



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA
REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN
ESTABLECIMIENTO HOTELERO**

Hosni Irraim Corado Revolorio

Asesorado por el Dr. Juan Antonio López Ramírez

Guatemala, mayo de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA
REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN
ESTABLECIMIENTO HOTELERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

HOSNI IRRAIM CORADO REVOLORIO

ASESORADO POR EL DR. JUAN ANTONIO LÓPEZ RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

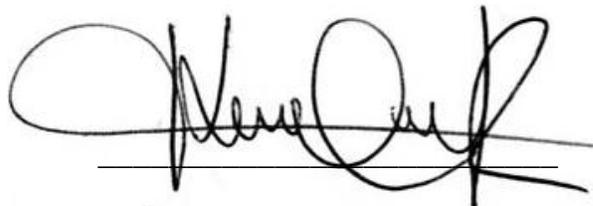
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN ESTABLECIMIENTO HOTELERO

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 2 de octubre de 2010.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hosni Irraim Corado Revolorio', written over a horizontal line.

Hosni Irraim Corado Revolorio

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.168-2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN BIOREACTOR DE MEMBRANA PARA LA REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN UN ESTABLECIMIENTO HOTELERO**, presentado por el estudiante universitario **Hosni Irraim Corado Revolorio**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, mayo de 2010



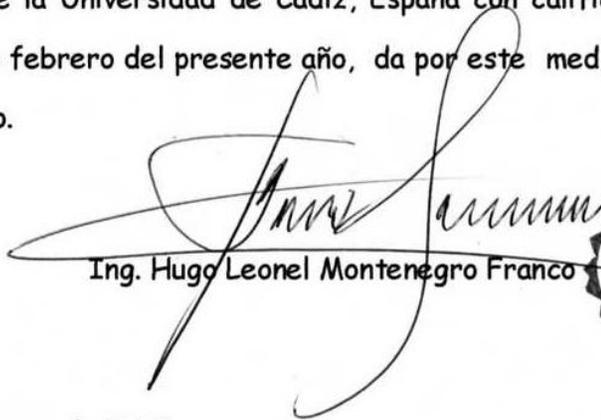
/cc



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el trabajo de graduación del estudiante Hosni Irraim Corado Revolorio, titulado **DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN UN ESTABLECIMIENTO HOTELERO**, asesorado por el Dr. Juan Antonio López Ramírez, profesor de la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de la Universidad de Cádiz, España, en el marco de los Proyectos de Ingeniería para la Cooperación y Desarrollo del año académico 2009/2010 del Programa de Intercambio y Movilidad Académica -PIMA- que financia la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura -OEI-, programa al cual la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala está adscrita. Y teniendo a la vista el Acta del Tribunal de Evaluación de la Universidad de Cádiz, España con calificación de notable fechada 1 de febrero del presente año, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

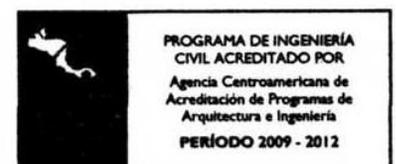

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo de 2010

/bbdeb.

Más de **130** Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
12 de abril de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN ESTABLECIMIENTO HOTELERO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Hosni Irraim Corado Revolorio, quien contó con la asesoría del Dr. Juan Antonio López Ramírez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAR A TODOS


Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Revisor por el Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.



Guatemala, 17 de mayo de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

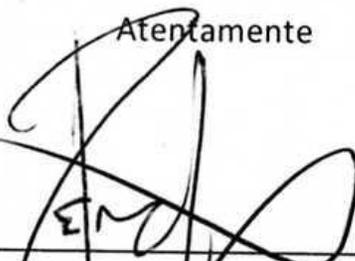
Ingeniero Montenegro:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el Trabajo de Graduación titulado "DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA LA REGENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN ESTABLECIMIENTO HOTELERO", desarrollado por el estudiante universitario Hosni Irraim Corado Revolorio, con la asesoría del suscrito.

El trabajo en mención satisface los requisitos que exige la facultad, por lo cual recomiendo que se continúe con los trámites para la aprobación de la misma.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'R. Morales', written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat abstract.

Ing. Rafael Morales
Ing. Civil, Col. No. 2662

Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Jehová** Dios Todopoderoso, por haberme dado la vida, la sabiduría y el aguante para luchar y conseguir mis metas.
- Mis padres** Irrain Corado Zúñiga y Elda Corina Revolorio de Corado, por su amor eterno que ilumina mi vida y es fuente de motivación, por su apoyo incondicional durante mi formación profesional y por haberme dado una herencia que perdurará toda mi vida, la educación.
- Mis hermanos** Por su cariño, tolerancia y comprensión, por compartir conmigo mis tristezas y alegrías, por ser una razón más de superación.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi asesor Dr. Juan Antonio López Ramírez, por su amistad y comprensión, tiempo y dedicación brindada a mi persona que facilitó la realización de este documento.

La Universidad de San Carlos Por ser la casa de estudios que me formó como profesional y haber vivido en ella capítulos tan maravillosos de mi vida que contribuyen a mi crecimiento personal.

La Universidad de Cádiz España Por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación en esta casa de estudio y darme una experiencia inolvidable en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1 LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA	1
1.1 Problemática actual	5
1.2 Requisitos legales en el tratamiento y reutilización de aguas residuales	6
1.2.1 Normativa de vertido	7
1.2.2 Normativa de reutilización	10
1.3 Diseño e implementación de nuevas tecnologías de depuración	13
2 GESTIÓN DEL AGUA EN EL SECTOR HOTELERO	17
2.1 Consumo de agua en el sector hotelero	18
2.2 Características de las aguas residuales producidas	20
2.3 Regeneración y reutilización de las aguas residuales	23
3 BIORREACTOR DE MEMBRANA Y POSIBLES ALTERNATIVAS	27
3.1 Biorreactor de membrana	29
3.2 Tipos de tratamientos alternativos de agua residual	32
3.2.1 Alternativas compactas	36

4	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA	43
4.1	Fundamento de los biorreactores de membrana	44
4.2	Tecnología de membranas	48
4.2.1	Proceso de separación de membrana	50
4.2.2	Tipos de materiales de las membranas	53
4.2.3	Configuración de las membranas	54
4.2.4	Proceso de filtración	59
4.2.4.1	Flujo de filtrado	60
4.2.4.2	Fuerza de filtrado	62
4.2.5	Ensuciamiento en membranas	63
4.2.5.1	Control del ensuciamiento	66
4.2.5.2	Factores que afectan el ensuciamiento	67
4.3	Consideraciones de diseño en un Biorreactor de Membrana	68
4.3.1	Selección del tipo de configuración	69
4.3.2	Selección del tipo de membrana a utilizar	71
4.3.3	Variables y parámetros	74
4.3.3.1	Variables definidas	74
4.3.3.2	Parámetros definidos	74
4.3.4	Parámetros operacionales	75
4.3.4.1	Líquido de bombeo	76
4.3.4.2	Aireación	77
4.3.4.3	Mantenimiento de membrana	78
4.3.5	Otros parámetros de diseño	80
4.3.5.1	Edad y producción de fangos	80
4.3.5.2	Caudal máximo	81
4.3.5.3	Eliminación biológica de nutrientes	82

5	DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA UN HOTEL	83
5.1	Descripción del proceso	83
5.2	Predimensionamiento	87
5.3	Resultados	88
6	REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS	93
6.1	Introducción	93
6.2	Distribución de caudales según uso destinado.	96
6.3	Sistema de reutilización de las aguas regeneradas	97
6.3.1	Instalación de almacenamiento	98
6.3.2	Instalación de distribución	100
6.3.2.1	Bombeo de las aguas regeneradas	101
6.3.2.2	Riego de jardines	102
6.3.2.3	Servicio sanitario	103
	CONCLUSIONES	105
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	109
	ANEXOS	115
	Memoria de cálculos de un MBR	115
	Diagrama de Flujo	185

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Aplicación de la Directiva 91/271 en España	14
2	Recolección de aguas grises y negras en un Edificio	25
3	Diagrama de Flujo de Efectivo	28
4	Comparación entre tratamiento mediante lodos activados y un MBR	30
5	MBR con membrana sumergida	31
6	Tratamiento de agua residual mediante Biodiscos	38
7	Aireación Prolongada con un decantador lamelar	39
8	Procesos elementales en MBR	45
9	Biorreactor con membrana externa	47
10	Biorreactor con membrana sumergida	47
11	Esquema configuración de membrana de Placa plana	55
12	Sistema de membrana en Espiral	56
13	Esquema de circulación de flujo de Membrana Tubular	57
14	Sección transversal membrana de fibra hueca	58
15.	Filtración lineal	59
16	Filtración tangencial	60
17	Balance de masa en la membrana	61
18	MBR con 1) membrana sumergida, 2) membrana externa	69
19	Esquema retrolavado en membrana sumergida	79
20	Diagrama de flujo de un MBR sumergido	84
21	Formación de una membrana en módulos, cassettes y tren del proceso	85

22	Tanque de almacenamiento subterráneo.	99
23	Reutilización de agua en inodoros.	104
24	a) módulo; b) cassette.	122
25	Diagrama simplificado de un RFCTA	130
26	Balance de masa de los sólidos en suspensión en un MBR sumergido	137
27	Gráfica de relación ψ Vrs., A/M	160

TABLAS

I.	Requisitos de vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas	8
II.	Requisitos de vertidos en zonas sensibles	9
III.	Zonas sensibles en Andalucía	9
IV.	Calidad del agua para uso residencia	11
V.	Dotación de agua potable por cliente para un Hotel según Categoría	19
VI.	Consumo de agua en un Hotel según tipo de uso.	20
VII.	Agua residual que retorna a la Planta de Tratamiento	21
VIII.	Composición típica del agua residual doméstica	22
IX.	Comparación de calidad de efluente de un sistema de Lodos activados y un MBR	31
X.	Pretratamiento	32
XI.	Tipos de tratamiento primario	33
XII.	Tipos de tratamiento secundario	34
XIII.	Tipos de tratamientos avanzados	35
XIV.	Clasificación de Membranas	49
XV.	Ensuciamiento inorgánico	65

XVI.	Características de los diseños comerciales de reactores	
	MBR con membranas integradas	73
XVII.	Definición de los símbolos de la figura 20	85
XVIII.	Dimensiones.	89
XIX.	Características del efluente final y eficiencia	90
XX.	Distribución del agua regenerada según uso destinado.	96
XXI.	Datos para cálculo caudal de alimentación	116
XXII.	Características del agua residual	117
XXIII.	Características del efluente	118
XXIV.	Dimensiones de modulo de membrana y cassette	123
XXV.	Datos de partida	124
XXVI.	Valores de Cs en función de la Temperatura T	172
XXVII.	Valores del coeficiente K_{T3} para diferentes sistemas de aireación	174
XXVIII.	Eficacia de transferencia de oxígeno de varios tipos de difusores	176

LISTA DE ABREVIATURAS

A/M	Abreviatura de la relación alimento/microorganismo.
MBR	Abreviatura de Biorreactor de Membrana.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	Demanda Química de Oxígeno.
MF	Microfiltración.
MLSS	Concentración de sólidos en suspensión presentes en el licor mixto [g/L].
MOC	Material orgánico coloidal.
MOB	Material orgánico biodegradable.
NTK	Abreviatura de Nitrógeno Total Kjendahl.
PTM	Presión Transmembranal.
RFCTA	Abreviatura de reactor de flujo continuo en tanque agitado.
SST	Sólidos en suspensión totales.
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica.
UF	Ultrafiltración.
TRS	Tiempo de retención de sólidos. Tiempo de retención de la biomasa en el reactor.

GLOSARIO

Aerobio	Proceso de tratamiento biológico que se da en presencia de oxígeno.
Anaerobio	Proceso de tratamiento biológico que se da en ausencia de oxígeno.
Anóxico	Proceso facultativo (proceso biológico que se puede desarrollar en presencia o ausencia de oxígeno).
Biomasa	Materia orgánica originada en un proceso biológico.
Desnitrificación	Proceso biológico mediante el cual el nitrato se convierte en nitrógeno gas y otros productos gaseosos.
DBO	Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable (g O ₂ /m ³).
DQO	Cantidad de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica (biodegradable o no biodegradable) que contiene un agua (g O ₂ /m ³).
Eliminación de la DBO carbonosa	Es la conversión biológica de la materia carbonosa del agua residual en tejido celular y diversos productos gaseosos.
Ensuciamiento	Fenómeno que resulta de la acumulación de partículas y materia disuelta en la superficie de la membrana.
Eutrofización	Enriquecimiento masivo de nutrientes en un ecosistema.

Facultativo	Proceso de tratamiento biológico en el que los organismos responsables pueden funcionar en presencia o ausencia de oxígeno.
Flóculo	Partícula formada por un conjunto de sólidos muy pequeños disgregados y dispersos en el sí de un fluido.
Flujo	Caudal por unidad de superficie.
Hidrófila	Dícese de la materia que absorbe el agua con gran facilidad.
Hidrófoba	Dícese de la materia en la que no existen atracciones ni afinidades respecto al agua.
Líquido mezcla	Contenido del reactor biológico. También es llamado licor mixto.
Materia Refractaria	Material resistente a la acción de los agentes químicos y físicos, especialmente a temperaturas elevadas.
Nitrificación	Proceso biológico mediante el cual el amoníaco se transforma, primero en nitrito y posteriormente en nitrato.
Porosidad	Relación entre el volumen de huecos y el volumen total de un elemento poroso.
PTM	Presión necesaria para hacer pasar el agua a través de la membrana.
Respiración Endógena	Consumo que realizan los microorganismos de su propia biomasa, a modo de reserva para poder continuar con sus funciones vitales.
Retrolavado	Caudal de agua que se envía de abajo-arriba o de un lado a otro en un medio filtrante para eliminar el material retenido.

Substrato	Término empleado para representar la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión o que pueden constituir un factor limitante en el tratamiento biológico.
TRS	Tiempo de retención de la biomasa en el reactor.

RESUMEN

La implementación de la Directiva 91/271 que dicta los requisitos que deberán cumplir las aglomeraciones urbanas para el vertido de sus aguas residuales, y el endurecimiento de los reglamentos europeos, ha contribuido al desarrollo y aplicación de nuevos sistemas de tratamiento capaces de satisfacer estos requisitos. Adicional a ello, la normativa de reutilización española Real Decreto 1620/2007 establecen la necesidad de optimizar la utilización del agua, mediante la aplicación de sistemas de regeneración de aguas depuradas que permita reutilizarlas en actividades en donde no sea indispensable el uso de agua potable.

La reutilización del agua regenerada convierte a esta como una fuente de agua aprovechable, y contribuye a fomentar y preservar los recursos hídricos.

El sector hotelero es uno de los grandes consumidores de agua potable y por tanto productores de aguas residuales. Con la necesidad de mejorar su imagen mediante el cumplimiento de las normativas vigentes y normas de gestión ambiental, este sector se ha visto en la necesidad de aplicar políticas amigables al ambiente. Entre estas políticas destacan la reducción del consumo de recursos como el agua, mediante la utilización de economizadores de agua y la práctica de la reutilización del agua residual regenerada, producida para actividades como recarga de cisternas de inodoros y riego de jardines.

Debido a la relativa escasa área con la que cuentan este tipo de establecimientos, el coste económico del terreno y el impacto visual que

ocasiona una planta de tratamiento de agua residual de grandes dimensiones, los hoteles y otros sectores se ven en la necesidad de utilizar tecnologías de tratamiento de aguas residuales más compactos.

La tecnología de biorreactor de membrana es el sistema de tratamiento compacto considerado, el cual es un tratamiento que combina un proceso biológico convencional con una membrana. El sistema MBR además de reducir el área de ocupación, tiene la capacidad de producir un agua residual regenerada de gran calidad.

Entre una de las ventajas que proporciona esta tecnología al contener dentro del sistema la totalidad de biomasa, se encuentra el control de la edad de fango y la desinfección del efluente sin necesidad de requerir de un tipo de tratamiento terciario. Las grandes edades de fango y la baja relación Alimento – microorganismos permite reducir la producción de lodos y la presencia de microorganismos de crecimiento lento que contribuyen al proceso y desarrollo de organismos nitrificantes.

El MBR presentan dos inconvenientes principales, estos son el ensuciamiento y el coste relacionado con la propia membrana. El ensuciamiento es un problema operacional que consiste en la deposición de partículas en la superficie de la membrana, en el capítulo 4 se analiza este sistema y la manera en que se puede reducir.

OBJETIVOS

GENERAL:

- Estudiar la viabilidad técnica para la aplicación de un Biorreactor de Membrana en el tratamiento de aguas residuales de un complejo hotelero que permita obtener un efluente reutilizable.

ESPECÍFICOS:

- 1- Realizar una breve descripción de los hábitos de consumo del agua en el sector hotelero, la producción y características de los residuos líquidos.
- 2- Conocer las variables y parámetros operacionales necesarios para la realización del diseño de un biorreactor de membrana.
- 3- Diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales aplicando la tecnología de biorreactor de membrana.
- 4- Evaluar las características de las aguas regeneradas para diseñar un sistema de reutilización de las mismas que permita aumentar el ciclo de vida del agua en el sector hotelero y de esta manera reducir el consumo de agua potable.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la conservación de todo tipo de vida, recurso que día con día se va agotando por el aumento de la demanda de agua potable para el desarrollo de las actividades humanas y el vertido de las aguas residuales a los distintos cuerpos receptores sin un tipo de tratamiento adecuado, aumentando los niveles de contaminación de las aguas superficiales.

La problemática ambiental generada por los vertidos de aguas residuales ha dado lugar a la creación de nuevos reglamentos que permiten regular la cantidad de contaminantes vertidos, lo cual ha hecho necesario la implementación de nuevas tecnologías de tratamientos de aguas residuales que permitan aumentar el rendimiento de depuración y mejorar la calidad del efluente.

El sector hotelero, considerado uno de los sectores con mayor consumo de agua por detrás de la agricultura y la industria; ha mostrado su preocupación por disminuir el consumo de agua potable mediante la utilización de economizadores de agua y técnicas de reutilización de aguas residuales, debido al coste directo real que dicho consumo le ocasiona.

Teniendo en cuenta la creciente preocupación que a nivel global ha derivado la conservación del medio ambiente, la industria hotelera en crecimiento constante en muchos países desarrollados está procurando lograr que sus actividades sean sostenibles, al aumentar el control de la calidad de su efluente de aguas residuales, reducir el consumo de agua potable y la producción de aguas residuales mediante la regeneración de las mismas y su

reutilización en diferentes usos como el riego de jardines y la descarga en los servicios sanitarios.

En países como España; en donde la práctica de reutilización de aguas residuales cobra gran importancia debido a que esto permite el aumento de la disponibilidad del recurso sin seguir explotando las fuentes de agua para su suministro, se han implementado nuevas normativas en donde se presentan las características de las aguas regeneradas según el uso al que serán destinadas.

El tratamiento de aguas residuales mediante Biorreactor de Membranas se presenta como una alternativa innovadora a la depuración y regeneración del agua ante los tratamientos biológicos al proporcionarnos un efluente con calidad de tratamiento terciario y una reducción considerable en la producción de fangos.

Por tal motivo en el siguiente trabajo se presenta una descripción de la situación ambiental en el sector hotelero, así como el diseño de una planta de tratamiento aplicando la tecnología de Biorreactor de Membranas y evaluando la calidad del agua obtenida para distribuirla a los usos que le sean pertinentes y de esta manera promover un adecuado manejo de las aguas residuales que permitan optimizar el uso de un líquido tan vital como lo es el agua.

1. LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del agua superficial y subterránea está alcanzando niveles sin precedentes, lo cual ocasiona una disminución considerable en la disponibilidad de agua sanitariamente segura para el consumo y desarrollo de actividades del ser humano. Este fenómeno puede ser negativo en el aspecto económico y social para las poblaciones cercanas a las fuentes de agua contaminada.

Se define contaminación del agua como la presencia directa o indirecta de diversas sustancias en los cuerpos de agua que pueden ser consideradas como contaminantes y que ocasionan alteración física, química y biológica de las propiedades naturales del agua.

En las siguientes tablas se presentan las alteraciones físicas químicas y biológicas que sufren las aguas contaminadas, sus características y el tipo de contaminación.¹

¹ Echarri, L. (2007) Pág. 2 - 5.

Alteración física:

Alteración física	Características y contaminación que indica
Color	Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores pero no existe una relación clara entre este y el tipo de contaminante.
Olor y sabor	Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, hidrocarburos, cloro, materia orgánica en descomposición, sales y metales pueden darle al agua diferentes olores y sabores.
Temperatura	Mayor temperatura disminuye la solubilidad de gases como el oxígeno y aumenta la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo y la putrefacción.
Materiales en Suspensión	Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra.
Radioactividad	Algunas actividades humanas pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos. El agua naturalmente posee radiactividad por el isótopo K.
Espumas	Producidas por detergentes y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuyen la autodepuración de los ríos al dificultar la actividad bacteriana, interfiere en el proceso de floculación y sedimentación en la EDAR.
Conductividad	El agua tiene una conductividad eléctrica muy baja,

Alteración química:

Alteración química	Características y contaminación que indica
PH	El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etc.
Oxígeno disuelto OD	Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.
Materia orgánica biodegradable: (DBO ₅)	Cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua.
Materiales oxidables: (DQO)	Cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (Normalmente bicromato potásico en medio ácido).
Nitrógeno total	Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización.
Fósforo total	Nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización.
Aniones: cloruros nitratos nitritos fosfatos sulfuros cianuros fluoruros	Indican salinidad Indican contaminación agrícola Indican actividad bacteriológica Indican detergentes y fertilizantes Indican acción bacteriológica anaerobia (aguas negras, etc.) Indican contaminación de origen industrial En algunos casos se añaden al agua para la prevención de las caries.
Cationes: Sodio Calcio y magnesio Amonio Metales pesados	Indica salinidad Están relacionados con la dureza del agua Contaminación con fertilizantes y heces De efectos muy nocivos; se bio-acumulan en la cadena trófica.
Compuestos orgánicos	Los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales son difíciles de metabolizar por las bacterias Los fenoles cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante forman clorofenoles dan mal olor al agua.

