0CBwQ6AEwAGoVChMItMmOo4n6xgIVhFoeCh3V1Avy#v=onepage&q=Atlas%20de%20ciliados%20y%20otros%20microorganismos&f=false>
- Martín, I., Salcedo, R., & Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos. Operaciones separación sólido - fluido*. Alicante, España. Retrieved from
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones%20separacion.pdf
- Martínez, A. D. (2001). Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. In A. D. Martínez, *TECNOLOGÍA EN MARCHA VOL 13* (p. 57).
- Martínez, I. (2008). BIORREACTORES DE MEMBRANA. *Universidad del País Vasco*, 5.

Melo Luna, J. C., & Orjuela Guerrero, J. A. (2016, Mayo). Analisis Conceptual de la PTAR de la Vereda Pantanos, Municipio de Timaná-Departamento de Huila. Bogotá D.C. Retrieved from <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/398/1/CD-Especializaci%C3%B3n%20en%20Recursos%20Hidr%C3%A1ulicos-1110476159.pdf>

MENDOZA, L. (1999). A Review of Biological Aerated Filters (BAFs) for Wastewater Treatment. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, 201.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000*. BOGOTÁ D.C.

Naciones Unidas. (2011, Junio). Estudio de Caracterización de las Aguas Residuales Afluentes al Sistema de Tratamiento de Puchukollo. La Paz. Retrieved from http://www.bivica.org/upload/ag_aguas-residuales.pdf

NyFdecolombia. (2017). *PLANTAS MBBR (LECHO MOVIL - LECHO FLUIDIZADO)*. Retrieved from NyFdecolombia: <https://www.nyfdecolombia.com/plantas/plantas-mbbr>

Obsevatorio del agua el salvador. (2015). *Filtro Percolador*. Retrieved from observatorio del agua el salvador : http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAguas2015/FiltroPercoladorFinal_Sup-Costes.pdf

Oxicom Grup . (2016, Marzo 16). *Oxicom*. Retrieved from Oxicom: <http://oxicom.es/product-tag/ultravioletas/>

Paredes, J. F. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: una tecnología versatil en el tratamiento de aguas residuales.

Portsmouthwastewater. (n.d.). *TECHNOLOGY DETAIL FACT SHEET: Biological Aerated Filter (BAF)*. Retrieved from Portsmouthwastewater: http://www.portsmouthwastewater.com/PDFs/Techsheets_combined.pdf

- Quintero, D. S. (2007, Diciembre). Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región. *Scientia et Technica*, 593. Retrieved from file:///C:/Users/DirPlantaFisica/Downloads/4191-2643-1-PB.pdf
- Quiroga, J. A. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Journal of technology. Volumen 7, No 2, 27.*
- Ralmalho, R. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canada.: Editorial Reverté, .S.A. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Tratamiento_de_aguas_residuales.html?id=30etGjzPXyWC&redir_esc=y
- Ramalho, R. S. (1996). Filtros Percoladores. In R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas residuales*. Retrieved from http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/FILTROS_PERCOLADORES.pdf
- Red Tecnológica MID. (2017, Marzo 24). Filtros percoladores. Retrieved from sitemamid : https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2017-03-24_01-55-39140455.pdf
- Richards, J. (2010). Ravensview Water Pollution Control Plant Upgrades. Kingston, Cadaná. Retrieved from <http://www.jlrichards.ca/all-projects/ravensview-water-pollution-control-plant-upgrades/>
- Sriwiryarat, T. (2015). Evaluation of integrated fixed film activated sludge Wastewater Treatment Processes at Hing Mean Cells Residence Time And Low Temperatures. *M.ASCE*.
- Stephenson, T. (1999). A review of biologucar Aerated Filters (BAF) for Wastewater Treatment. *Environmental Engineering Science*.
- totagua.com. (2012). *totagua.com*. Retrieved from [totagua.com: http://www.totagua.com/nueva/productos/depuradoras-industriales/71-tecnologias-aplicadas.html](http://www.totagua.com/nueva/productos/depuradoras-industriales/71-tecnologias-aplicadas.html)
- Tratamiento del agua. (2015, Abril 10). *tratamientodelagua*. Retrieved from [tratamientodelagua: http://www.tratamientodelagua.com.mx/filtros-percoladores-1/](http://www.tratamientodelagua.com.mx/filtros-percoladores-1/)

Tratamiento del Agua. (2016, Junio 24). *Tratamiento del agua* . Retrieved from Tratamiento del agua : <http://www.tratamientodelagua.com.mx/contactor-biologico-rotativo/>

Tratamiento del Agua. (n.d.). *Lodos Activados de Lecho Fijo (IFAS)*. Retrieved from Tratamiento del Agua: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/sample-page/>

Universidad Tecnológica de Panamá. (2006, Mayo 31). *UTP*. Retrieved from UTP: <http://www.utp.ac.pa/sites/default/files/PCUTP-CIHH-AH-105-2006.pdf>

Valencia, L. F. (2003). ARRANQUE Y OPERACIÓN DE UN REACTOR EXPERIMENTAL DE LODOS ACTIVADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. *Universidad Nacional De Colombia*, 11.

Wikipedia. (2018, Enero 27). *Wikipedia*. Retrieved from Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Fosa_s%C3%A9ptica

Williams, J. (1999). Development of biological aerated filters: a review. *water and Enviroment Journal*.

Zapata Restrepo, N., Hernandez Galvis, M. L., & Oliveros Montes, E. F. (2011). Tratamiento de aguas residuales. Manizales. Retrieved from http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Agua_Servicio_Publico/Tratamiento_Aguas_Residuales-Zapata_N.pdf