Alteración biológica:

Alteración biológica	Características y contaminación que indica
Bacterias Coliformes	Desechos fecales
Virus	Desechos fecales y restos orgánicos
Animales, plantas, microorganismos	Eutrofización

Existen dos formas principales de contaminación del agua, la primera de ellas tiene que ver con la contaminación producida naturalmente durante el ciclo del agua, al entrar en contacto con sustancias contaminantes, ya sean minerales o material orgánico provenientes de la atmosfera o la misma corteza terrestre. La segunda forma de contaminación está íntimamente relacionada con actividades humanas como la agricultura, la industria, el comercio, turismo y las aglomeraciones urbanas.

El ciclo del agua tiene la capacidad de regenerarse con ciertos niveles de contaminantes que elimina de manera natural, pero el vertido irresponsable de las aguas residuales con un tipo de tratamiento no adecuado, puede proporcionar niveles de contaminación que el ambiente mismo no es capaz de eliminar, ocasionando la contaminación de ríos, lagos y mares entre otros.

Este problema no afecta únicamente al ser humano, sino a los diferentes tipos de vida que se desarrollan en el agua y alrededores.

1.1 Problemática actual

Más de la mitad de los ríos y lagos de la península ibérica están contaminados². Este constituye un gran problema al considerar el papel decisivo del agua en la actividad económica de la sociedad. Solamente en España más de la mitad de los alimentos son producidos en regadíos, para lo cual se utiliza entre el 80 – 90 % del agua derivada de ríos y acuíferos³.

España es el país de Europa con mayor consumo de agua por habitante y día (265 litros) y donde menos se paga por la misma (0,57 \$/m³)⁴. Un estudio realizado por la organización de consumidores (OCU) revela que desde el año 2005 a la fecha, se ha incrementado el valor del agua potable hasta en un 28%⁵. Este aumento de precio para industria y población en general, unido al aumento en el precio del agua que ha sufrido el sector turismo, entre ellos los hoteles, ha generado la búsqueda de alternativas para disminuir el consumo de agua en el sector hotelero, entre algunas alternativas que se presentan están los economizadores y la utilización del agua regenerada según las características de las mismas.

El crecimiento continuo del turismo en España ha ocasionado que muchas urbanizaciones y hoteles se ubiquen cerca de lugares de atracción turística, como lo son las playas. Para el año 2005 España recibió 53 millones de turistas⁶, aunque es importante económicamente, la falta de planificación por parte del sector turismo ha ocasionado un elevado consumo de agua y la ocupación de un sistema tan importante como lo es el suelo litoral.

² VI Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. (2008) Victoria-Gasteiz, Álava, España.

³ Llamas, M. (2000) Pág. 1

⁴ *Ibíd.*, (pág. 6)

⁵ Nota del diario online El Mundo.es (2009, 04 de noviembre) [<http://www.elmundo.es/mundo/dinero/2009/11/04/economia/1257351825.html>]

⁶ Informe GREENPEACE. (2006). Pág. 24

Este crecimiento acarrea consigo dos grandes problemas, por una parte se encuentra el consumo desmedido de un líquido tan importante como el agua y por otro el aumento en la cantidad de agua depurada y vertida a los cuerpos receptores, agua que podría ser aprovechada mediante la reutilización en distintos usos.

1.2 Requisitos legales en el tratamiento y reutilización de aguas residuales.

Desde que el agua se empezó a utilizar como medio de transporte de los residuos industriales y domésticos, los ríos han servido como cuerpos receptores en donde se drenan las aguas procedentes de las ciudades y municipios, los cuales a su vez transmiten la contaminación aguas abajo afectando otras localidades y finalmente descargan en los litorales marinos.

En España, como país mediterráneo semiárido, la atención a los problemas y conflictos del agua ha sido siempre importante, basta recordar la existencia del Tribunal de Aguas de Valencia con sus casi mil años⁷.

Inicialmente los requerimientos para el tratamiento de aguas residuales estaban orientados en la eliminación de sólidos en suspensión y de la materia orgánica biodegradable mediante un tratamiento primario y secundario, los cuales consisten en el asentamiento de sólidos y tratamiento biológico de sólidos flotantes y sedimentados respectivamente.

En los países en vías de desarrollo únicamente es obligatoria la realización de un tratamiento primario, situación que muy pocas veces se cumple. Caso contrario sucede en los países europeos en donde los

⁷ Llamas, M. (2000) Pág. 1.

requerimientos de vertido para minimizar el impacto en los cuerpos receptores se han ido desarrollando desde los años 70.

Entre algunas normativas europeas que se fueron desarrollando a través de los años según las necesidades del momento están:

- Relativo a la calidad requerida de las aguas superficiales destinadas para el consumo humano. (76/160/CEE)
- Relativo a la calidad de agua para baño. (76/160/CEE)
- Relativa a las aguas aptas para la vida de los peces. (78/659 CEE)
- Relativa a la calidad de las aguas destinadas para el consumo humano. (80/778/CEE).
- Relativo a la depuración que deberán someterse las aguas residuales urbanas. (91/271 CEE)
- Relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos. Directiva (91/676/CEE)

1.2.1 Normativa de Vertido

La Directiva 91/271/CEE define los sistemas de recolección, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas. Esta Directiva establece dos obligaciones claras, primero las “aglomeraciones urbanas” deberán disponer de un sistema de colectores para recoger y conducir las aguas residuales a su disposición final y, en segundo lugar, se deben implementar distintos tipos de tratamientos de depuración antes de su vertido en las aguas continentales o marinas. Según el tipo de zona en el que se viertan, éstas pueden ser: “zonas sensibles, y zonas menos sensibles”

Las zonas sensibles son aquellas zonas propensas a la eutrofización, por lo que para vertidos en esta zona se deberá de contar con sistemas de tratamiento capaces de eliminar (Nitrógeno y fosforo). También se considera zona sensible a las aguas superficiales destinadas a la potabilización.

Para efectos de aplicación de esta normativa, fue transpuesta a la legislación española mediante el Real Decreto 11/1995.

A continuación se muestran unas tablas de las características que deben tener las aguas residuales para poder ser drenadas a un cuerpo receptor.

Tabla I. Requisitos de vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas

Parámetros	Concentración ⁽¹⁾	Porcentaje mínimo de reducción
Demanda bioquímica de oxígeno DBO 5 a 20°C sin nitrificación.	25 mg/l O ₂	70 – 90 40 a más de 1500m sobre nivel del mar.
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l O ₂ ⁽³⁾ para más de 10,000 e-h. 60 mg/l O ₂ de 2000 a 1000 e-h.	90 ⁽³⁾ para más de 10000 e-h. 70 de 2000 a 10000 e-h.
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada. (2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO ₅ y el parámetro sustitutivo. (3) Este requisito es optativo.		

Fuente: Cuadro I, Anexo I de Directiva 91/271 CEE

Tabla II. Requisitos de vertidos en zonas sensibles

Parámetros	Concentración ⁽¹⁾	Porcentaje mínimo de reducción
Fósforo total	2 mg/l (de 10000 a 100000 2-h) 1 mg/l (para más de 100000 2-h)	80.
Nitrógeno total ⁽²⁾	15 mg/l de 10000 a 100000 e-h. 10 m/l para más de 100000 e-h. ⁽³⁾	70 - 80
<p>(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada. (2) Nitrógeno total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito. (3) La media diaria no deberá superar los 20 mg/l de nitrógeno total para todas las muestras.</p>		

Fuente: Cuadro II anexo I de Directiva 91/271 CEE

Esta tabla muestra los requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización.

En la Comunidad Autónoma de Andalucía se declaran como zonas sensibles las siguientes:

Tabla III. Zonas Sensibles en Andalucía

Cuenca hidrográfica	Zona sensible
Costera	Lagunas litorales de los ríos Aguas y Antas
Costera	Parque natural Marismas de Odiel
Guadalete	Embalse de los Hurones, Cádiz

Aunque estas normativas hacen alusión a los requisitos de vertido de las aguas residuales urbanas, es importante hacer mención que todo establecimiento en donde no exista una red de colectores municipal, y cuente con una autorización de vertido, deberá satisfacer la calidad del efluente exigido en estas normativas.

Con el fin de optimizar la manera en la que es explotado un recurso tan valioso como el agua, muchos países e instituciones han optado por mejorar la calidad del tratamiento que las aguas residuales reciben, para obtener un efluente regenerado que pueda ser aprovechado en distintos usos, logrando así una reducción en el consumo de agua potable y una mejor disposición final para los residuos líquidos de los diferentes establecimientos. Esta práctica amigable al ambiente le ha permitido a algunas entidades reducir la cantidad de agua residual vertida y a su vez convertir el agua residual regenerada en una nueva fuente de agua que se puede aprovechar según su calidad para usos específicos.

1.2.2 Normativa de reutilización

En España la reutilización de las aguas está normada por el Real Decreto 1620/2007 el cual busca hacer eficiente el uso de los recursos hídricos, dictando una serie de usos posibles que se le pueden dar al agua regenerada entre los que se mencionan:

1. Urbanos: Riego de jardines privados, descarga de aparatos sanitarios, riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistema contra incendios y lavado industrial de vehículos.

2. Agrícolas: Riego de cultivos que tienen contacto con el agua regenerada, riego de pastos, acuicultura, riego de cultivo lechoso y cultivos industriales no alimenticios.
3. Industriales: Aguas de proceso y limpieza excepto industria alimentaria, torres de refrigeración.
4. Recreativos: Riego de campos de golf, Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales en donde está prohibido acceso al público.
5. Ambientales: Riego de bosques o áreas verdes sin acceso al público, silvicultura, recarga de acuíferos por inyección o percolación.

A continuación se muestran las características que deben reunir las aguas regeneradas a utilizar según el tipo de uso destinado⁸.

⁸ En este documento únicamente se consideran los usos urbanos

Tabla IV. Calidad del agua para uso residencial ⁽²⁾

- a) Riego de jardines privados ⁽³⁾
- b) Descarga de aparatos sanitarios ⁽³⁾

Parámetro	Valor máximo admisible
Nematodos Intestinales ¹	1 huevo/10L
Escherichia coli	0 (UFC ⁴ /100 mL)
Sólidos en suspensión	10 mg/L
Turbidez	2 UNT ⁵
Otros criterios	Otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: Se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las normas de calidad ambiental. <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
¹ Considerar en todos los grupos de calidad al menos los géneros: <i>Ancylostoma</i> , <i>Trichuris</i> y <i>Ascaris</i> . ² Deben someterse a controles que aseguren el correcto mantenimiento de las instalaciones. ³ Su autorización estará condicionada a la obligatoriedad de la presencia doble circuito señalizado en todos sus tramos hasta el punto de uso. ⁴ Unidades Formadoras de Colonias. ⁵ Unidades Nefelométricas de Turbiedad	

Fuente: Real Decreto 1620/2007, Anexo I.A

Otras normas:

La norma “Sistemas de gestión del medio ambiente” ISO 14001.2004, está siendo implementada por algunas empresas hoteleras con el objetivo de mejorar su imagen y obtener una certificación ambiental. La gestión ambiental hace necesario adoptar soluciones a distintos niveles, entre ellos está que las

empresas deberán reducir al máximo la contaminación que provocan, mejorando la calidad ambiental de sus actividades, productos y servicios.⁹

El punto 4.2 de esta norma hace mención del compromiso que adquieren los directivos de la entidad para reducir la contaminación y el impacto que esta ocasiona al medio ambiente. En el punto 4.3.1 se indica que la organización deberá identificar mediante ciertos procedimientos, los aspectos ambientales de servicios y actividades que puedan tener algún impacto significativo en el medio ambiente. Los aspectos e impactos medioambientales están relacionados entre otras cuestiones con el uso de agua y vertidos.

Aunque allí no se menciona directamente lo que tiene que ver con el tratamiento de aguas residuales, para lograr reducir el impacto de la contaminación que estas generan es necesaria la depuración de las mismas, además; para el control de los vertidos es necesario el estudio de las características del agua producida en las distintas actividades de una empresa, en nuestro caso de un hotel; para identificar el tipo de tratamiento adecuado a aplicar y producir un efluente de mejor calidad. En el caso de reducir el consumo del agua, algunos hoteles optan por la aplicación de grifos economizadores y la reutilización de las aguas residuales regeneradas.

1.3 Diseño e implementación de nuevas tecnologías de depuración

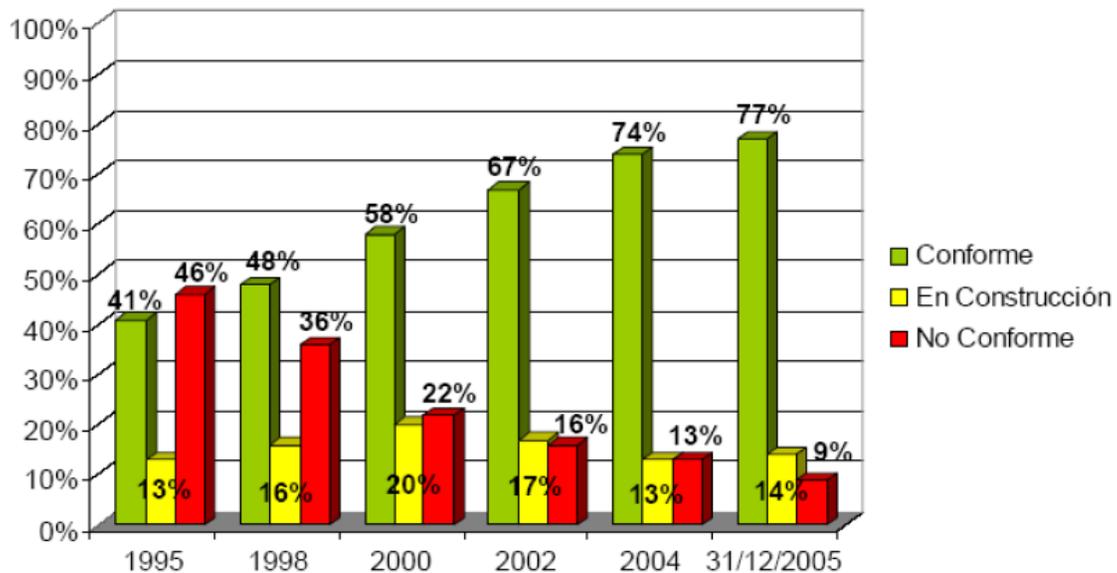
La promulgación de normativas europeas cada vez más exigentes ha obligado a los estados miembros a adaptar su legislación ambiental a éstas y a implementar nuevas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales colectadas en distintos núcleos poblacionales de los países comunitarios.

⁹ Granero J., y Ferrando, M. (2005)

En España un alto porcentaje de las aguas residuales son tratadas por sistemas de depuración adecuadas que cumplen con la normativas europeas. Únicamente poblaciones con menos de 2000 habitantes aun no cuentan con un tipo de tecnología adecuada para la depuración de sus aguas. Tal es el caso de comunidades autónomas donde la población se encuentra muy dispersa, en Andalucía por ejemplo en núcleos poblacionales pequeños la tecnología más utilizada para el año 2007 lo era un tratamiento primario mediante tanques Imhoff y fosas sépticas¹⁰.

La siguiente figura muestra el grado de conformidad alcanzada para el año 2005 en la aplicación de la Directiva 91/271 CEE.

Figura 1. Aplicación de la Directiva 91/271 en España



Fuente: Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración. Ministerio de Medio Ambiente. 2007

¹⁰ Ortega, E. et al. (2007). Pág. 4, 5.

La implementación de nuevas tecnologías en la depuración de las aguas residuales está relacionada con las condiciones económicas de las aglomeraciones urbanas. Existe una diferencia significativa entre las tecnologías aplicadas en grandes aglomeraciones y aglomeraciones pequeñas¹¹, esto se debe a los altos costos de inversión, operación y mantenimiento necesarios para la aplicación de determinadas tecnologías.

Hoy en día, la tecnología de Lodos Activados en sus distintas modalidades, es la más aplicada a nivel mundial para el tratamiento de aguas residuales urbanas. En grandes aglomeraciones y en algunas instituciones se están aplicando tecnologías como los Biorreactores de Membrana, que no es más que la combinación de reactores biológicos y membranas. Esta tecnología se está trabajando en sustitución a los Decantadores Secundarios. Para la eliminación de nutrientes (N y P) se recurre cada vez más a tratamientos biológicos, aunque en caso de la eliminación del fósforo los procesos de precipitación química continúan siendo los más utilizados.¹²

¹¹ Salas, J. (2004) Tecnologías de Depuración: Situación Actual y Perspectivas. IV Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. (pág. 517).

¹² *Ibíd.*, (pág. 518)

2. GESTIÓN DEL AGUA EN EL SECTOR HOTELERO

A nivel mundial en los últimos años se ha manifestado un aumento en la preocupación por la preservación del medio ambiente, tanto países desarrollados como en vías de desarrollo han aumentado sus restricciones al tipo de agua que debe vestirse a los cuerpos receptores (ríos, lagos y emisarios marinos), con la promulgación de leyes que deben cumplirse al corto, mediano y largo plazo (véase sección 1.2.1). A modo de ejemplo se puede citar el caso de Guatemala en donde para el 2024 será necesario que toda entidad que descargue sus aguas a lagos deban realizar un tratamiento terciario.¹³

La realización de prácticas que sean amigables al ambiente ha generado un interés por entidades públicas, privadas y el sector relacionado con el turismo, al considerar que el turismo es un sector que representa el 12 % de la economía del planeta.¹⁴

La actividad hotelera genera una serie de repercusiones en el entorno debido al consumo de recursos y la generación de residuos sólidos y líquidos, lo cual hace necesario la adopción de una serie de medidas que garanticen y contribuya a minimizar y reducir el impacto al ambiente, situación que contribuye a mejorar la imagen social del establecimiento y reducir costos. Esta práctica se ve motivada por la existencia de un mercado cada vez más internacional de huéspedes sensibilizados con el ambiente y que buscan destinos ambientalmente responsables, lo cual se traduce en beneficios tanto para la empresa como para el ambiente y sociedad en general.

¹³ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2006, mayo 05) “Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la disposición de Lodos” Guatemala.

¹⁴ Petrus, J. Pág. 2.

El sector hotelero o turístico presenta una relación muy estrecha con el ambiente ya que por una parte ocasiona un impacto en el ambiente y por otra se beneficia económicamente de su entorno.

2.1 Consumo de agua en el sector hotelero.

Es la cantidad de agua que consume un hotel, ya sea que este proceda de la red de abastecimiento de agua potable o sea generado por el mismo establecimiento al tener una fuente mediante bombeo de algún pozo o regenerando las aguas residuales.

El consumo de agua en el sector hotelero es muy variable y depende de factores como los servicios que presta, la categoría del hotel y la sensibilidad de los usuarios. Este consumo se acentúa en determinados meses del año debido al gran aforo de turistas y su carácter estacional.

Para poder diseñar las instalaciones hidráulicas de un hotel, así como su planta de tratamiento de agua residual, es necesario conocer las dotaciones de agua que se utilizan y por tanto la cantidad de agua que retorna a la planta de tratamiento.

Debido a su carácter variable, el consumo de agua es difícil de predecir, la Cámara de Comercio de Santiago de Compostela hace mención que dicho consumo podría situarse en 350 L/cliente día en una pensión y hasta 700 L/cliente día en un hotel de lujo en un área urbana¹⁵. Otros autores más conservadores sitúan el consumo según el tipo de categoría entre 293 y 516 L/cliente día¹⁶.

¹⁵ Cámara de Comercio de Santiago de Compostela, pág. 10.

¹⁶ Moya, L. (2007, pág. 29)

En este trabajo se utilizarán los datos conservadores de consumo, para calcular el agua residual producida por un hotel, considerando que el hotel cuenta con una política activa de reducción de consumo de agua. Posteriormente se realizará el diseño de la planta de tratamiento de agua residual mediante el sistema MBR.

A continuación se presenta la dotación de agua promedio según categoría:

Tabla V. Dotación de agua potable por cliente para un Hotel según categoría

Categoría de Hotel y Tipo de Explotación	Consumo de agua Medio [L/cliente día]
Hotel 1 Estrella ^a	175
Hotel 2 Estrellas ^a	287
Hotel 3 Estrellas	293
Hotel 4 Estrellas	299
Hoteles Urbanos	310
Hoteles Playeros	363
Hotel 5 Estrellas	516

a. Rico, A. (2007, pág. 17)

Fuente: Moya, L. (2007, pág. 29)

El consumo de agua por empleado tiene una media de 40 L/empleado día.¹⁷

También se presenta una tabla en la que se describe el consumo de agua según tipo de uso en una instalación turística, estos datos sirven como

¹⁷ Metcalf & Eddy. (1995, pág. 21)

referencia para tener una noción del potencial de reutilización que existe en este sector.

Tabla VI. Consumo de agua en un hotel según tipo de uso

Características del Uso	Agua Potable [L/persona-día]
Aseo Personal	125
Descarga de Inodoro	80
Restaurant y Cafetería	155
Lavandería	105
Piscina	48
Limpieza en áreas exteriores	24
Riego de Jardines*	113
Total	650
* El consumo de agua depende del área que ocupa el jardín considerando una dotación de 2 L/m ² día.	

Fuente: Chao, C., et al. (1998, pág. 4)

Estudiar los hábitos de consumo de agua en este sector es muy importante, la reducción del consumo de agua puede contribuir a:

- Una reducción en el vertido de residuos líquidos.
- Reducir el consumo de energía eléctrica (al utilizar economizadores en la ducha) y disminuir el consumo de agua caliente.
- Reducir costos por concepto de consumo de agua y energía eléctrica.

2.2 Características de las aguas residuales producidas

Como se consideró en la sección anterior el sector hotelero demanda grandes cantidades de agua, lo cual conlleva a la generación de caudales apreciables de aguas residuales que deben ser descargados al medio. Estas dos características lo convierten en un potencial modificador de las condiciones ambientales del lugar donde se ubica.

Entre los factores importantes a tomar en cuenta cuando se diseña una planta de tratamiento de aguas residuales están: el caudal producido de agua residual, el cual puede ser variable en determinadas horas del día y épocas del año; y las características del agua residuo líquido producido (aguas residuales domésticas).

Para obtener los caudales de aguas residuales es necesario conocer los datos de agua consumida por el establecimiento en estudio. Con base en los datos de la Tabla VI se hará una aproximación de la cantidad de agua que se evacua hacia la planta de tratamiento para el cálculo del caudal de aguas residuales.

Tabla VII. Agua residual que retorna a la Planta de Tratamiento

Características del Uso	Agua Potable [L/persona-día]	A la planta de tratamiento [L/persona-día]
Aseo Personal	125	120
Descarga de Inodoro	80 ^a	80
Restaurant y Cafetería	155	110
Lavandería	105	95
Características del Uso	Agua Potable [L/persona-día]	A la planta de tratamiento [L/persona-día]
Piscina	48	
Limpieza en áreas exteriores	24 ^a	8
Riego de Jardines*	113 ^a	

a. En hoteles donde el agua es reutilizada, el consumo de agua para estos usos proviene de la planta de tratamiento de agua residual regenerada.

Fuente: Chao, C., et al. (1998, pág. 4)

Según esta tabla aproximadamente el 85 % del agua consumida en el hotel es producida como agua residual, por lo que el caudal de agua residual a

tratar sería el consumo de agua del establecimiento por un factor retorno (Fr) de 0.85.

Las características de las aguas residuales se refieren a la cantidad de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en éstas. Estos constituyentes y sus concentraciones pueden variar a lo largo de ciertas horas del día y meses del año.

Las aguas residuales producidas por un hotel son consideradas aguas residuales domésticas por lo que pueden presentar la siguiente composición:

Tabla VIII. Composición típica del agua residual doméstica

Símbolo	Contaminante	Concentración Media [mg/L]
ST	Sólidos totales	720
SDT	Sólidos disueltos totales	500
	5- Sólidos disueltos fijos (no volátiles)	300
	6- Sólidos disueltos volátiles	200
SS	Sólidos en suspensión	220
SSNV	7- Sólidos en suspensión fijos	55
SSV	8- Sólidos en suspensión volátiles	165
	Sólidos sedimentables	10
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días 20 °C	110 ^a - 220 ^b - 400 ^c
COT	Carbono orgánico total	160
DQO	Demanda Química de Oxígeno	250 ^a - 500 ^b - 1000 ^c
	Nitrógeno total en la forma N	40
	9- Orgánico	15
	10- Amoníaco libre	25
	11- Nitritos	0
	12- Nitratos	0

Símbolo	Contaminante	Concentración Media [mg/L]
	Fósforo total en la forma P	8
	13- Orgánico	3
	14- Inorgánico	5
	Cloruros	50
	Sulfato	30
	Alcalinidad como (CaCO ₃)	100
	Grasa	100
	Coliformes totales	10 ⁷ - 10 ⁸ (No./100mL)
	Compuestos orgánicos volátiles	100 – 400 µg/L
a. valor mínimo, b. valor medio, c. valor máximo. *. Aunque pueden existir variaciones de concentración en los distintos contaminantes, en esta tabla únicamente se muestra la concentración media.		

Fuente: METCALF & EDDY (1995, pág. 125)

2.3 Regeneración y reutilización de las aguas residuales.

Se entiende por aguas regeneradas a las aguas que después de haber sido utilizadas y posteriormente tratadas en una planta de tratamiento de aguas residuales presentan características de alta calidad capaz de satisfacer los reglamentos de vertido y reutilización más estrictos. El uso de tecnologías de depuración empleada y por emplear en establecimientos hoteleros debe alcanzar la calidad de efluente requerida en función de los distintos usos a los cuales se destina el agua regenerada.

En la actualidad algunos hoteles y gremiales hoteleros se han visto en la necesidad de reducir el consumo de recursos hídricos y eléctricos con el fin de obtener algún reconocimiento de calidad y reducir costos, lo cual ha incrementado el aumento de la práctica de reutilización en este sector, aunado a ello, la existencia de una legislación más restrictiva que exige niveles de

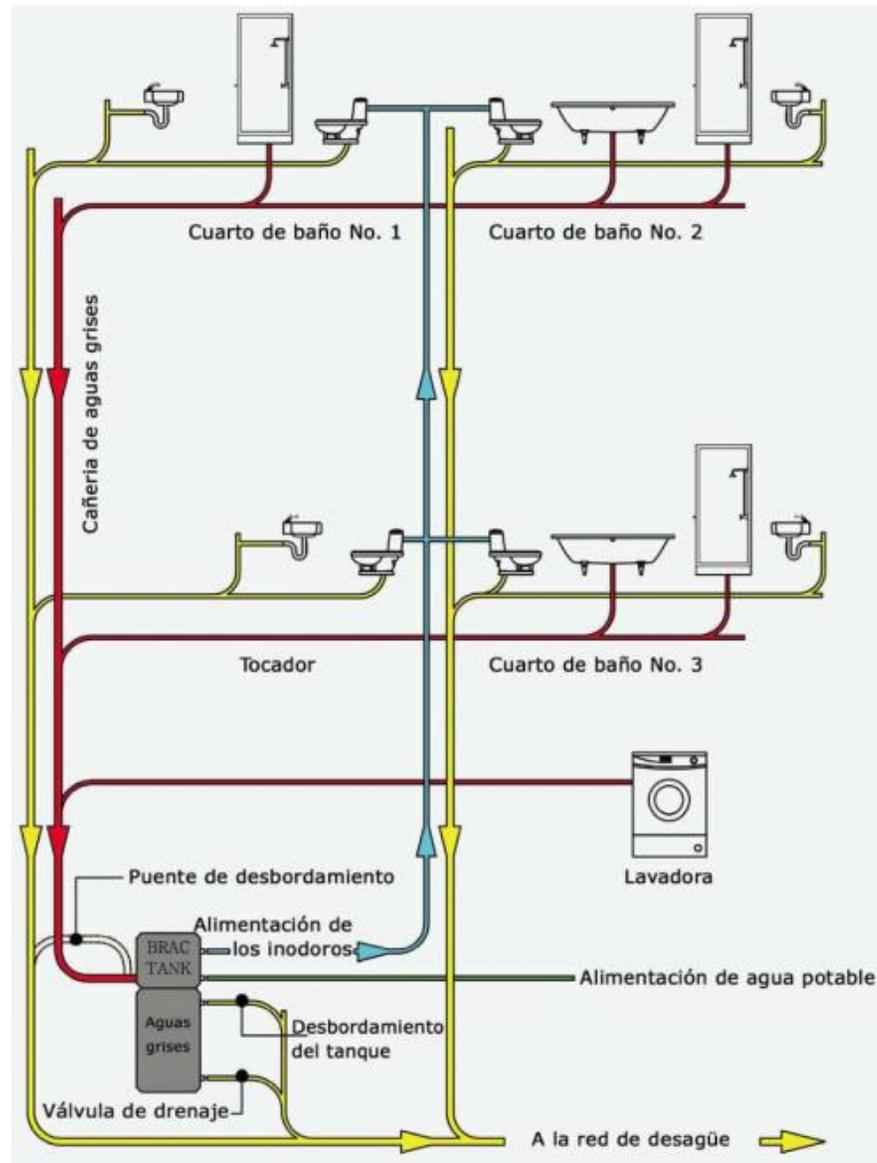
calidad alta en las aguas residuales tanto a verter como reutilizar. Esto ha llevado al sector aplicar nuevas tecnologías capaces de satisfacer estas necesidades.

La práctica de la reutilización le permite a las empresas hoteleras optimizar y gestionar de una manera eficiente los recursos hídricos al sustituir el agua potable por aguas regeneradas en todos aquellos usos en los que no se requiera un estándar de calidad alto.

Algunos hoteles han optado por reutilizar aguas grises una vez éstas hayan pasado por un tratamiento previo. Esta práctica requiere de la construcción de un sistema de drenaje interno con tubería bien identificada en el cual se separen las aguas a drenar según su origen en negras y grises las cuales son procedentes de los inodoros y la ducha, lavamanos, respectivamente. Las aguas negras son dirigidas hacia una planta de tratamiento de aguas para su posterior vertido y las aguas grises a la planta de tratamiento de aguas grises para su reutilización en jardines y cisternas de inodoros, implementando otra tubería para su alimentación.

En la figura 2 se muestra lo anteriormente expuesto.

Figura 2. Recolección de aguas grises y negras en un Edificio



Fuente: <http://is-arquitectura.es/2009/03/24/sistema-brac-para-reciclado-de-agua/>

Aunque las aguas grises permiten la realización de un tratamiento más sencillo y económico que el necesario para las aguas residuales, esta alternativa es más difícil de implementar en edificios ya en funcionamiento,

además la construcción de dos plantas de tratamiento representa un gasto mayor de inversión al ser necesario mas uso de área, la operación y mantenimiento de los dos tipos de sistema.

Otros establecimientos drenan sus aguas residuales en un solo sistema de drenaje el cual las dirige a una planta de tratamiento capaz de producir un efluente que satisfaga las características de vertido y reutilización según el uso que se les dará. Esto permite reducir a) el área en el cual se implementa la planta de tratamiento, b) la utilización de un solo sistema de tubería en las instalaciones internas del establecimiento y c) una reducción considerable del agua a verter. Las aguas procedentes de la planta de tratamiento de agua residual pueden ser utilizadas en la recarga de cisterna de inodoros, riego de jardines, fuentes ornamentales y limpieza entre otros usos, siempre identificando con algún letrero o señal la procedencia de las aguas. Estas aguas pueden convertirse en un recurso valorizable al permitir la reducción del costo de consumo de agua y al incluso venderla para usos en donde no se requiera agua potable, como se expone en el Real Decreto 1620/2007.

La comunidad autónoma de Murcia a través de la ley 6/2006 busca contribuir al reciclaje de las aguas para reducir su consumo con medidas como la prohibición de descargar totalmente el agua de las piscinas, ya que se ha comprobado que con un adecuado cuidado y mantenimiento se puede conservar el agua de la piscina durante un año.¹⁸

Lo importante del tipo de prácticas antes mencionadas es que permite el control de la calidad y la cantidad del agua residual que se vierte.

¹⁸ Ruiz, L. (2007, pág. 44)

3. BIORREACTOR DE MEMBRANAS (MBR) Y POSIBLES ALTERNATIVAS

La elección de un sistema de tratamiento depende en parte del conocimiento teórico y experiencia práctica de quienes lo desarrollan. Algunos factores a tener en cuenta a la hora de hacer una elección son los siguientes:

1) Necesidades del propietario de la instalación:

Estas podrían ser razones de coste y facilidad de financiación del proyecto, explotación que requiera personal, equipo a utilizar, eficiencia e innovación y preocupaciones por un posible impacto al ambiente.

2) Experiencias previas:

Rendimiento y fiabilidad de las plantas de tratamiento debido a las estrictas normas de vertido de aguas residuales. A partir de plantas ya construidas se puede obtener información de su rendimiento, mantenimiento, facilidades o dificultades en el proceso.

3) Requisitos legales de control del efluente:

Estos pueden variar según la ubicación de la planta y el país en donde esta sea implementada. En la sección 1.2 se muestran algunos de los requerimientos de vertido y reutilización vigentes en España y Europa.

4) Análisis y elección de los procesos:

Entre ellos se encuentra el establecimiento de los criterios de proyecto de los procesos y dimensionamiento de las unidades de

tratamiento, preparación de balance de sólidos, evaluación de las necesidades hidráulicas entre otras.

5) Compatibilidad con las instalaciones existentes:

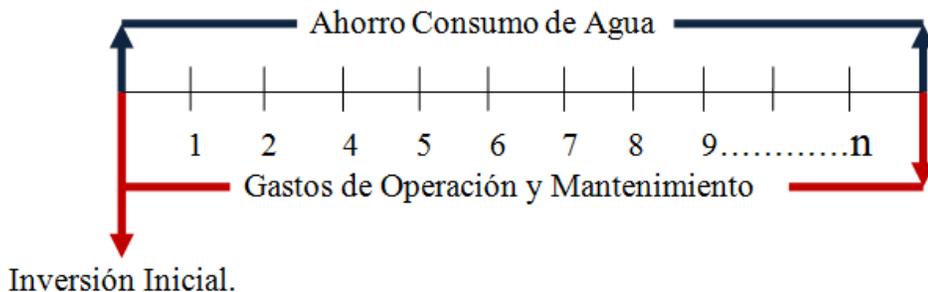
Las unidades a seleccionar deben ser compatibles con las existentes, esto representa nuevas exigencias de explotación y mayor capacitación del personal.

6) Costes:

Es necesario considerar tanto el coste inicial de construcción de la planta como los costes derivados de su explotación y mantenimiento. A la hora de comparar los costes de las diferentes alternativas esto se pudiera hacer en función de los costes actuales, los costes totales anuales o los costes a lo largo de la vida útil del proyecto.

Esto se puede representar mediante un diagrama de flujo de efectivo considerando la inversión actual, el coste por explotación y mantenimiento mensual o anual y trasladando los costes futuros a valor presente.

Figura 3. Diagrama de Flujo de Efectivo (ingresos menos egresos)



7) Consideraciones medioambientales:

El impacto ambiental que puede ocasionar una planta de tratamiento de agua residual es tan importante como los costos económicos (sino más), por lo que se debe seleccionar una planta que presente una alta eficiencia en el tratamiento.

8) Otras consideraciones importantes como los equipos, el personal y la energía:

a) Disponibilidad de equipos: Es necesario disponer de equipo de repuesto cuando se necesite sustituir una pieza.

b) Necesidad de Personal: Hay que considerar la cantidad de personal que se necesitará para la explotación y el mantenimiento de las instalaciones.

c) Necesidad energética: La explotación de las instalaciones es responsable de la mayor parte de consumo energético de las plantas de tratamiento.¹⁹

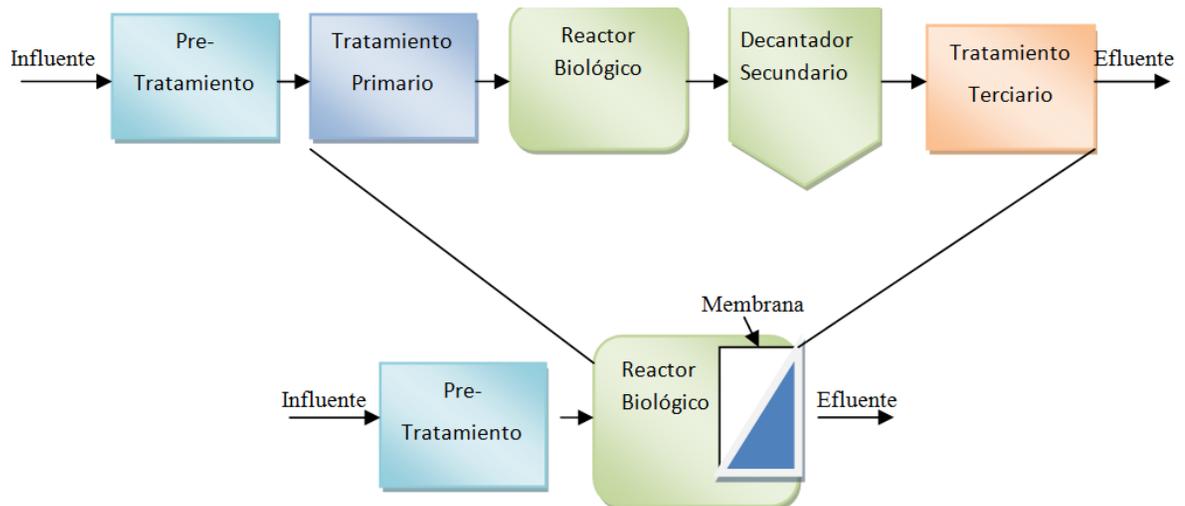
3.1 Biorreactor de membrana

El Biorreactor de Membranas es un sistema de tratamiento muy compacto por su gran eficiencia de hasta un 95 % y por la poca área que ocupa, ideal para sectores en donde el terreno tiene un precio considerable o en donde una planta de tratamiento e mayores dimensiones puede desvalorizar la propiedad. Este tratamiento combina un proceso de depuración biológica con una filtración por membrana, la membrana retiene prácticamente la totalidad de los sólidos en suspensión y la biomasa, logrando de esta manera un efluente de gran calidad.

¹⁹ Metcalf & Eddy. (1995, pág. 147-156)

Si se compara este sistema con el tratamiento de lodos activados, el ahorro en espacio que proporciona el utilizar un MBR es considerable. En la figura 4 se presenta un esquema comparativo entre un tratamiento de lodos activados y un sistema de Biorreactor de Membranas con membrana sumergida.

Figura 4. Comparación entre tratamiento mediante lodos activados y un MBR



Además de la reducción considerable del área de ocupación de este sistema de tratamiento, su eficiencia en comparación con las aguas producidas por un sistema convencional de lodos activados es bastante superior. En la siguiente tabla se presenta una comparación entre un proceso convencional de lodos activados y un Biorreactor de Membrana.

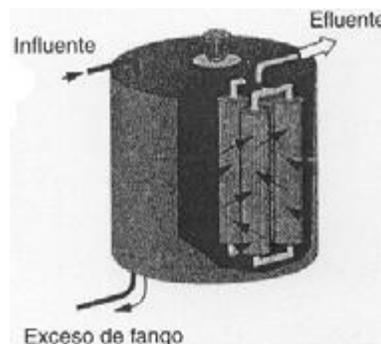
Tabla IX. Comparación de calidad de efluente de un sistema de Lodos activados y un MBR

PARÁMETROS	INFLUENTEN	SISTEMA CONVENCIONAL		MBR	
		EFLUENTE	EFICIENCIA %	EFLUENTE	EFICIENCIA %
DQO (mg/L)	520	75	85.6	10	98
SST (mg/L)	110	40	63.6	0	100
TURBIDEZ (NTU)	38	15	60.5	0	100
NTK (mg/L)	48.3	30.2	37.5	3.4	93
Coliformes totales (UFC/100mL)		10^4		10^3-10^2	

Fuente. González, L. (septiembre 2006, pág. 62)

Como se ve en la Figura 5, el sistema MBR puede estar configurado de tal manera que se incorpore la membrana en la parte interna o externa del biorreactor. En el siguiente capítulo se profundizará sobre el sistema de tratamiento mediante Biorreactor de Membrana, su principio de funcionamiento y parámetros de diseño, así como ventajas y desventajas en la aplicación de esta tecnología.

Figura 5. MBR con membrana sumergida



Fuente. Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 50)

3.2 Tipos de tratamientos alternativos de aguas residuales

Los diferentes grados de tratamiento de aguas residuales tienen su origen de la combinación de operaciones y procesos unitarios (físico, químico y biológico). El grado de tratamiento necesario a implementar puede determinarse comparando las características del agua residual cruda con las exigidas para el efluente según el uso o disposición final de esta.

A continuación se presenta una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales:

Pretratamiento: Proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares.²⁰

Tabla X. Pretratamiento

Operación	Aplicación
Debaste	Eliminación de sólidos gruesos y trapos mediante el uso de rejillas.
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño menor
Flotación.	Separación de sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida, (eliminación de grasas y aceites)
Desarenado	Eliminación de materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucción en los equipos y en desgaste excesivo de los mismos.

Tratamiento primario: En este tratamiento se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. En un futuro

²⁰ *Ibíd.*, pág. 145

las plantas que solo incluyan un tratamiento primario irán quedando desfasadas debido al aumento en las exigencias de la calidad del efluente tratado.²¹

Tabla XI. Tipos de tratamiento primario.

Operación	Aplicación
Filtración	Eliminación de las partículas que no han sedimentado.
Sedimentación	Eliminación de las materias en suspensión por sedimentación debido a la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido.
Floculación	Adición de ciertos reactivos químicos que permiten que las partículas muy pequeñas aumenten de tamaño y sedimenten. Los principales floculantes son: Sulfato de aluminio, cloruro férrico y polielectrolitos.
Coagulación	Agitación muy suave que ayuda a que los flóculos se unan entre ellos haciéndose más grandes. Puede hacerse también añadiendo coagulantes (poliamidas, poliacrilamidas)

Tratamiento secundario: Su función es la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables. Algunas veces se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario. En la siguiente tabla se muestran los principales tipos de tratamiento secundario.²²

²¹ Ibíd.

²² Ibíd.

Tabla XII. Tipos de tratamiento secundario

Operación	Aplicación
Lodos Activados	El agua es sometida a una aireación durante un periodo de tiempo para reducir su contenido de materia orgánica, formándose un lodo floculento.
Aireación Prolongada	Es una modificación del proceso de lodos activos consiguiendo la Oxidación total y disminuyendo la cantidad de lodo total.
Estabilización por contacto	Es una modificación de los lodos activados en el que el agua residual se mezcla con un lodo estabilizado. El tiempo de contacto es mayor pero se mantienen volúmenes menores
Lagunas aireadas	Son balsas profundas de 1-4 m, en las que la oxigenación del agua residual se realiza mediante aireación. La diferencia con los lodos activos es que en estos se recicla el lodo y en las lagunas no.
Balsas de estabilización	Son balsas en las que no se utiliza la aireación. El oxígeno necesario se obtiene de la superficie natural de aireación y de las algas que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado por las algas en la fotosíntesis se utiliza por las bacterias para la degradación aeróbica de la materia orgánica. Los productos de degradación son utilizados de nuevo por las algas, estableciéndose, así, una relación simbiótica.
Filtros Percoladores	Se utiliza un soporte para el crecimiento biológico que se mantiene fijo, se denominan reactores de crecimiento biológico asistido.
Biodiscos	La biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento asistido (filtros percoladores) y crecimiento en suspensión (lodos activos)
Tratamiento Anaerobio	Se utiliza para las aguas residuales y para la digestión de lodos. Los productos finales de la degradación anaerobia son gases, metano y dióxido de carbono y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno.

Fuente: Alcarria, M. (2005, Pág. 19)

Tratamiento avanzado: Conocido comúnmente como tratamiento terciario, en este tratamiento se busca la eliminación de constituyentes de las aguas residuales tales como nutrientes, compuestos tóxicos y exceso de materia

orgánica o de sólidos en suspensión. En la Tabla XIII se muestran y definen los tratamientos terciarios más utilizados.²³

Tabla XIII. Tipos de tratamientos avanzados

Operación	Aplicación
Adsorción en Carbono activo	- Adsorción: acumulación de soluto (contaminante) en la interface entre dos fases (sólida y líquida). - Adsorbato: soluto (contaminante) que se desea eliminar de la fase líquida. - Adsorbente: fase sólida (Carbón activo) para eliminar los contaminantes.
Intercambio iónico	Proceso en el que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales, sobre la superficie de un sólido, mediante fuerzas electrostáticas, se intercambian por iones de una especie diferente de disolución
Osmosis inversa	Este proceso utiliza una membrana semipermeable para separar los sólidos disueltos del agua. Se requiere una presión para forzar el paso del agua pura a través de la membrana, saliendo las impurezas detrás.
Electrodialisis	Proceso electroquímico que permite desalinizar una corriente acuosa mediante el uso de corriente eléctrica.
Cloración	Proceso de desinfección del agua residual, mediante el uso de cloro.
Ozonización	Proceso de desinfección del agua residual mediante ozono.
Desinfección	Destrucción selectiva de microorganismos causantes de posibles enfermedades.
Precipitación Química	Eliminación de fósforo presente en las aguas residuales haciéndolo precipitar en forma de fosfatos.

Fuente: Alcarria, M. (2005, Pág. 20)

²³ *Ibíd.*, pág. 146

3.2.1 Alternativas compactas

Aunque algunos de estos tratamientos se aplican en establecimientos y centros urbanos grandes y pequeños, es necesario contar con una amplia superficie, en sectores donde el espacio es reducido y el coste económico del terreno es elevado, es preferible la aplicación de un tipo de tratamiento más compacto. A continuación se describe de manera breve algunos tipos de tratamiento compactos que requieren de un área reducida y pueden producir un efluente de calidad reutilizable.

BIODISCO

Es un tipo de tratamiento para depurar agua mediante un sistema de película fija. Este tratamiento consiste en una serie de discos circulares de polipropileno, situados sobre un eje a corta distancia entre ellos. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual, y giran lentamente. La rotación hace que la película biológica formada se ponga en contacto alternativamente con el agua y con el aire. La rotación induce la transferencia de oxígeno, manteniendo la biomasa en condiciones aeróbicas, y también es la causa del desprendimiento de los sólidos en exceso.²⁴

El movimiento de los discos permite mantener en suspensión los sólidos, estos son arrastrados hasta el clarificador el cual puede ser un decantador lamelar en donde se produce la sedimentación y extracción de fango. Según el caudal de aguas residuales a tratar este clarificador puede ir integrado en un único módulo con los Biodiscos. Los clarificadores con lamelas inclinadas generan flujo que facilita la separación del agua limpia del fango, en esta la

²⁴ Estudio y Plan Territorial de la Vera (Junio 2008, pág. 138)

sedimentación se produce por el efecto de la gravedad debido a la estructura densa de los microorganismos.

Los Biodiscos presentan un alto rendimiento de depuración en comparación con otros sistemas, favorecido por la baja relación de carga orgánica/biomasa, y un mayor tiempo de retención de los sólidos en la fase biológica Su eficiencia es superior al 92% en cuanto a eliminación de DBO y SS.²⁵

Desventajas

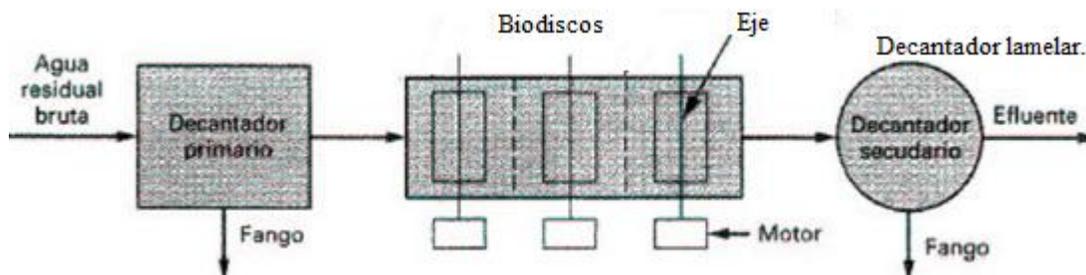
- Difícil evaluación del oxígeno disuelto, el cual se puede incrementar con la inyección de aire en los tanques.
- No es una tecnología muy adecuada para eliminar nutrientes y aunque hay diseños que lo permiten.
- Se requiere decantación primaria.

Ventajas

- Presenta flexibilidad con la variación de la carga.
- Mantenimiento muy sencillo y con coste energético bajo. El personal no ha de ser cualificado
- Nivel sonoro bajo y ausencia de olores.
- Buena integración de la instalación en el sitio, ocupan poco espacio y quedan muy disimuladas.

²⁵ Aquagest Medio Ambiente. Pág. 10

Figura 6. Tratamiento de agua residual mediante Biodiscos



Fuente: Estudio y Plan territorial de la Vera (Junio 2008, pág. 139)

AIREACIÓN PROLONGADA CON DECANTADOR LAMELAR.

Este tipo de tratamiento se puede definir como la combinación del tratamiento biológico de aireación prolongada y un decantador lamelar. Este tratamiento se basa en la tecnología de lodos activados, en este el agua después de un pre-tratamiento, sin necesidad de una decantación primaria entra a un reactor biológico donde la actividad microbiológica provoca la eliminación de la materia orgánica, se puede eliminar nutrientes (nitrógeno y fósforo) los procesos de nitrificación y desnitrificación se pueden desarrollar en el reactor, posteriormente el licor de mezcla fluye hacia el decantador secundario (en este caso lamelar) para su clarificación, en donde los fangos sedimentan, el decantador lamelar presenta la ventaja de necesitar poca superficie para su instalación y que al igual que en el caso de los Biodiscos puede instalarse en un solo modulo junto al reactor biológico. En este tratamiento es necesaria una recirculación de fangos secundarios para mantener un índice de biomasa en el reactor.²⁶

²⁶ Estudio y Plan Territorial de la Vera (Junio 2008, pág. 142-146)

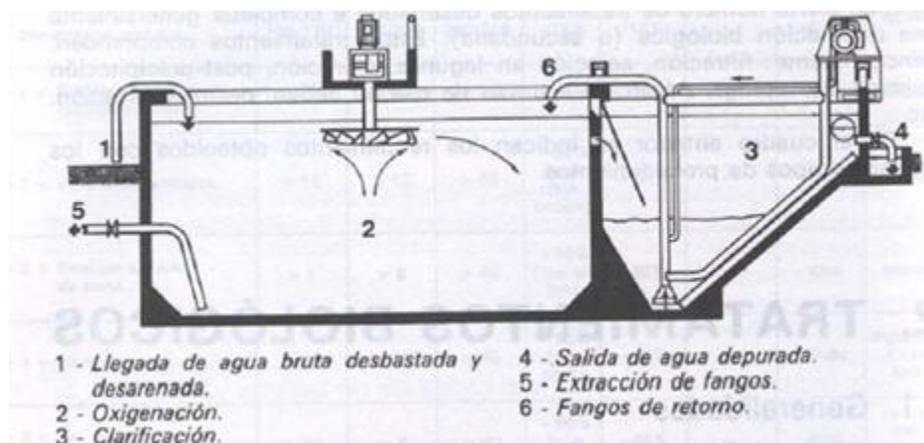
Desventajas

- Elevado consumo de oxígeno y por tanto, energético.
- Necesidad de recirculación de fangos.
- El personal ha de ser cualificado para optimizar el proceso. Se han de controlar parámetros como la aireación, purga y recirculación de fangos.

Ventajas

- Alta eficiencia del proceso, alrededor del 90 %.
- Se pueden eliminar nutrientes.
- Ocupación mínima de terreno.
- No necesita mucha obra civil.
- Alto control sobre el proceso.

Figura 7. Aireación Prolongada con un decantador lamelar



Fuente: <http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam2/imagenes/i.jpg>

REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL

La denominación SBR corresponde a las siglas inglesas *Sequencing Batch Reactor*. Este tratamiento procesa las aguas residuales mediante un tratamiento biológico aeróbico-anóxico, el cual se basa en la generación de lodos activados mediante la aireación y disminución de nutrientes en etapa anóxica. . En los reactores SBR se consigue la aireación y la sedimentación en el mismo tanque. Este sistema permite la obtención de un elevado rendimiento de tratamiento siempre estable sin importar variaciones sustanciales en la entrada de carga.

Según la calidad del efluente exigido, este tratamiento requiere de cuatro a cinco procesos cíclicos los cuales son: llenado, desnitrificación, aireación, sedimentación y vaciado.

Llenado:

El reactor se llena manteniendo una agitación suficiente para mantener la biomasa en suspensión, el sistema asegura la mezcla homogénea del agua sucia y del fango.

Desnitrificación:

Esta fase suele programarse una vez transcurrido la mitad aproximadamente del ciclo de aireación, esta consigue ampliar el periodo de condiciones anóxicas durante el cual los nitratos pueden ser reducidos a nitrógeno gas.

Aireación:

La aireación continúa en el reactor hasta que la biodegradación se haya completado. El licor mezcla se mantiene en suspensión por el sistema de aireación/agitación para efectuar una mezcla ideal. Al no existir nueva aportación de alimento al reactor, los microorganismos se ven obligados a

aprovechar de forma óptima la materia orgánica presente. En esta fase se prolonga hasta que toda la materia orgánica biodegradable haya sido consumida y la biomasa entre en condiciones de carga másica mínima.

Sedimentación:

En este proceso los flóculos que forman la biomasa pueden sedimentar al no entrar agua al embalse y no existir turbulencia.

Vaciado:

El Vaciado del reactor se realiza de forma automática, por la abertura de una válvula automática, una vez completados los ciclos o fases anteriores. La fase de vaciado se prolonga hasta que aproximadamente un tercio de la capacidad total del reactor ha sido atravesada.

Fase de Reposo y Purga de Fangos en Exceso:

Durante esta fase se purga de manera programada la biomasa en exceso para mantener constante su concentración. . El fango en exceso es retirado de la superficie de decantación.

Desventajas

- Elevado coste de inversión de la planta relacionada con la automatización de la planta.
- Coste de explotación relativamente alto (aunque más bajo que la aireación prolongada)

Aspectos Positivos

- Es una solución compacta.
- Bajo impacto visual por su pequeño tamaño y porque la mayoría van enterradas.
- Reducción de la obra civil al no ser necesario un clarificador final.
- No se necesita decantación primaria.
- Permite un mayor control sobre los parámetros de operación.
- Puede eliminar nitrógeno y fósforo
- Simplicidad operativa. Sistema altamente automático.²⁷

²⁷ Estudio y Plan Territorial de la Vera (2008 pág. 147 – 155)

4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA

El tratamiento de aguas residuales especialmente urbanas aplicando la tecnología de Biorreactor de Membrana, comúnmente conocida por sus siglas en inglés como “MBR” (Membrane Biological Reactor); ha tenido un avance muy importante en Europa durante la última década principalmente por la necesidad de muchas instituciones de cumplir con las cada vez más estrictas normas europeas relacionadas con el tratamiento y vertido de aguas residuales. Esto se debe al efluente de mejor calidad que esta tecnología proporciona en comparación con tecnologías convencionales como el Sistema de Lodos Activados.

El MBR permite no sólo cumplir con las normas de vertido actuales, sino con mayores exigencias posibles para un futuro, además de producir un efluente que puede ser reutilizado por su calidad en distintos tipos de actividades urbanas e industriales.

La aplicación de este tipo de tratamiento se ha visto motivada por la poca área ocupada, la calidad de efluente producido, la baja producción de lodos, la posibilidad de eliminar el proceso de desinfección o tratamiento terciario y la reducción de los costos de la membrana gracias a la nueva generación de membranas de ultrafiltración y micro filtración más eficientes. Aunque en la actualidad este tipo de tratamiento es económicamente costoso debido a los altos costos de inversión, operación y mantenimiento, las perspectivas a futuro son prometedoras. Es una tecnología relativamente nueva que debido al gran

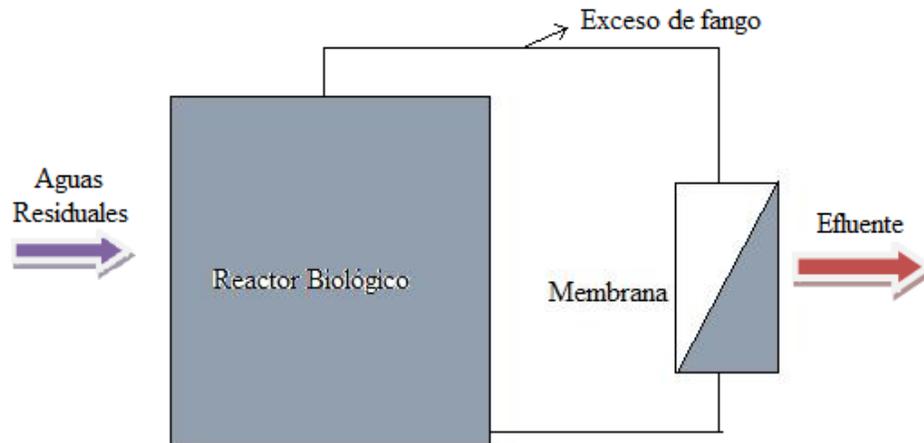
potencial mostrado está siendo aceptada cada día más como una alternativa a elegir.

4.1 Fundamento de los biorreactores de membrana

Los Biorreactores de Membranas o Reactor Biológico de Membrana se puede definir como la combinación de dos procesos elementales que son: por un lado un proceso de degradación biológica que puede ser aerobia o anaerobia y un proceso de separación de sólidos y líquidos mediante una unidad de filtración por membrana en el cual los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada.

Entre una de las ventajas que nos proporciona esta tecnología al contener dentro del sistema la totalidad de biomasa se encuentra el control perfecto de la edad de fango y la desinfección del efluente sin necesidad de requerir de un tipo de tratamiento terciario. Antiguamente la tecnología de membrana tenía limitado uso al ser aplicada al tratamiento convencional de Fangos Activados como una etapa más o tratamiento terciaria después del decantador secundario, ahora este tipo de tratamiento debe entenderse como un reactor biológico seguido en el proceso por una membrana la cual puede ser externa o sumergida como se verá más adelante.

Figura 8. Procesos elementales en MBR



Esta figura muestra en general el proceso realizado por el MBR en el cual el agua residual entra en el biorreactor donde es puesto en contacto con la biomasa y donde luego se producen las reacciones biológicas que permiten la degradación de la materia orgánica. El licor de mezcla es bombeado del biorreactor y luego, bajo presión, filtrado a través de la membrana. El efluente es descargado del sistema, mientras que la biomasa es devuelta al biorreactor. El exceso de lodo es purgado y se controla su extracción con el fin de mantener una edad de lodo constante.

Entre las principales ventajas comparativas que presenta un Biorreactor de Membrana respecto del proceso convencional de fangos activados podemos mencionar:

Efluente de calidad: Una eficiente retención de sólidos y de compuestos solubles de elevado peso molecular proporciona un efluente potencialmente reutilizable y elimina la aplicación de un costoso tratamiento terciario de desinfección.

Reducción de la producción de lodos: Hasta un 50% y por consiguiente se logra una reducción de costos de operación al operar a altas edades de fango. Se favorece el desarrollo de bacterias nitrificantes.

Compactación: Se puede operar con concentraciones de 15-30 [g SSLM/L]. Trabajando a la máxima concentración de SSLM la superficie de la planta se puede reducir en un 50% o más.

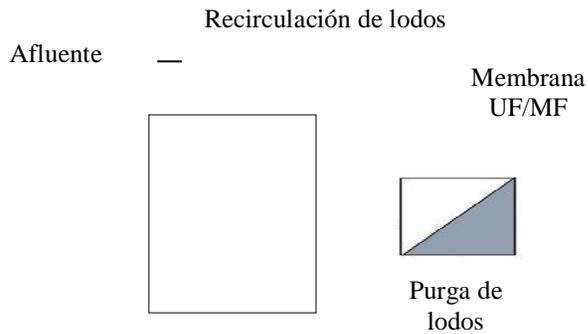
Menor área: Se da la eliminación del decantador secundaria, reduciendo de este modo el espacio requerido para su instalación.

Flexibilidad: Presenta la posibilidad de ampliación de plantas preexistentes sin necesidad de obra civil por su gran estabilidad frente a vertidos de alta carga contaminante.

Las membranas pueden ser incorporadas en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante Biorreactor de Membrana como una etapa de separación sólido-líquido de dos maneras: Externa y Sumergida.

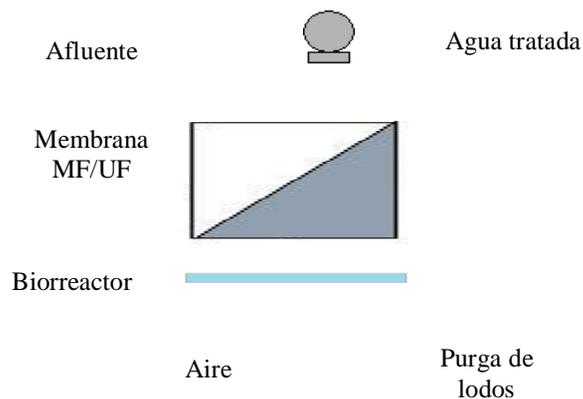
En la configuración con membrana externa mostrada en la figura 9, el licor de mezcla se hace recircular desde el biorreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente y la fuerza impulsora que crea el gradiente de presión entre ambos lados de la membrana, esta presión es ocasionada por la alta velocidad del flujo de recirculación a través de la superficie de la membrana.

Figura 9. Biorreactor con membrana externa.



En la figura 10 se muestra un biorreactor con membrana inmersa, en esta las fuerzas son alcanzadas presurizando el biorreactor o creando presión negativa en el lado del permeado de la membrana, generando un menor gasto de energía. En este caso generalmente se coloca un difusor de aire justo debajo del módulo de membranas para suministrar el oxígeno necesario para el proceso biológico, homogenizando el contenido del tanque y proporcionando una limpieza a la membrana.

Figura 10. Biorreactor con membrana sumergida.



Las membranas deben de limpiarse con periodicidad mediante retrolavado y en ocasiones mediante lavado químico o ambos.

4.2 Tecnología de membranas

Se puede definir membranas como barreras físicas semipermeables que separan dos fases del flujo de entrada, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este proceso selectivo permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente líquido depurado.

Este tipo de tecnología se ha aplicado tanto al tratamiento de agua potable como a la depuración de aguas residuales. El primer biorreactor de membrana fue desarrollado comercialmente por Dorr-Oliver a finales de 1960 (Bemberis et al., 1971)²⁸. A partir de este momento se originó una rápida expansión de la utilización de membranas en procesos de separación, motivada por la fabricación de membranas con capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables.

Las membranas se presentan como una solución a mediano y largo plazo al problema de la escasez del agua, ya que es tal su eficiencia que permite tratar fuentes contaminadas para su potabilización, además de producir un efluente de calidad para su reutilización.

²⁸ Judd, S. (2006) Pág. 11

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de las membranas según el tamaño del poro, tipo de membranas y materiales, información que se ampliará más adelante.

Tabla XIV. Clasificación de Membranas

	Ósmosis Inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Membranas	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica, Asimétrica
Grueso	150 μm	150 μm	150-250 μm	10-150 μm
Capa superficial	1 μm	1 μm	1 μm	1 μm
Tamaño de poro	0.002 μm	0.002 μm	0.05-0.2 μm	0.2-5 μm
Rechazos	HMWC LMWC Cloruro Sodio, Glucosa Aminoácidos Proteínas	HMWC, Mono, di y oligo-sacáridos, Aniones polivalentes.	Macromoléculas, Proteínas polisacáridos y virus	Partículas barro, bacterias
Materiales de membrana	CA capa delgada	CA capa delgada	Cerámica, PSO, CA, PVDF, capa delgada	Cerámica, PP, PSO, PVDF
Módulo de membrana	Tubular, enrollada en espiral y plana	Tubular, enrollada en espiral y plana	Tubular, enrollada en espiral, de fibra hueca y plana	Tubular, fibra hueca y plana
Presión	15-150 bars	5-35 bars	1-10 bars	2 bars

Fuente: Poyatos, J. (2007, marzo) Pág., 47

Entre los parámetros importantes que deben ser considerados en el diseño de una membrana se encuentra su configuración, es decir la geometría de la membrana y la dirección del flujo; su superficie, indicado por el tamaño de poro y el tipo de material de la membrana. Los efectos del tamaño del poro con el ensuciamiento en la membrana están fuertemente relacionados con las

características del líquido a tratar, en particular con el tamaño y distribución de las partículas que contiene.²⁹

Los tipos de membrana que se utilizan en los biorreactores de membrana son de Ultrafiltración y de Microfiltración los cuales deben cumplir una serie de requisitos como:

- Deben ser inertes y no biodegradables.
- Deben ser fáciles de limpiar y de regenerar.
- Deben ser resistentes a los agentes químicos, presiones y temperaturas elevadas.
- Deben tener una distribución de los poros uniforme y elevada porosidad
- Deben ser neutras o presentar carga negativa para evitar la adsorción de microorganismos.
- Deben ser duraderas y fáciles de sustituir.³⁰

4.2.1 Proceso de separación de membrana

Una membrana aplicada al tratamiento de aguas negras es simplemente un material que permite a algunos componentes físicos y químicos pasar más fácilmente por ella que otros. Las membranas son selectivas ya que permiten que unos materiales impregnen a través de ella y otros los rechaza, estos son los que forman el material retenido. El grado de selectividad depende del tamaño de poro de la membrana, la membrana más selectiva está asociada con el proceso de ósmosis inversa (RO) debido a que posee el menor tamaño de poro.

²⁹ Judd, S. (2006)

³⁰ Poyatos, J. (2007, marzo) Pág. 47

Existen procesos en las membranas en los cuales la membrana no es necesariamente usada para retener los contaminantes y permitir el paso del agua. Entre estos procesos podemos mencionar:

- (a) Extracción selectiva de ciertos componentes (extractivo)
- b) Introducción de un componente en la forma molecular (difusiva).

Los componentes rechazados y retenidos por la membrana tienden a acumularse en la superficie de la membrana, produciendo varios fenómenos que conducen a una reducción en el flujo del agua que atraviesa la membrana, aumentando la presión transmembranal. Estos problemas están relacionados con el ensuciamiento de la membrana.

Los cuatro procesos de separación de membrana en los cuales el agua forma el producto final son: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Ósmosis Inversa (RO)

En estas dos tecnologías las membranas actúan como tamices moleculares. La relación tamaño de sustancias contaminantes/distribución de tamaño de poros permite la exclusión de contaminantes en el permeado. Así, las sustancias mayores que el mayor tamaño de los poros serán totalmente rechazadas por la membrana, y las sustancias cuyo tamaño esté comprendido entre el mayor y menor tamaño de poros serán parcialmente rechazadas.³¹

Microfiltración (MF)

Tienen tamaños de poro de 0,1 μm o mayores, pudiendo separar tamaños de partículas dentro del rango 0.1-10 μm . Proporciona una elevada

³¹ Informe de Vigilancia Tecnológica: Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales. Pág. 74

eliminación de sólidos suspendidos, partículas finas, bacterias, virus, macromoléculas y algunas coloidales. Su presión de funcionamiento es similar a la de UF. Se utilizan membranas microporosas del tipo *filtro profundo* dispuestas en cartuchos, que se instalan en línea y del tipo *tamiz*, que se disponen en diferentes configuraciones y que operan en la forma filtración tangencial.

Ultrafiltración (UF)

Tienen tamaños de poro que van desde 0,1 μm hasta menos de 5 nm (0,05 μm). Este tipo de membranas suelen permitir el rechazo de macromoléculas, todo tipo de microorganismos como virus y bacterias, coloidales y otro tipo de partículas. La presión de trabajo se mantiene baja (50 a 500 KPa). Las membranas más utilizadas son las anisótropas donde una delgada capa de poros de pequeño diámetro se encuentra unida, sin discontinuidad, a otra capa más gruesa y microporosa.

Nanofiltración (NF)

Tienen poros de un tamaño inferior a 0,01 μm , lo que permite la eliminación de la mayoría de las especies como iones polivalentes (calcio y magnesio), elimina contaminantes de hasta 0.001 μm de tamaño como quistes, bacterias, virus, materia orgánica, sales, patógenos, pesticidas, turbidez entre otros, excepto iones monovalentes y moléculas de bajo peso molecular.

Ósmosis Inversa

Consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal a partir de otra con alto contenido en

sal. En la *RO* el proceso de separación se debe a las diferentes solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa.

4.2.2 Tipos de materiales de las membranas

Principalmente existen dos tipos de materiales que se suelen utilizar, estos son los poliméricos y cerámicos. Aunque también existen membranas de filtros metálicos estos no tienen ninguna relación con el sistema MBR. El material de la membrana debe ser formado (o configurado) de tal modo para permitir al agua pasar por ella.

Las membranas generalmente son formadas por un número diferente de material polimérico y cerámico, pero casi siempre comprenden una capa delgada superficial que proporciona la permeabilidad requerida sobre un apoyo más grueso y poroso que proporciona estabilidad mecánica. Las membranas cerámicas suelen tener mayor estabilidad química, mecánica y térmica que las membranas poliméricas, pero presentan la desventaja de ser muy frágiles por lo que la más comercializada es la membrana polimérica³².

Las membranas poliméricas por lo general son fabricadas para tener una alta porosidad superficial y la distribución de tamaño de poro estrecha para proporcionar un alto rendimiento y grado selectivo de rechazamiento. El material normalmente posee una resistencia al ataque químico, altas temperaturas y concentraciones de oxidación que surgen cuando la membrana es limpiada químicamente. Hay una extensa cantidad de materiales que se pueden utilizar para la fabricación de membranas, pero las más comúnmente utilizadas en biorreactores son las siguientes³³:

³² Judd, S. (2006). Pág. 24

³³ Poyatos, J. (2007, marzo) Pág., 47

Polifluoruro de Vinilideno (PVDF)

Polietilsulfonas (PES)

Polietileno (PE)

Polipropileno (PP)

4.2.3 Configuración de las membranas

La configuración de la membrana se refiere a su geometría y la manera en que esta es orientada en relación con el flujo de agua. El módulo de membranas define como se agrupan las membranas y permite conocer el comportamiento del fluido sobre la superficie de esta.

La membrana deberá ser configurada para tener:

- a) Un área grande de membrana.
- b) Un alto grado de turbulencia para la promoción de transferencia de masas sobre el lado del afluente.
- c) Un gasto de energía bajo por volumen de agua producido.
- d) Un precio bajo por membrana en relación al área.
- e) Un diseño que facilita la limpieza,
- f) Un diseño que permite la modulación.³⁴

Los cuatro principales módulos que se encuentran en el mercado son:

15-Placa plana

16-Enrolladas espiral

17-Tubular

18-Fibra hueca

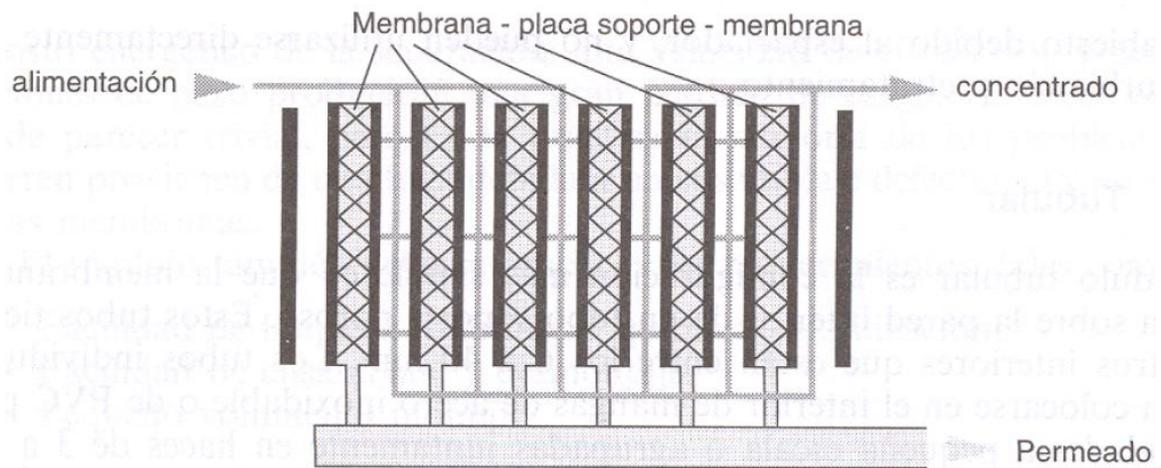
³⁴ Judd, S. (2006) Pág. 26

Placa plana

Este tipo de configuración está formada por membranas planas enrolladas en espiral alrededor de un tubo central. En estos módulos, el influente circula entre las membranas de dos placas adyacentes. Las membranas se encuentran separadas entre sí por medio de una anchura aproximada de 2mm.

En estos sistemas el ensuciamiento de la superficie de la membrana se disminuye introduciendo energía mecánica en el sistema para prevenir que las partículas se adhieran a los poros.

Figura 11. Esquema configuración de membrana de Placa plana



Fuente: Poyatos, J. (2007, marzo) pág. 53

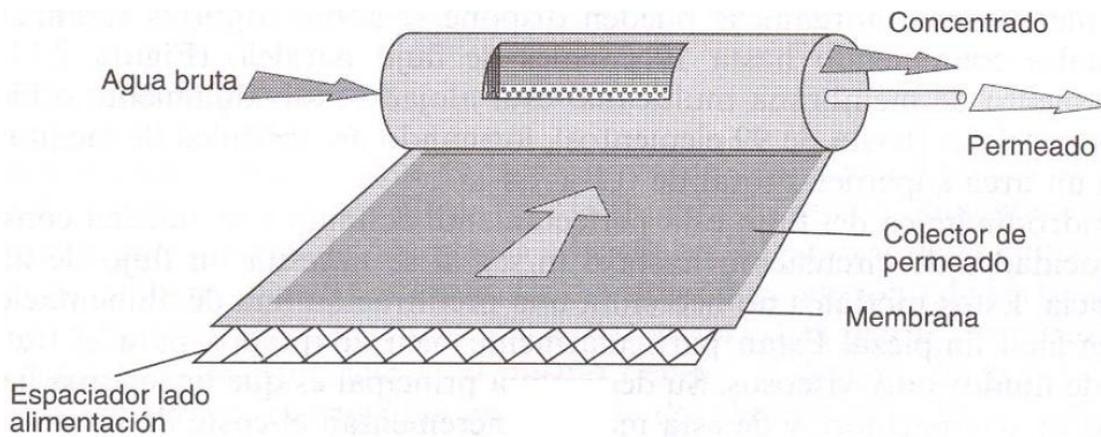
Enrollada en espiral

Estos elementos consisten en dos hojas de membranas separadas por un polímero de textil de refuerzo, esta tela soporta la membrana, para las altas presiones de operación y provee del canal de flujo por donde el agua clarificada

sale y soporta las altas presiones de operación. Esta configuración se llama así porque está formada por membranas planas enrolladas en espiral alrededor de un tubo central. Estos módulos suelen tener 20 cm de diámetro y 100 cm de largo con varias membranas enrolladas que proporcionan una superficie de membrana de 1 – 2 m².

Existen dos desventajas que destacar en este tipo de configuración, la primera que una vez se ha contaminado, tanto la membrana como el contenedor deben reemplazarse, y posee dificultad para manejar materiales viscosos o con gran cantidad de sólidos.

Figura 12. Sistema de membrana en Espiral



Fuente: Poyatos, J. (2007, marzo) pág. 54

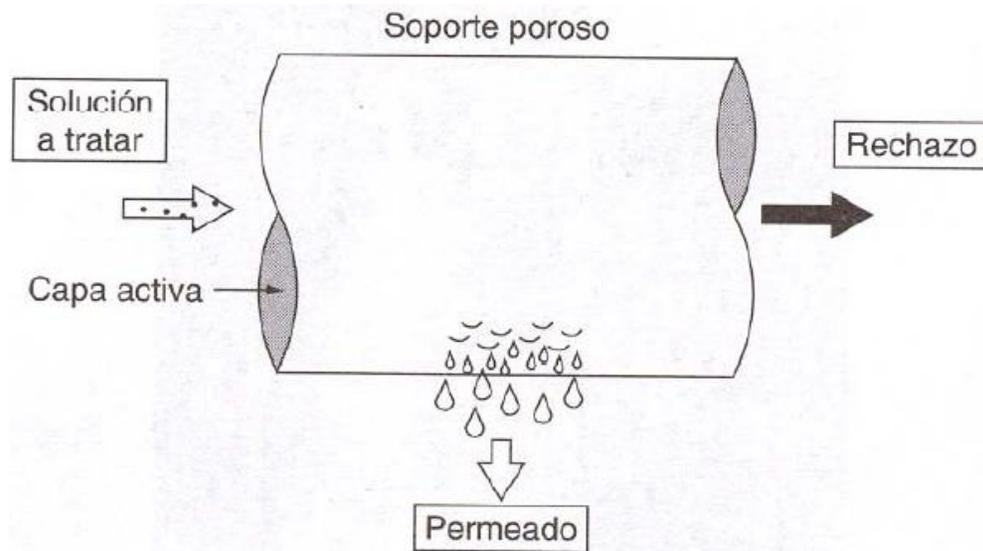
Tubular

Está formado por cáscaras cilíndricas que contienen un número variable de membranas tubulares. Estas membranas están constituidas por un soporte poroso de papel o fibra de vidrio sobre el que se deposita la superficie filtrante. También se construyen en materiales cerámicos. Los módulos tubulares suelen

tener longitudes de 13 cm – 20 cm, con 4 – 6 membranas de 0.5 cm – 1 cm de diámetro, dispuestas en su interior.

El ensuciamiento de este tipo de membrana es más lento que otros, pues utiliza diámetros de tubo mayores cuando la filtración es de adentro hacia afuera. Entre sus ventajas se encuentran que sus orificios permiten manejar partículas más grandes y procesar influentes con grandes concentraciones de partículas. , su mayor desventaja lo representan los costos asociados con el reemplazo de los tubos de membrana.

Figura 13. Esquema de circulación de flujo de Membrana Tubular



Fuente: Poyatos, J. (2007, marzo) pág. 51

Fibra hueca

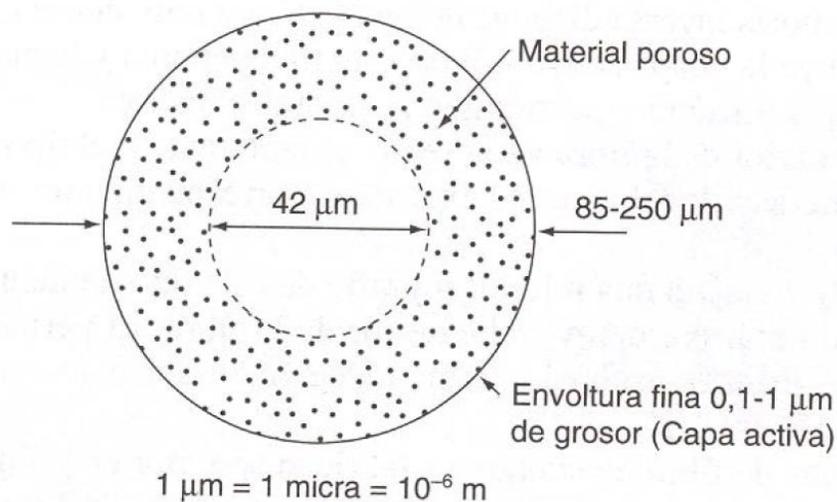
La caída de presión en este tipo de módulos es de 0.7 bar – 70 bar, según el tipo de aplicación. Los elementos de filtración consisten en fibras que pueden ser presurizadas en el interior o exterior y la alimentación se puede producir de dos maneras:

El influente tiene lugar por dentro de las fibras (configuración de dentro – fuera) o bien por fuera de las fibras (configuración exterior – interior). En la configuración dentro – fuera, la alimentación ingresa al interior de la membrana y el permeado se obtiene al pasar del interior de la membrana al exterior. En la configuración exterior – interior o fuera – dentro, el influente viene por fuera de la membrana y el permeado se obtiene al pasar del exterior al interior de la fibra, quedando el retenido en el exterior, esto permite que se pueda tratar influentes con mayor concentración de sólidos en suspensión.

El diseño de los módulos también determina otras características como la demanda de energía, la capacidad para separar los sólidos en suspensión, la facilidad para limpiarlos y reemplazarlos, la densidad de empaquetamiento.

Entre las ventajas que presenta esta membrana están que la membrana puede retrolavarse periódicamente para compensar el ensuciamiento de la misma.

Figura 14. Sección transversal membrana de fibra hueca



Fuente: Poyatos, J. (2007, marzo) pág. 52

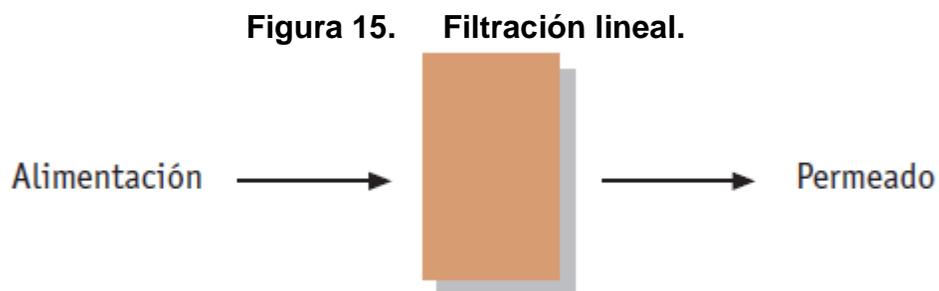
4.2.4 Proceso de filtración

Como vimos en la sección 4.2 Las membranas son barreras semipermeables selectiva que separa en dos fases sólido-líquida el flujo de entrada, un material permeado el cual traspasa la membrana y uno concentrado el cual se queda retenido, impidiendo en el proceso de filtración el paso de contaminantes.

Según la dirección del flujo con relación a la membrana, existen dos tipos de filtración las cuales son: filtración lineal y filtración tangencial.

Filtración en línea

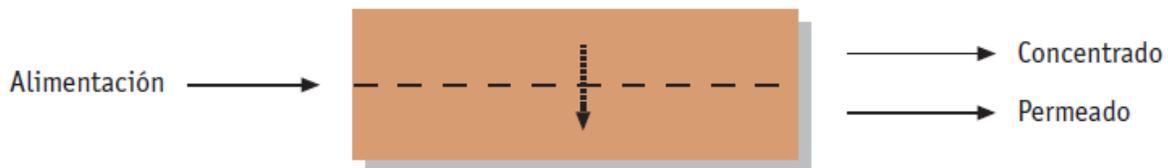
Las membranas se disponen en la línea de flujo del efluente que se desea tratar, quedando las partículas contaminantes retenidas sobre la superficie del medio y generándose una corriente depurada. Cuando se realiza una filtración directa como esta, toda el agua que entra en la superficie de la membrana es presionada para pasarla, algunos sólidos y componentes permanecerán en la membrana mientras que el agua fluye a través de esta. Conforme se vaya acumulando material retenido, el agua experimentará mayor resistencia a pasar a través de la membrana y dado que la presión del agua entrante es continua, esto resultará en un decrecimiento del efluente producido, por lo que será necesaria una limpieza.



Filtración tangencial

El efluente que se desea tratar se hace circular tangencialmente a la membrana lo cual permite que la diferencia de presión en el flujo haga posible que parte de este atraviese la membrana mientras el resto de dicho flujo sigue fluyendo, arrastrando el retenido continuamente reincorporándola al influente y de esta manera generando dos tipos de corrientes: concentrado y permeado. La primera de estas posee una concentración de contaminantes mayor que en la alimentación y la segunda que posee una concentración de contaminantes mínimo que hace posible su vertido o reutilización.

Figura 16. Filtración tangencial.



Estos dos tipos de filtración poseen limitaciones y ventajas. Entre las limitaciones del flujo lineal se puede mencionar que al ser este directo provoca que la membrana se tape con mayor rapidez que en el caso de la filtración tangencial, esto ocasionará que la membrana deba ser limpiada con mayor frecuencia. En el caso del flujo tangencial, este provoca una auto limpieza en la superficie de la membrana, disminuyendo la frecuencia y los costes de limpieza. Por este motivo la mayoría de los MBR se realizan con este tipo de filtración.

4.2.4.1 Flujo de filtrado

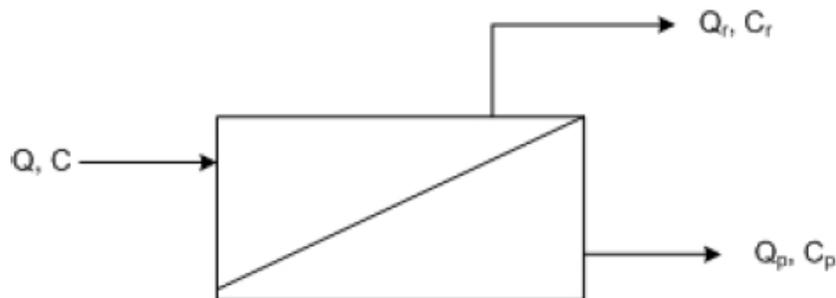
Se entiende como flujo de filtrado a la cantidad del líquido que pasa a través de la membrana en un tiempo y área determinado $[\frac{m^3}{m^2s}]$. Para el control

del proceso de filtración, es importante determinar la influencia de los siguientes parámetros en el flujo que atraviesa la membrana.

- Resistencia intrínseca de la membrana
- Fuerza operacional por unidad de área.
- Condiciones hidrodinámicas
- Ensuciamiento y limpieza de la membrana

En el proceso de filtración coexisten tres tipos de corrientes las cuales son: la alimentación, el concentrado y el permeado.

Figura 17. Balance de masa en la membrana.



Realizando el balance de masas a la membrana de la figura 17 se obtiene lo siguiente:

$$Q = Q_p + Q_r \quad [4.1]$$

$$Q \cdot C = Q_p \cdot C_p + Q_r \cdot C_r \quad [4.2]$$

Donde

Q: caudal de la alimentación (m^3/s) (influyente)

Q_p : caudal de permeado (m^3/s)

Q_r : caudal del concentrado (m^3/s)

C : concentración de la alimentación (Kg/m^3)

C_p : concentración de permeado (Kg/m^3)

C_r : concentración del concentrado (Kg/m^3)

A partir de estas dos ecuaciones se determinan dos porcentajes que permiten conocer la capacidad de filtración de la membrana, estos porcentajes son:

Porcentaje de conversión [Y]: La conversión es la cantidad de agua de alimentación que es recuperada como permeado.

$$Y = 100 \frac{Q_p}{Q} \quad [4.3]$$

Porcentaje de rechazo [R]: En el proceso de filtración, según el tamaño del poro, la membrana permite pasar a ciertos materiales de manera selectiva mientras que a otros los rechaza.

$$R = 100 * \frac{1 - C_p}{C} \quad [4.4]$$

4.2.4.2 Presión de filtrado

Para lograr la filtración de agua a través de la membrana es necesario la existencia de una fuerza que haga que este líquido la atraviese, en el caso del sistema MBR, esta fuerza impulsora se le conoce como gradiente de presión o también conocido como presión transmembranal (PTM).

Se define PTM como la presión necesaria para hacer pasar el agua a través de la membrana. En un flujo tangencial la presión media transmembranal se determina así.

$$PTM_m = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \quad [4.5]$$

Donde:

- PTM_m: presión media a través de la membrana (bar)
- P_i: presión a la entrada del módulo de membrana (bar)
- P_o: presión a la salida del módulo de membrana (bar)
- P_p: presión de permeado (bar)

4.2.5 Ensuciamiento en membranas

El ensuciamiento de la membrana es un problema que ocurre debido a la presencia en la alimentación de sustancias que interaccionan con ella precipitándose en su superficie o penetrando en su interior y siendo absorbidas en sus paredes, reduciendo de esta manera el diámetro de paso de ellas mismas y el agua a través de la membrana.

Entre las consecuencias que presenta el ensuciamiento en las membranas se encuentra una disminución del flujo de permeado debido al aumento de la resistencia de la membrana para permitirlo. Al aumentar progresivamente la diferencia de PTM con el fin de mantener el flujo de permeado puede acelerar el proceso de ensuciamiento e incluso llevarlo a una situación de taponamiento irreversible y estropear la membrana.

Según el caso de ensuciamiento así será el método aplicado para realizar la limpieza, ya sea con un retrolavado (cambio de dirección del flujo) o cuando el ensuciamiento sea en el interior de la membrana se deberá realizar un lavado químico.

Existen varias formas con las cuales se podría retrasar el problema del ensuciamiento, como optimizar la diferencia de presión de trabajo para retrasar el taponamiento de los poros, operando a presiones menores que las de flujo de permeado máximo pero con una presión suficiente para que la relación flujo de permeado-tiempo de utilización de la membrana sea ventajosa; mejorar el PH de trabajo; determinar el tipo de pretratamiento a hacer para tener un mejor control en el ensuciamiento.

Otra manera de prevenir el ensuciamiento es haciendo una buena elección de la configuración de membrana a utilizar, ya que se ha comprobado que las membranas del tipo fibras huecas, de pequeño diámetro, dispuestas con orientación vertical y baja densidad de empaquetamiento tienen un mejor comportamiento al ensuciamiento, que las membranas con mayor porosidad y mayor diámetro de poro se produce antes la reducción en el flujo de permeado³⁵.

Existen varios tipos de ensuciamiento, los cuales pueden ser agrupados en tres categorías principales: inorgánico, orgánico y bioensuciamiento.

Ensuciamiento Inorgánico:

A continuación se presenta una tabla con algunos elementos y compuestos que pueden causar ensuciamiento de tipo inorgánico.

³⁵ Informe de vigilancia tecnológica. Tratamiento Avanzado de aguas residuales industriales. Pág. 73

Tabla XV. Ensuciamiento inorgánico

Sílice	Los depósitos de sílice son muy duros, frágiles y con aspecto de porcelana, su limpieza debe hacerse en medios alcalinos, valores de PH y Temperatura elevados y detergentes.
Aluminio	El aluminio encontrado en las membranas puede tener tres orígenes: iónico, coloidal y de exceso de coagulantes. Para su limpieza se utiliza un elevado PH y temperatura.
Hierro	se deposita en las membranas como óxido férrico y el hierro proveniente de coagulantes, típicamente cloruro o sulfato férricos
Carbonato Cálcico, CaCO₃	El carbonato cálcico precipita muy rápidamente formando precipitados granulados y porosos.
Sulfato Cálcico, CaSO₄	Forma precipitados duros, densos y frágiles. Su eliminación es algo complicada al ser altamente insoluble en agua.
Fosfato Cálcico, Ca₃(PO₄)₂	Los depósitos de fosfatos presentan una coloración marrón-grisácea y se eliminan bien con una limpieza ácida media-suave.
Sulfato de Bario, BaSO₄	El sulfato de bario es insoluble en agua. Su eliminación pasa por el uso de agentes quelantes.

Fuente: Lopetegui, J. et., al. Limpieza química de membranas de MF y UF en el tratamiento de aguas residuales. Pág. 4 - 6

Materia Orgánica

Aunque las membranas se operen en régimen de flujo cruzado o tangencial con el fin de minimizar la acumulación de soluto y coloide en la capa límite, una parte de los coloides del agua de alimentación son transportados a la superficie de la membrana donde se adsorben, formando una delgada capa ensuciadora

Es importante reducir al máximo la materia orgánica coloidal (MOC), especialmente aquella que por tamaño molecular, se aproxime al tamaño de los poros de la membrana. Los sistemas MBR presentan la ventaja que el proceso biológico situado justo antes del sistema de membranas, elimina eficientemente

la materia orgánica biodegradable (MOB). Otro factor interesante en la minimización del ensuciamiento orgánico es la temperatura. Debido a que los MBR eliminan elevadas cargas volumétricas (kg DBO/m³d) en procesos exotérmicos, la temperatura de los reactores suele ser elevada. Esto favorece la disolución de especies coloidales que de otro modo podrían ser potenciales “bloqueadores” de poros.

Bioensuciamiento:

Los microorganismos también son transportados hacia la superficie de la membrana, donde se adsorben, crecen y se multiplican a expensas de los nutrientes del agua, formando una capa biológica o biocapa que puede comprometer también el rendimiento del sistema. En sistemas MBR, este efecto está más atenuado por la baja concentración de MOB en el circuito de membranas, pese a la presencia de una elevada cantidad de biomasa en forma de SS.³⁶

4.2.5.1 Control del ensuciamiento

El ensuciamiento puede ser reducido de las siguientes maneras:

- a) Por un pretratamiento que nos permita la eliminación de las partículas causantes del ensuciamiento.
- b) Provocar la turbulencia en las membranas.
- b) Provocar turbulencia en la membrana.
- c) Reducir el flujo.

³⁶ Lopetegui, J. Limpieza química de membranas de MF y UF en el tratamiento de aguas residuales. Pág. 6,7.

Estas tres opciones generan un coste adicional en la inversión y operación en la implementación de la planta de tratamiento. La opción “a” no es viable para un sistema MBR, ya que estas partículas causantes del ensuciamiento constituyen una carga importante de materia orgánica necesaria para el tratamiento biológico. La generación de turbulencia mediante el sistema de aireación es la forma más apropiada para un MBR. La reducción de flujo es otra técnica utilizada en los MBR principalmente sumergidos, ya que reducen el flujo que conlleva operar con PTM inferiores, lo cual provoca un menor ensuciamiento de las membranas.³⁷

4.2.5.2 Factores que afectan el ensuciamiento.

Se pueden identificar tres factores principales que afectan el ensuciamiento, estos son: las características de la membrana, la biomasa y las condiciones de operación.

Características de la membrana:

Como se ha considerado en secciones anteriores, la configuración de la membrana juega un papel importante en el comportamiento de esta y su ensuciamiento, la configuración más recomendada es de fibra hueca, por su comportamiento ante este problema y que presenta la ventaja de poder retrolavarse, reduciendo así el ensuciamiento. Entre otras características de la membrana que repercuten en el ensuciamiento están el tipo de material, la hidrofobicidad, porosidad y tamaño del poro en donde las partículas que ocasionan el ensuciamiento pueden introducirse en los poros de la membrana impidiendo el paso del agua.

³⁷ Alcarria, M. (Abril 2005, Pág. 77)

La Biomasa:

El licor mixto presente en el biorreactor es una mezcla compleja de microorganismos procedentes de la degradación de los sólidos en suspensión del agua y de las células de las reacciones biológicas que tienen lugar en el tanque. Esta materia tanto disuelta como suspendida contribuye al ensuciamiento de la membrana.

Al fraccionarse los flóculos quedan expuestas las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) presentes en la estructura del floculo que contribuyen a la formación de ensuciamiento. Algunos autores han identificado la EPS como uno de los factores más importantes causante del ensuciamiento.

Condiciones de operación:

La velocidad de flujo tangencial es uno de los factores operacionales con mayor efecto sobre el ensuciamiento, este influye en el transporte de masa de partículas, haciendo que fluyan tangencialmente a la superficie de la membrana, reduciendo así el grosor de la torta. En los MBR con membrana sumergida, la velocidad del flujo tangencial es creada por un sistema de aireación situado justo debajo del módulo de membranas.

Esta aireación no sólo proporciona el oxígeno necesario para la biomasa en el proceso biológico, sino que también mantiene los sólidos en suspensión y genera las burbujas gruesas que friegan la superficie de la membrana disminuyendo el ensuciamiento.

4.3 Consideraciones de diseño en un Biorreactor de membrana

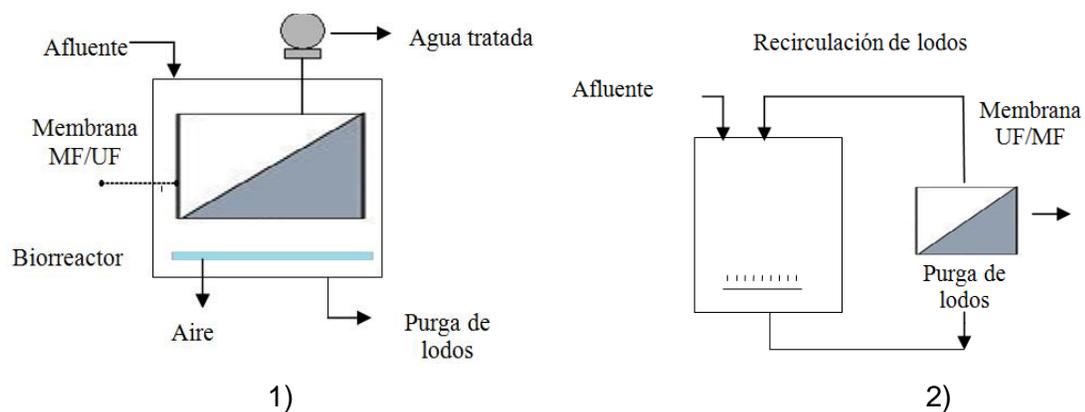
En el diseño de un biorreactor de membrana es necesario tomar en cuenta una serie de factores que hacen de esto una tarea compleja, ya que

para la realización de este es necesario elegir un tipo de membrana a utilizar, lo cual a su vez está relacionado con el costo de operación y el ensuciamiento. Por lo que la elección de la membrana estará relacionada con su coste y su comportamiento con el problema del ensuciamiento. A continuación se expone una serie de factores a tomar en cuenta para el diseño de un MBR.

4.3.1 Selección del tipo de configuración MBR

Como se ha considerado en secciones anteriores, los biorreactores de membranas están compuestos de dos partes, una lo constituye el reactor biológico el cual es el responsable de degradar los compuestos del agua residual; la otra parte lo forma una membrana que se encarga de la separación líquido – sólido. Según la ubicación que posea la membrana en la planta de tratamiento mediante MBR, esta puede ser MBR con membrana sumergida o MBR con membrana externa.

Figura 18. MBR con 1) membrana sumergida, 2) membrana externa



La elección del tipo de configuración está íntimamente relacionada con el diseño de un MBR, ya que entre ambas opciones existen ciertas diferencias en

cuanto a parámetros operacionales y capacidades, que determinan la elección de uno u otro.

MBR con membrana sumergida:

La membrana que realiza la separación sólido-liquido, se encuentra inmersa en el reactor biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada presurizando el biorreactor o creando presión negativa en el lado permeado de la membrana. Generalmente se coloca un difusor de aire debajo del módulo de la membrana el cual cumple la función de homogeneizar el contenido del tanque en el proceso biológico, a la vez que contribuye en la reducción del ensuciamiento de la membrana al generar turbulencia en el fluido.

Entre las ventajas que presenta la aireación dentro del reactor se encuentra que este proporciona el oxígeno necesario para el mantenimiento de la biomasa y para la mezcla del biorreactor y contribuye a la formación de un flujo cruzado turbulento sobre la superficie de la membrana, el cual ayuda reducir la acumulación de materia retenida en la superficie de esta y por tanto incrementa el ciclo operacional del sistema.

La limpieza de la membrana se realiza a través de frecuentes retrolavados con agua permeada más aire y ocasionalmente con soluciones químicas.

MBR externo o con recirculación:

En esta configuración la membrana que separará la materia suspendida y el agua se encuentra en la parte exterior del reactor biológico por lo que el licor de mezcla debe ser recirculado desde el biorreactor hasta la unidad de

membrana. La fuerza impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo a través de la superficie de la membrana³⁸.

Entre las desventajas de esta configuración respecto a la anterior están: que el ensuciamiento es mucho más profundo y se requiere una limpieza más frecuente y rigurosa para restaurar el flujo operacional, disminuyendo así la vida útil de la membrana y que en los MBR con configuración exterior se presenta un mayor consumo de energía lo cual implica mayores costes de operación.

El consumo de potencia debido a la bomba de recirculación puede calcularse de la siguiente manera³⁹:

$$P_c = \frac{\Delta P \cdot Q_r}{n} \quad [4.6]$$

Donde:

Q_r: caudal de recirculación (m³/d)

ΔP: PTM (bar)

n: Eficiencia de la bomba.

4.3.2 Selección del tipo de membrana a utilizar

La elección de la configuración de membrana a utilizar es una tarea compleja, ya que es necesario sopesar varias ventajas y desventajas que cada una de las configuraciones presenta, así como considerar ciertos factores operacionales, las características del influente y del efluente que queremos obtener. La elección de la membrana está íntimamente relacionada con los

³⁸ González, L. (2006, septiembre) Pág. 51

³⁹ Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 86)

costes de inversión y de utilización de energía (coste de operación) en el tratamiento de aguas mediante el sistema MBR. Como se mencionó anteriormente, el tipo de configuración MBR con membrana sumergida presenta un coste económico considerablemente menor en materia de consumo de energía que una membrana exterior, así mismo la membrana sumergida presenta un menor ensuciamiento debido a que tiene el difusor de aire debajo de ella, lo cual genera una turbulencia que favorece a la membrana para evitar limpiezas con mayor frecuencia.

Es importante mencionar algunos de los factores básicos que afectan el coste de filtración a parte del caudal a tratar y sus características, también lo afectan el precio propio de la membrana y su instalación, incluyendo todos los componentes asociados y costes de operación (energía, recambio y regeneración de membranas)⁴⁰.

Debido a que en la actualidad el desarrollo de tecnología va orientado a la utilización de una membrana sumergida por las ventajas que se mencionaron anteriormente, esto sugiere la utilización de una configuración de membrana capaz de eliminar los sólidos en suspensión, que tenga un consumo de energía relativamente bajo y que sea compacta. Estos aspectos descartan la posibilidad de utilizar membranas de tipo espiral y tubular.

La elección de la configuración de la membrana también está relacionada con el tipo de uso que se le dará, por ejemplo gran parte de industrias prefiere la utilización de un sistema MBR con membrana externa de placa plana, mientras que en la mayoría de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas se está utilizando la configuración de membrana sumergida de fibra hueca.

⁴⁰ *Ibíd.* pág. 99

Al considerar que la marca canadiense Zenón con su membrana de fibra hueca presenta gran cobertura en el mercado europeo, agregado que este tipo de configuración posee la ventaja ante las otras configuraciones de poder realizarse en ella un retrolavado como parte de la limpieza que se le efectúa a la membrana, lo cual permite aumentar el ciclo de utilización de este tipo de membrana, la membrana de fibra hueca es una buena alternativa.

Tabla XVI. Características de los diseños comerciales de reactores MBR con membranas integradas.

	Zenon	USFilter	Kubota	Mitsubisi-Rayon
Tipo membrana	Fibra hueca	Fibra hueca	Láminas planas	Fibra hueca
Disposición membranas	Vertical	Vertical	Vertical	Horizontal
Tamaño poro (μm)	0.04	0.1	0.4	0.1/0.4
Material membrana	Registrado por la empresa	PVDF	Polietileno	Polietileno
Superficie módulos (m^2)	31.6	9.3	0.8	105
Método limpieza	Cambio de flujo pulsante	Cambio de flujo	Cambio de flujo	Cambio de flujo
Frecuencia lavado	0.5/15 – 1/15	1/15	1/60	2/12
Método recuperación membrana	Lavado con productos químicos	Lavado con productos químicos	En el propio sistema con cloro mediante un flujo contrario al de operación	En el propio sistema con cloro mediante un flujo contrario al de operación.
Frecuencia procedimientos recuperación	+/- 3 meses	+/- 2 meses	+/- 6 meses	+/- 3 meses
Forma de llevar a cabo recuperación	Ex situ/ in situ	Ex situ	In situ	In situ

Fuente: Informe de vigilancia tecnológica. Tratamiento Avanzado de aguas residuales industriales. Pág. 93

4.3.3 Variables y parámetros

Se entiende por variable a toda magnitud cuantificable, que tiene una influencia directa en un proceso en estudio y cuya causa de variación cuantitativa es ajena al sistema que se estudia y sólo depende de hechos externos.

Por otra parte, se entiende como parámetro a las magnitudes que expresan el resultado del tratamiento y que deben considerarse para un buen conocimiento del proceso⁴¹.

4.3.3.1 Variable definida

Los sólidos en suspensión en el licor mezcla (MLSS) puede incrementarse o disminuirse según el tipo de aceptación que presente la membrana a la carga contaminante y a la depuración a la cual se quiere llegar. Al elevar los MLSS se puede visualizar cual es el comportamiento técnico y biológico de la planta.

Esta variable dará información de la cantidad de sólidos en suspensión que hay en el reactor biológico, que está íntimamente unido a la concentración de microorganismos que existen en el reactor biológico⁴².

4.3.3.2 Parámetros definidos

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) permite ver de manera indirecta la cantidad de materia orgánica que hay presente en el agua. Este parámetro se basa en la capacidad que presentan los microorganismos de

⁴¹ Poyatos, J. (2007, marzo) Pág. 85

⁴² *Ibíd.*, pág. 85

consumir los compuestos orgánicos en un ambiente aeróbico, por lo que proporciona información de la biodegradabilidad del flujo a tratar.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que nos sirve para saber la cantidad de materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable que existe en el agua residual⁴³.

4.3.4 Parámetros operacionales

Existen esencialmente tres elementos principales en un MBR que contribuyen en los costos de operación, sin tomar en cuenta el reemplazo de la membrana. Estos son:

1. Líquido de bombeo
2. Aireación
3. Mantenimiento de membrana

De estos tres parámetros el más importante sobre todo en los MBR con membrana sumergida es la aireación ya que esta sirve tanto para limpiar la membrana como para mantener la biomasa viable.

Para diseñar un MBR es necesario tener conocimiento de la calidad del flujo a tratar ya que este determina la cantidad de oxígeno demandada por el biotratamiento y la aireación necesaria para el control del ensuciamiento⁴⁴.

⁴³ *Ibíd.*, pág. 85, 86.

⁴⁴ Judd, S (2006) Pág. 124

4.3.4.1 Líquido de bombeo

Los principales parámetros operacionales en un MBR lo son el flujo (J) y la presión transmembranal (TMP) de los cuales podemos obtener la permeabilidad (K) $[J/\Delta P_m]$. En un MBR con configuración de membrana sumergida, la pérdida de presión no tiene una importancia considerada en la demanda de energía, aunque sirve como indicador del estado de ensuciamiento de la membrana. Aunque la aireación es el proceso con mayor demanda de energía, el bombeo también consume cantidades considerables de energía en las que se incluyen varias operaciones de transferencia de líquido, como de un tanque de equilibrio al biorreactor con la membrana inmersa y del tanque de membrana al de denitrificación. Una ecuación que nos da una aproximación de la energía requerida es la siguiente:

$$W_h = \frac{\rho g H}{1000 \varepsilon} * Q_{pump}/Q_p \quad [4.7]$$

Donde:

W_h = Poder de entrada a la bomba [Kw]

$\rho g H$ = donde ρ es la densidad del fluido, g es la constante gravitacional y H es la altura máxima que puede alcanzar la bomba incluyendo todas las posibles pérdidas (metros columna de agua) [m.c.a].

ε = Eficiencia de la bomba

Q_{pump}/Q_p = Valor que tiende a r , (este valor puede estar entre 1 incluso a 4 (Metcalf y el Remolino, 2003).

4.3.4.2 Aireación

El proceso de aireación es requerido en el reactor biológico debido a la necesidad del licor de mezcla de aire para la agitación de sólidos que permite mantener una mezcla completa de la biomasa mediante un flujo turbulento, y que proporcione el oxígeno disuelto necesario para la existencia de una población de micro-organismos viable en el tratamiento biológico. La membrana es un elemento dentro del biorreactor que debe ser ventilada, para remover los sólidos retenidos en su superficie, es por este motivo que se le coloca un difusor por debajo con el objetivo de contribuir a la reducción del ensuciamiento y disminuir la frecuencia de limpieza de la membrana.

Existen dos tipos principales de aireación los cuales son: burbuja gruesa y burbuja fina, usualmente el tipo de aireación de burbuja fina es utilizada en el biorreactor mientras el de burbuja gruesa en la membrana. Cuando la membrana se encuentra sumergida en el biorreactor se puede usar la de burbuja gruesa ya que esta proporciona un sistema de limpieza continuo en la membrana debido a las fuerzas transversales de barrido que produce el flujo cruzado. Es de considerar que este tipo de difusor de burbuja gruesa es más económico que el de burbuja fina.

En el proceso de los MBR la demanda de oxígeno es mayor a la requerida por el proceso de fangos activados ya que el MBR opera con elevadas edades de fango. Un aumento en el flujo de aireación ayuda a reducir la producción de fangos porque al contar con mayor oxígeno, los microorganismos pueden oxidar la materia orgánica contenida en el agua residual.

Por tanto el suministro de aire debe ser adecuado para satisfacer:

1. La degradación de la DBO del agua residual
2. La respiración endógena de los microorganismos.
3. Proporcionar un mezclado adecuado
4. Los requerimientos de oxígeno disuelto para conseguir una nitrificación completa⁴⁵.

4.3.4.3 Mantenimiento de membrana

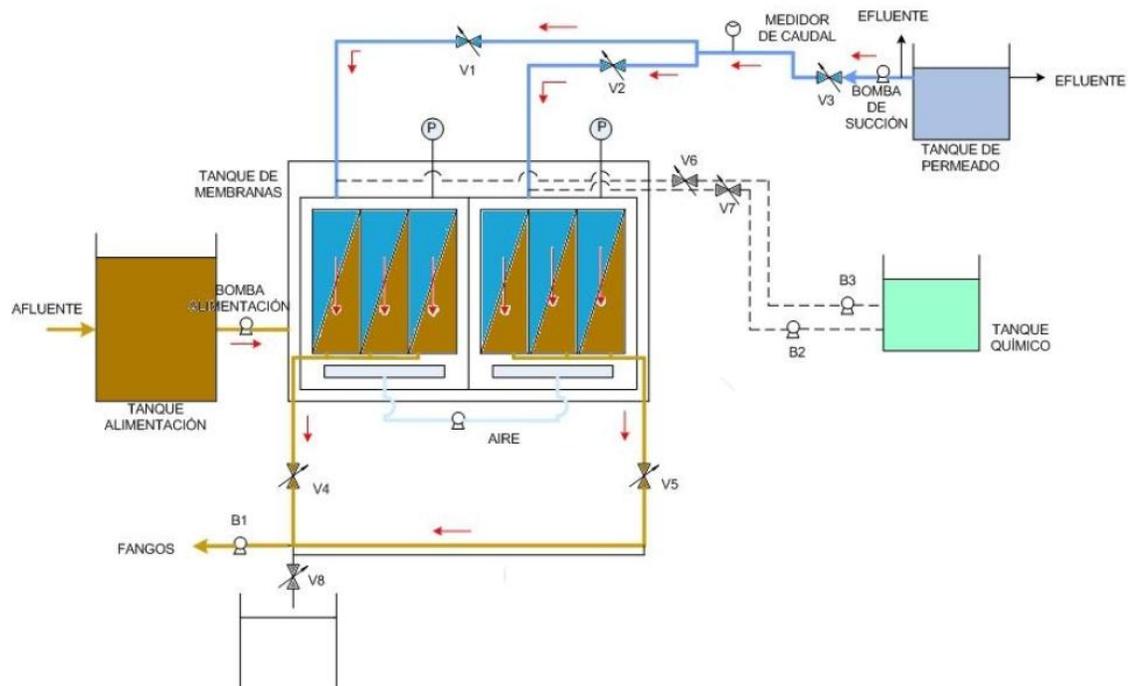
El mantenimiento de la membrana es un parámetro que influye en el costo de operación del MBR, debido a la limpieza tanto física como química que se le debe practicar. Aunque como se ha visto algunas membranas como las de configuración de fibra hueca se les puede practicar un retrolavado para su limpieza, el ensuciamiento en las membranas puede ocasionar la pérdida del flujo de permeado o incluso la sustitución de la membrana, lo cual presenta un coste significativo.

Como se consideró en el apartado 4.2.3 existen diferentes tipos de membrana como lo son las membranas orgánicas de fibra hueca, tubulares y planas y las inorgánicas que pueden ser tubulares de material cerámico, en la sección 4.2.4 se hace mención que la filtración podía ser de flujo cruzado en este tipo de configuraciones, ya que esta forma de filtración contribuye a que no se forme de manera rápida una torta en la superficie de la membrana permitiendo una operación de continuo durante periodos más largos. Este tipo de autolimpieza se da debido al difusor de aire que se coloca en la parte inferior de las membranas en el caso de membranas sumergidas y por la propia recirculación del agua en el caso de las membranas externas.

⁴⁵ Alcarria, M. (Abril 2005, pág.. 96)

Aunque el flujo cruzado y la aireación de burbuja gruesa en el caso de las membrana sumergidas permitan eliminar algunas partículas depositadas en la membrana, cuando los niveles de ensuciamiento lo requieren y en el caso de las membranas externa, es necesario la realización de un lavado físico o químico que dependerá de la membrana y configuración de proceso así como de la calidad del flujo de alimentación, del flujo de permeado y tiempo de operación. Para disminuir la frecuencia con la que se realiza una limpieza y por tanto los costos de operación y mantenimiento se pueden realizar retrolavados periódicos que permitan prevenir el problema del ensuciamiento. Cuando el retrolavado es insuficiente para limpiar la membrana, se debe hacer un lavado químico.

Figura 19. Esquema retrolavado en membrana sumergida.



Fuente: Alcarria, M. (Abril 2005, Pág. 79)

En la figura 19 durante el proceso de filtración la bomba de succión aspira el agua depurada del interior de la membrana, parte de esta agua se

almacena en un depósito para luego utilizarla en el retrolavado. En el retrolavado la válvula V₃ se posiciona automáticamente de manera que la bomba de succión al aspire el agua tratada del depósito de permeado y la introduzca a presión en la membrana eliminando los sólidos que habían retenidos en su superficie. Durante el retrolavado se abre una válvula de rechazo (válvulas V4 y V5) para descargar el concentrado y agua de retrolavado, que puede recuperarse, tratarse, reciclarse y reutilizarse⁴⁶.

4.3.5 Otros parámetros de diseño

4.3.5.1 Edad y producción de fangos

El sistema de tratamiento por MBR opera con tiempo de retención de sólidos o edad de fangos mayores respecto a los tratamientos convencionales, esto favorece entre otras cosas el desarrollo de microorganismos nitrificantes de crecimiento lento y de este modo se puede dar la eliminación de productos lentamente biodegradables.

Los biorreactores de los MBR pueden operar con 15 – 30 g MLSS/L y con edades de fango de hasta 40 días como consecuencia se permite el crecimiento de una mayor diversidad de microorganismos y una menor producción de fango de hasta un 40% lo cual traerá consigo una reducción en los costos de operación⁴⁷.

Una de las ventajas de los MBR es la baja producción de fangos, debido a las elevadas concentraciones de biomasa con las que se puede operar la cual proporciona al sistema tiempos de permanencia prolongada de la biomasa y nutrientes y el alimento necesario a las bacterias para que estas puedan

⁴⁶ *Ibíd.*, pág. 79

⁴⁷ Centro Canario del Agua (2003) Introducción a los biorreactores de Membrana pág. 10, 11.

sobrevivir. Una manera de casi anular la producción de fangos sería el aumento en la concentración de biomasa sobre 50 g/L (Stephenson et. al. 2000, p. 54)⁴⁸, pero esto generaría un aumento de la viscosidad del flujo a tratar por lo que se podría producir un mayor ensuciamiento en la membrana y por tanto una disminución en el efluente producido. La viscosidad de los fangos se vuelve significativa cuando la concentración de biomasa es superior a 25 g/L⁴⁹

4.3.5.2 Caudal máximo

La determinación del caudal de agua residual producido por un establecimiento que será sometido a un sistema de tratamiento es fundamental a la hora de proyectar el diseño de las instalaciones de tratamiento y regeneración de las aguas residuales. Debido a la variación que el caudal a tratar presenta a través del día, teniendo horas determinadas de mayor consumo, el caudal con el que se diseña una instalación de tratamiento de aguas residuales usualmente es el caudal medio diario, siempre tomando en consideración los caudales punta alcanzados durante los días o meses.

Es importante tener en consideración que en un sistema de tratamiento MBR, el caudal máximo a tratar se ve limitado por la cantidad del efluente que puede atravesar los poros, debido a que la capacidad de tratamiento del agua está estrechamente ligado con la superficie de la membrana, el tipo de membrana, la temperatura del líquido, la presión transmembranal y el nivel de ensuciamiento de la membrana. Es por ello que una membrana debe ser diseñada para manejar caudales máximos que van desde 1.5 a 2.0 veces el caudal de entrada (diseño)⁵⁰.

⁴⁸ Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 97)

⁴⁹ Centro Canario del Agua (2003). Pág. 14.

⁵⁰ González, L. (2007). Pág. 55

4.3.5.3 Eliminación biológica de nutrientes. (Desnitrificación)

En este proceso de eliminación de nutrientes, primero toma lugar un proceso de nitrificación en donde por medios bioquímicos ocurre la oxidación del amoníaco en condiciones aeróbicas para obtener nitrato. En este proceso, las bacterias son los microorganismos encargados de la conversión del nitrógeno amoniacal (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-). La nitrificación es un proceso característico de los MBR ya que los tiempos de retención de sólidos (TRS) elevados de este sistema de tratamiento permite que los microorganismos autótrofos de lento crecimiento puedan oxidar los compuestos nitrogenados del licor mixto y proporcionar un efluente de calidad⁵¹.

El proceso de nitrificación debe cumplir con condiciones de temperatura y oxígeno disuelto adecuado, así también debe ejercerse un control sobre los contaminantes en el influente para que no presente exceso de contaminantes orgánicos e inorgánicos que las bacterias no puedan descomponer. Para una nitrificación exitosa son necesarias altas concentraciones de CO_2 , NH_4 y O_2 ⁵².

Seguido al proceso de nitrificación está el de desnitrificación, es donde se da la reducción de los nitratos a nitrógeno gaseoso y óxido nitrógeno mediante bacterias desnitrificantes. La desnitrificación ocurre cuando microorganismos facultativos, que normalmente quitan BOD en condiciones aeróbicas, son capaces de convertir nitratos al gas de nitrógeno. En este proceso el carbono requerido por las bacterias heterótrofas son provistos por las aguas negras crudas.

⁵¹ Alcarria, M. (Abril 2005, Pág. 104)

⁵² *Ibíd.*

5 DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA PARA UN HOTEL

5.1 Descripción del proceso

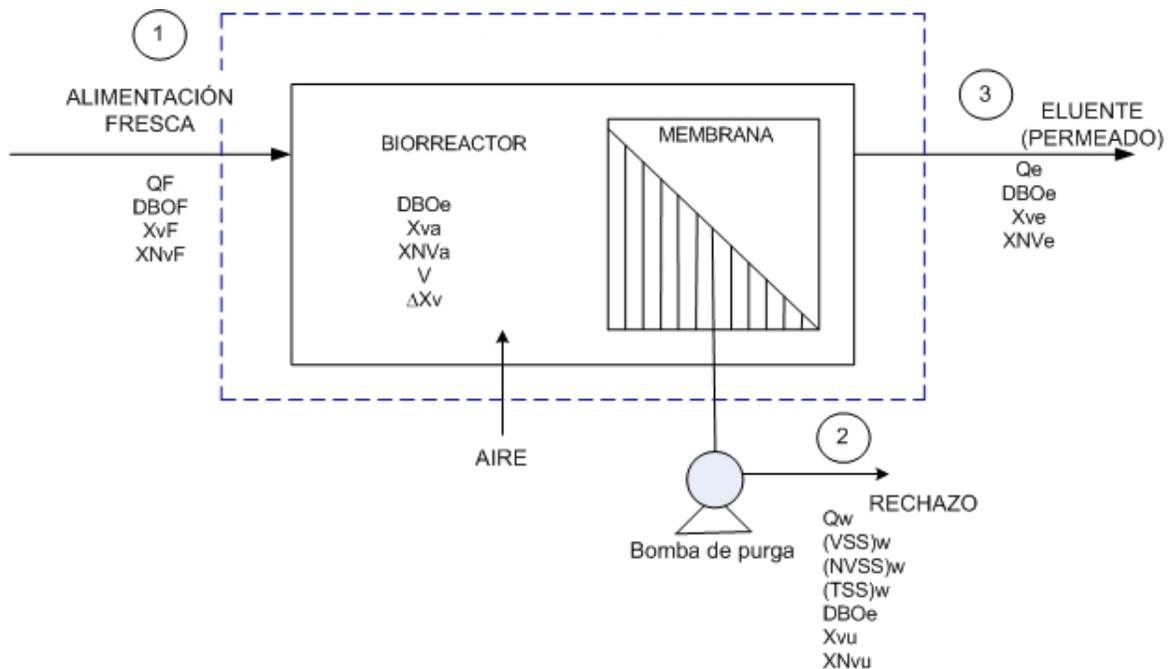
Una vez teniendo la cantidad de agua a tratar (caudal de alimentación), las características del influente y la calidad del efluente, se debe seleccionar un tipo de tratamiento que permita satisfacer los requerimientos de la calidad del agua regenerada. En este caso el tipo de tratamiento seleccionado es un Biorreactor de Membrana debido a la calidad de tratamiento terciario que presenta su efluente y a que es una solución compacta por la poca área que esta requiere.

Según lo considerado en el capítulo 4 se puede observar que el diseño de un MBR no es una tarea sencilla debido a la cantidad de parámetros y variables operacionales y de diseño a tener en cuenta, por lo que se requiere una adaptación cuidadosa de estos. Para empezar es necesario la elección del tipo de configuración, membrana y reactor a utilizar, lo cual ayudará al establecimiento de las ecuaciones de diseño. La elección del tipo de configuración tiene gran importancia ya que como se ha mencionado en el capítulo 4 un biorreactor con membrana externa presenta mayor problema de ensuciamiento y consume aproximadamente el doble de la cantidad de energía consumida por un biorreactor con membrana sumergida, esto se debe a que la membrana de configuración interna no necesita recirculación, y al tener incluido en el reactor la membrana los difusores de oxígeno contribuyen a retardar el ensuciamiento de la membrana.

Por lo anteriormente expuesto, el tipo de configuración a utilizar será un Biorreactor con membrana sumergida, por el menor coste de operación y mantenimiento que esta requiere además de ocupar una menor área, y en el caso de un hotel es un factor a tener en cuenta.

En la siguiente figura se muestran las variables y parámetros que intervienen en un Biorreactor de Membrana sumergida.

Figura 20. Diagrama de flujo de un MBR sumergido



Fuente: Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 107)

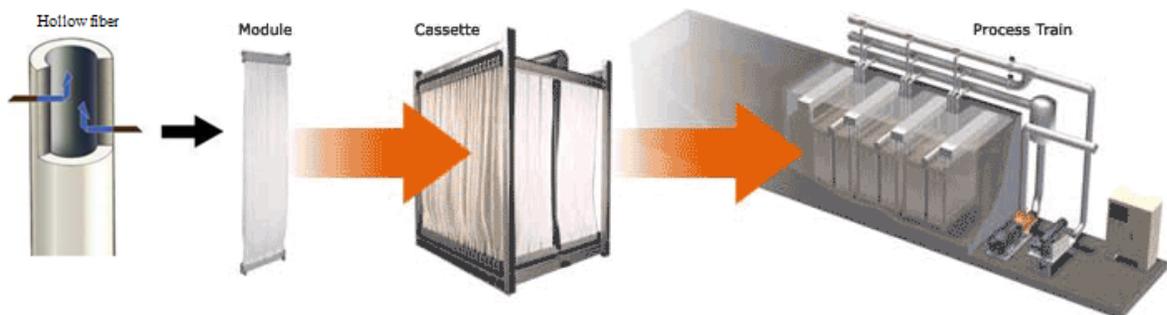
En la Tabla XVII se definen los símbolos que se presentan en el diagrama de flujo de la figura 20.

Tabla XVII. Definición de los símbolos de la figura 20

Caudales (m^3/s)		Concentraciones de la DBO soluble (mg/L)	
SÍMBOLO	DEFINICIÓN	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
Q_F	Alimentación inicial	DBO_F	DBO soluble de la alimentación inicial
Q_e	Efluente final	DBO_e	DBO soluble del efluente
Q_w	Purga		
Concentraciones de los sólidos volátiles en suspensión (VSS) (mg/L)		Concentraciones de los sólidos no volátiles en suspensión (NVSS) (mg/L)	
X_{VF}	VSS en la alimentación inicial	X_{NVF}	NVSS en la alimentación inicial
X_{Va}	VSS en el reactor	X_{NVa}	NVSS en el reactor
X_{Ve}	VSS en el efluente final	X_{NVe}	NVSS en el efluente final
X_{Vu}	VSS en la descarga del clarificador	X_{NVu}	NVSS en la descarga del clarificador
Purga (Kg/d)		Volumen del reactor (m^3)	
$(VSS)_w$	VSS en la purga	V	Volumen del reactor
$(NVSS)_w$	NVSS en la purga		Producción de lodos (kg/d)
$(SST)_w$	SST en la purga	ΔX_v	Producción de lodo

Según el fabricante, las membranas pueden agruparse en módulos, a su vez los módulos en cassettes y estos juntos forman un tanque de membranas denominado tren de proceso, con varias vías necesarias para la limpieza de las mismas. Esta secuencia se puede observar en la figura 21.

Figura 21. Formación de una membrana en módulos, cassettes y tren del proceso.



Fuente: http://www.gewater.com/products/equipment/mf_uf_mbr/zeeweed_500.jsp

A continuación se muestra una lista de los datos básicos que se requieren para el diseño de un MBR⁵³:

I. Datos de la alimentación inicial

- Caudal, QF
- DBOF en mg/l de DBO5
- Sólidos en suspensión en la alimentación inicial, XVF, XNVF
- Temperatura de la alimentación inicial, TF
- Alcalinidad en mg/l de CaCO₃
- Nitrógeno Total Kjendal (NTK), NF
- Fósforo Total, PF

II. Datos sobre la calidad del efluente

- DBOe en mg/l de DBO5
- Flujo de permeado, Je
- Nitrógeno Total Kjendal (NTK), Ne
- Fósforo Total, Pe

III. Información para el diseño del reactor biológico

- Valor de diseño de la concentración de MLVSS, XVa
- Temperatura del aire ambiente, Ta
- Parámetros biocinéticos: k, kd, Y

IV. Características de las membranas

- Tipo de membrana

⁵³ Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 109)

- Dimensiones del módulo de membrana escogido
- Nº de módulos en un cassette, NM
- Nº de cassettes por tanque, Nc

Con base en los datos y características descritas con anterioridad se procede a seleccionar el tipo de membrana a utilizar, la cual debe ser una membrana capaz de satisfacer con los requisitos del efluente y representar una alternativa de menor coste de operación y mantenimiento, en el anexo 1.7 se hace la selección de esta membrana, la cual permite conocer el caudal de permeado.

El objetivo y diseño de un biorreactor de membrana se basa en la eliminación del DBO soluble y compuestos nitrogenados, además de presentar buena eficiencia en la eliminación de estos parámetros, el tamaño pequeño de poro en la membrana contribuye a la retención de los sólidos en suspensión, virus y bacterias, produciendo de esta manera un efluente con baja turbidez y un porcentaje casi nulo de virus y bacterias como la E. Coli.

En el anexo 1.8 se describen de manera detallada los pasos a seguir para el diseño de un biorreactor de membranas.

5.2 Predimensionamiento

Conociendo el caudal a tratar y las características de la membrana elegida, se puede tener un aproximado del volumen del tanque de la membrana, dato con el que se puede hacer una estimación de las dimensiones del mismo, a partir del cual se empieza con el cálculo de los parámetros de diseño y las características del efluente.

Una vez calculados las características del efluente y las dimensiones del tanque de membrana se calculan las dimensiones del tanque de permeado a partir de conocer el caudal de retrolavado y la frecuencia con que este se realiza. El volumen y dimensiones del tanque químico se obtienen conociendo el caudal de hipoclorito sódico necesario para el lavado químico.

5.3 Resultados

Como se consideró en el capítulo 4, un sistema de tratamiento mediante MBR está compuesta básicamente por un Reactor Biológico en el cual va inmerso una membrana con un difusor de aire de burbuja gruesa en su parte baja para contribuir a la prevención del ensuciamiento, un tanque de permeado mediante el cual se realiza el retrolavado que también ayudará a retardar la necesidad de un lavado químico.

A continuación se muestran las dimensiones obtenidas de estos componentes para un MBR de un hotel que produce $68.2 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua residual con las características mostradas en la tabla XXII del anexo 1.3 (Características de agua residual)

Tabla XVIII. Dimensiones.

DIMENSIONES DE LA CUBA DE AIREACIÓN	
Ancho	2 m
Largo	3 m
Profundidad	3.50 m
Volumen	21 m ³
DIMENSIONES DEL TANQUE DE MEMBRANA	
Ancho	1 m
Largo	2 m
Profundidad	3 m
Volumen	6 m ³
DIMENSIONES DEL TANQUE DE PERMEADO	
Ancho	1.50 m
Largo	2 m
Profundidad	2 m
Volumen	6 m ³
DIMENSIONES DE TANQUE QUÍMICO	
Ancho	0.50 m
Largo	0.60 m
Profundidad	0.50 m
Volumen	0.15 m ³

Fuente: Anexo 1.8; 1.9 y 3.1

Debido a que 55.81 m³/d es la demanda de agua regenerada necesaria para la reutilización en recargas de cisternas de inodoros, riego de jardines y limpieza en zonas exteriores, 67.98 m³/d es el caudal del efluente, parte de este será almacenado y otra parte vertido, por lo que el sistema de tratamiento para el establecimiento hotelero mediante MBR debe cumplir con los requisitos legales considerados en el capítulo 1.

De los resultados obtenidos en el diseño teórico del MBR para un hotel (anexo 1.8) se tienen las siguientes características en el efluente.

Tabla XIX. Características del efluente final y eficiencia

Parámetro	Efluente	Eficiencia
DBO _e (mg/L)	5.83	97.40 %
SS (mg/L)	≈ 0	100 %
NTK	15	90 – 93 % ^a
PT	2	85 ^a
<p>a. Debido a que los datos del efluente para NTK y PT fueron los utilizados para el cálculo de los demás parámetros, la experiencia demuestra que estos datos pueden ser menores y sus porcentajes de reducción andan por el orden expuesto en la columna de eficiencia.</p>		

En la tabla XXIII del anexo 1.4, se evidencia que también es necesario que la Turbidez sea menor a 2 UNT y que la presencia de *Escherichia coli* sea de 0 UFT. Tanto la turbidez como la presencia de *E. coli* son obtenidos mediante estudios experimentales realizados a los efluentes de toda planta de tratamiento.

El cálculo de turbidez se puede realizar mediante los siguientes métodos:

- a) Método del Turbidímetro Hellige.
- b) Método del Nefelómetro Fotoeléctrico.
- c) Método Turbidimétrico de Bujía de Jackson.

La experiencia de plantas de tratamiento mediante biorreactor de membrana ha demostrado que la eficiencia de la eliminación de turbidez puede estar entre 98 – 100 % esto es < 1 UNT. Esta alta eficiencia se debe en gran

parte al tamaño reducido del poro 0.04 μm para membranas de Ultra filtración (en este caso membrana zenon de fibra hueca).

Para el caso de la presencia de E. coli en el efluente, en membranas UF como la utilizada en este diseño, la eficiencia de eliminación de E. coli es casi de 100 % en condiciones de operación del MBR.⁵⁴

Actualmente existen dos sistemas de desinfección muy utilizados, uno lo es la desinfección mediante rayos UV, éstos presentan la ventaja de inactivar los virus y bacterias presentes en el agua regenerada, necesitando un corto tiempo de contacto con esta y viéndose favorecida por la escaza turbidez del efluente producido en el tratamiento MBR. En el caso de la planta de tratamiento planteada, esta podría ser una solución compacta y eficaz para inhibir la E. coli que no fue eliminada en la membrana. La desinfección mediante rayos UV presenta la desventaja de no dejar residual (en el caso de agua potable) por lo que no garantiza el evitar que el agua llegue contaminada de alguna bacteria a su destino final.

Otro mecanismo para desinfectar el agua es mediante la dosificación de hipocloritos.

Con los resultados obtenidos y expuestos con anterioridad se puede observar que el agua producida por este tipo de tratamiento (MBR) posee una gran calidad para ser reutilizada y es capaz de cumplir con los requisitos considerados.

⁵⁴ Poyatos, J. (2007, marzo) Pág., 113.

6. REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS.

En este capítulo se pretende dar una noción generalizada de la necesidad que existe de aprovechar los recursos hídricos de una mejor forma y de la manera en que debe ser aprovechada el agua que sale de las estaciones de depuración, mediante la implementación de instalaciones que permitan su reutilización.

6.1 Introducción

Desde hace varios años se sabe que ciertos recursos de la tierra no pueden ser aumentados, solo utilizados y administrados para hacer posible su conservación. El agua es considerado un recurso frágil, por ser de vital importancia en el desarrollo de la vida, actividades sociales y económicas, y porque cualquier tipo de uso altera sus propiedades y las del medio hídrico.

En el último siglo, la demanda de agua en el mundo ha crecido un 600%; el aumento del censo y el desarrollo industrial han sido los responsables de este crecimiento. El acceso al agua limpia y la capacidad de aprovechamiento como recurso productivo ha condicionado el progreso humano. Alcanzar un desarrollo sostenible y generar una nueva cultura del agua es el desafío para todos los que participan en la administración de este recurso vital.

La ordenación y gestión de los recursos hídricos, que ha sido desde siempre un objetivo prioritario para cualquier sociedad, se ha realizado históricamente bajo directrices orientadas a satisfacer la demanda en cantidades suficientes, bajo una perspectiva de política de oferta. La

explotación desmedida de los recursos hídricos ha aumentado los niveles de contaminación al ser vertida una mayor cantidad de residuos líquidos a los diferentes cuerpos receptores, esto unido a características naturales (sequías prolongadas, inundaciones) han conducido a un deterioro importante de las fuentes de agua.

Esto ha hecho necesario un cambio en los planteamientos sobre política de aguas, que han tenido que evolucionar desde una simple satisfacción en de la demanda, hacia una gestión que contempla la calidad del recurso y la protección del mismo como garantía de un abastecimiento futuro y de un desarrollo sostenible.

Lo anteriormente expuesto lleva a pensar en la reutilización del agua, entendida como el uso de aguas previamente utilizadas como una fuente alternativa de recurso. El proceso de tratamiento necesario para que un agua depurada pueda ser reutilizada se denomina generalmente *regeneración* y el resultado de dicho proceso *agua regenerada*. De acuerdo con su significado etimológico, la regeneración de un agua consiste en devolverle, parcial o totalmente, el nivel de calidad que tenía antes de ser utilizada.

Las fuentes de abastecimiento tradicionales están resultando ser insuficientes, incluso en territorios con recursos hídricos, por tanto las aguas regeneradas se configuran como una fuente alternativa de abastecimiento, económica y segura desde el punto de vista sanitario y ambiental. El desarrollo actual de tecnologías de depuración (como es el caso del sistema MBR) ha permitido obtener efluentes de agua regenerada de diversas calidades, incluso hasta un nivel tan alto como la del agua potable.

La reutilización de agua debe plantearse como una fuente que sustituye recursos de otras procedencias de mayor impacto ambiental o coste de obtención, por lo cual el agua depurada y regenerada se utiliza prioritariamente para sustituir determinados usos que actualmente se realizan con agua potable.

El agua regenerada se viene empleando en muchos países para usos tales como: Usos urbanos (jardinería, incendios, lavado de calles y automóviles), usos industriales (refrigeración, lavado de vagones de ferrocarril), riego agrícola y forestal, recreativos, mejora y preservación del medio natural y recarga de acuíferos. La reutilización para la agricultura y la jardinería es el aprovechamiento más extendido del agua regenerada, para cultivo de hortalizas (consumo crudo) como de cultivos de cereales, cítricos, y viñedos, mediante riego por aspersión, micro-aspersión y goteo, como por riego por inundación.

La reutilización puede suponer el empleo inmediato del agua afectada existen dos tipos de reutilización, las cuales se describen a continuación:

Directa (planificada): Una vez las aguas residuales han sido depuradas y regeneradas adecuadamente, el efluente se incluye de manera inmediata en un sistema de abastecimiento alternativo, que servirá para los usos en donde no se requiera un agua de gran calidad (recarga de cisterna de inodoros).

Indirecta: Esta es no planificada y consiste en descargar el agua tratada en un cauce para posteriormente ser captada aguas abajo, con el fin de ser incorporada a recursos potables.

La reutilización de agua regenerada, tiene las ventajas de permitir recuperar caudales que serían vertidos al mar, mejorar la calidad en el vertido y

el medio receptor, reducir el consumo de agua potable protegiendo de esta manera las reservas de agua y disminuye el caudal que llega a la instalación de tratamiento entre otros beneficios.

6.2 Distribución de caudales según uso destinado.

Los caudales de aguas residuales que se obtienen de las diversas actividades industriales, comerciales o domésticas pueden ser reutilizados en usos donde no sea necesaria el agua potable, a continuación se presente a manera de ejemplo una distribución del caudal regenerado en la planta de tratamiento MBR considerada en este trabajo.

Tabla XX. Distribución del agua regenerada según uso destinado.

Uso	m ³ /día
Área de Jardín	40
Inodoros	12
Limpieza zonas exteriores	3.648
A verter	12.172

Esta tabla sirve como indicativo del gran potencial de reutilización de aguas regeneradas que existen en establecimientos como hoteles, al utilizar agua regenerada en las actividades anteriores cada día se ahorraría 55.65 m³ de agua potable, lo que representa aproximadamente el 51 % del agua total consumida por el establecimiento.

6.3 Sistema de reutilización de las aguas regeneradas

Se debe entender como sistema de reutilización de las aguas regeneradas al conjunto de instalaciones que hacen posible la producción y uso de estas aguas, desde el momento en el que son tratadas hasta ser llevadas a su destino final. Este tipo de sistemas lo constituye a) La Planta de tratamiento para la regeneración de las aguas; b) la infraestructura de almacenamiento y c) la infraestructura de distribución. (Sistema de tuberías y bombeo)

La implantación de este tipo de sistemas surge de la necesidad de proteger al medio ambiente y evitar riesgos en la salud de los seres vivos. Actualmente se han realizado investigaciones y proyectos orientados a la reutilización de aguas residuales con la finalidad de satisfacer las demandas del vital líquido.

La disponibilidad de estos recursos, está siendo alterada por causa de los crecientes problemas de contaminación de los cuerpos de agua que han venido provocando los procesos de urbanización e industrialización acelerada y sin una adecuada planificación, el uso de agroquímicos no biodegradables, las consecuencias de una actividad minera no controlada y la contaminación proveniente de derrames de crudo. Estos problemas, aunque son incipientes en algunas regiones, en otras están siendo causa de limitaciones severas para usos como el turístico - recreacional y para el mismo abastecimiento a las poblaciones.

A raíz de esta situación, la reutilización de aguas residuales ha cobrado un significativo auge, ya que está surgiendo como una nueva fuente de suministro técnicamente viable y en algunos países incluso económicamente, por lo cual, esta práctica debe ser incluida dentro de nuevos planes de gestión integral del

agua en todos los países y asumida dentro de la estructura de las instituciones del sector hidráulico.

Para la implementación de este tipo de sistemas en establecimientos que ya cuentan con una planta de tratamiento, es necesario:

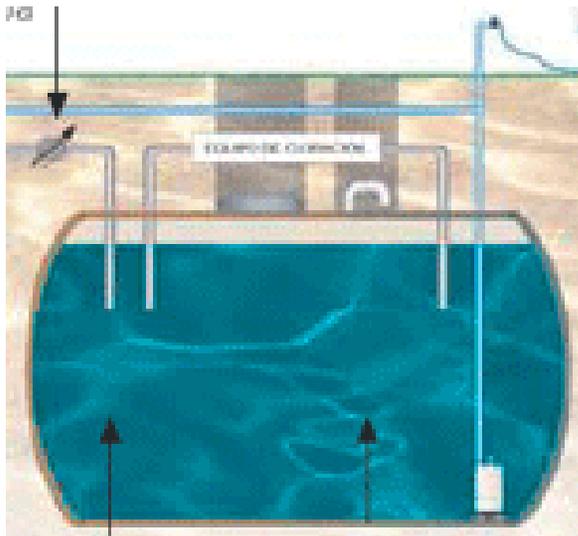
1. La realización de una evaluación de las condiciones físicas actuales del sistema de tratamiento existente.
2. La evaluación de la calidad del efluente producido por las instalaciones existentes, mediante la medición de parámetros como la DBO, DQO, SST, Coliformes totales, Nitrógeno y fósforo entre otros. Si esta es satisfactoria según las leyes del lugar donde se encuentre el agua puede ser reutilizada en determinados usos, de lo contrario se debe añadir al proceso un sistema de tratamiento adicional de calidad terciario para mejorar las características del efluente.
3. Determinar la demanda de agua a reutilizar según el tipo de uso destinado y en base a ello la necesidad de instalaciones de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas.
4. Por último se debe establecer un mecanismo de mantenimiento y control del sistema de reutilización para hacer el proceso más eficiente.

6.3.1 Instalación de Almacenamiento

El almacenamiento para las aguas que hayan pasado por un tratamiento de regeneración debe realizarse de preferencia en tanques de almacenamiento subterráneos y diseñados para este fin, con algún tipo de revestimiento o aditivo que permita evitar el deterioro de la estructura, además es de importancia recordar que las aguas producidas por un sistema de tratamiento como el MBR presenta una gran calidad, lo cual contribuye a evitar el deterioro de la

instalación de almacenamiento. En la siguiente figura se muestra el ejemplo de un tanque de almacenamiento de aguas regeneradas lista para su bombeo y recirculación en artefactos sanitarios y riego.

Figura 22. Tanque de almacenamiento subterráneo.



El tanque de almacenamiento debe ser una instalación exclusiva para almacenar aguas regeneradas y debe estar plenamente identificado.

Como se comentó en la sección 5.3, aunque no es función de la tecnología MBR la eliminación de la bacteria *E. coli*, este tipo de tratamiento presenta un alto porcentaje de eliminación de esta bacteria, pero no garantiza que las aguas regeneradas no sean contaminadas fuera del tratamiento o en el tanque de almacenamiento, por lo que es recomendable la implementación de un tipo de tratamiento de desinfección como hipoclorito que deje material residual y no permita el desarrollo de bacterias en el tanque de almacenamiento.

6.3.2 Instalación de distribución

Las instalaciones de distribución de las aguas regeneradas deben estar plenamente identificadas con algún tipo de color o material, para evitar el confundirlas con las instalaciones de agua potable.

Existen dos maneras principales para desviar las aguas a sus destinos finales, una vez éstas hayan sido regeneradas, esto depende en muchos casos de la cota del destino y la topografía del terreno, estos sistemas son:

- **Sistemas de desviación por gravedad.**
Una vez salida el agua de la instalación de tratamiento, según la ubicación de el tanque de almacenamiento, el agua regenerada puede ser conducida a este por gravedad, a su vez el agua que se encuentra en el tanque de almacenamiento puede ser llevada a su disposición final (vertido o riego de jardines) de forma satisfactoria según la cota y presión necesaria.
- **Sistemas de desviación por bombeo.**
En algunos casos, cuando existe un tanque de almacenamiento en las azoteas de los establecimientos con el fin de recargar a partir de ellos por gravedad los artefactos sanitarios, es necesaria la utilización de una bomba para alcanzar la cota. En otras situaciones también es necesario para el riego de jardines.

6.3.2.1 Bombeo de las aguas regeneradas

Las aguas regeneradas requieren ser bombeadas a una segunda red de canalización y distribuidas a los lugares de consumo no potable como recarga de cisternas de inodoro, riegos de jardines o limpieza de zonas exteriores.

El bombeo de las aguas regeneradas hacia su destino puede realizarse con una bomba que normalmente es usada para bombeo de agua potable, con la única condición que se debe tener especial cuidado que cualquier sólido sea succionado por la bomba para evitar que esta se dañe, además es de hacer mención que el tratamiento de aguas mediante un MBR, al incorporar esta una membrana en el reactor, permite que el efluente posea una pequeña concentración de sólidos en suspensión. El uso del agua regenerada puede ser re direccionada para actividades tan variadas como:

1. USO URBANO

Este puede ser residencial, reutilizando el agua en actividades como el riego de jardines y recarga de cisternas de aparatos sanitarios, o puede ser de servicio urbano, utilizándola para el riego de zonas verdes o baldeo de calles.

2. USO AGRÍCOLA

Riego de cultivos alimenticios, flores ornamentales, cultivos leñosos entre otros.

3. USO INDUSTRIAL

Estas aguas se pueden utilizar para la realización de la limpieza del establecimiento o torres de refrigeración en algún proceso industrial.

4. USO RECREATIVO

Como el riego de campos de golf.

5. USO AMBIENTAL

Recarga de acuíferas, riego de bosques y zonas de área verde.

Pero para fines de estudio únicamente se considerará el uso de aguas regeneradas en jardines y servicios sanitarios.

6.3.2.2 Riego de jardines

Los jardines son consideradas áreas verdes que contribuyen al mejorar la imagen paisajista de un hotel, sin embargo esta percepción estética puede generar a algún establecimiento en este caso hotel un consumo antieconómico de recursos hídricos, es por ello que la legislación actual en países como España contempla que estos lugares tanto privados como públicos sean regados mediante la práctica de reutilización del agua. Para tal efecto, el agua debe cumplir con ciertos requisitos para prever cualquier tipo de problemas a las personas que puedan entrar en contacto con la zona de riego, estos requisitos fueron considerados en el capítulo 1.

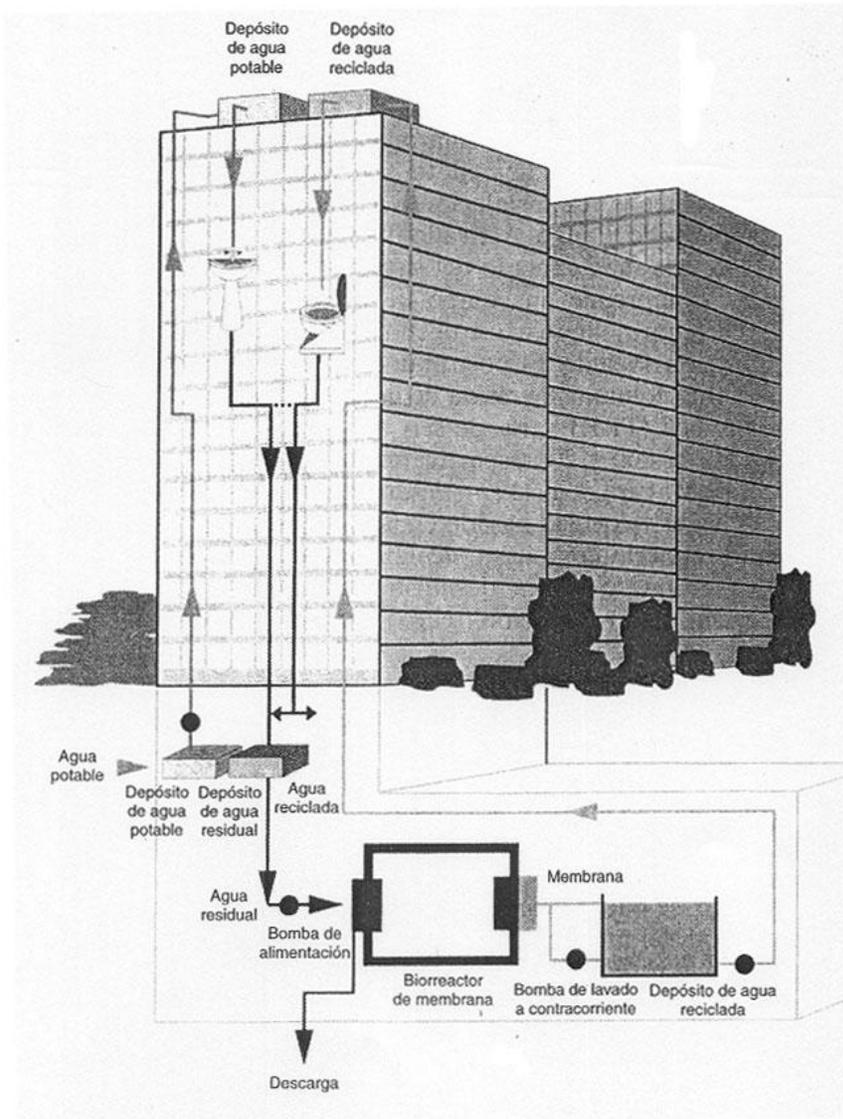
Estos jardines pueden ser regados mediante la técnica de aspersión o mediante goteo. Según el tipo de control sanitario y la calidad del agua regenerada obtenida, algunos establecimientos públicos o privados pudieran optar por el sistema de riego por goteo, en donde el agua saldrá gota a gota, con una baja presión y cerca de lo que se quiera regar (grama, arboles, etc.).

6.3.2.3 Servicio sanitario

Es uno de los usos más lógicos que se le puede destinar a las aguas regeneradas, ya que es sabido que el agua que se descarga en el servicio sanitario no necesita cumplir necesariamente altos estándares de calidad, en este caso es necesario un tipo de tratamiento riguroso con el objetivo de evitar que el agua a utilizar despida malos olores, eliminar los contaminantes químicos y orgánicos y que el agua no sea turbia, a su vez el sistema de tuberías que abastece las cisternas de los inodoros deben estar plenamente identificadas.

A continuación se muestra un esquema completo de un sistema de recolección, purificación y uso de aguas regeneradas en un edificio.

Figura 23. Reutilización de agua en inodoros.



Fuente: Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 101)

En la figura 23 se ve un esquema de un sistema de reutilización de aguas regeneradas, en donde una vez utilizada el agua potable, es almacenada en un depósito de aguas residuales para posteriormente ser bombeada a la planta de tratamiento MBR, de donde se obtiene un agua reutilizable la cual es almacenada en un tanque para luego ser bombeada a un depósito en la azotea del edificio, este depósito recarga las cisternas de los inodoros por gravedad.

CONCLUSIONES

1. El consumo elevado de agua potable por parte del sector hotelero se está reduciendo debido a la implementación de políticas activas para la reducción del consumo de agua, estas políticas incluyen la utilización de artefactos economizadores de agua y la práctica de la reutilización del agua residual como nueva fuente de suministro.
2. El tratamiento de aguas mediante un biorreactor de membrana representa una solución compacta y discreta para establecimientos o lugares en donde no se cuenta con el área necesaria para la implementación de un sistema de tratamiento más grande o donde los terrenos son bastante costosos.
3. El sistema de tratamiento mediante MBR puede ser implementado en establecimientos comerciales y complejos habitacionales, produciendo una calidad de efluente similar al efluente producido en el tratamiento de aguas residuales de un hotel, esto se debe a las características similares de tipo doméstico del agua residual que estos tres establecimientos producen.
4. Para el diseño de un sistema de tratamiento mediante biorreactor de membrana es necesario considerar las características tanto del agua residual a tratar y las características de la membrana para seleccionar las condiciones de operación más adecuadas para ambos.
5. La utilización de un sistema MBR con membrana sumergida suele ser en muchas ocasiones lo más conveniente al representar un menor

consumo eléctrico en comparación con la configuración de membrana externa, además de ocupar una menor área y permitir el retrolavado en la membrana, lo cual contribuye a alargar la vida útil de la misma.

6. El menor ensuciamiento, menor consumo de energía eléctrica y la presencia en el mercado son factores indispensables a tomar en cuenta para la elección del tipo de membrana a utilizar.
7. El biorreactor de membrana posee una serie de características importante a considerar en el momento de elegir y compararlo con otros sistemas de tratamiento compactos. Algunas de estas características son:
 - a. La obtención de un efluente con calidad de tratamiento terciario, sin importar la calidad del influente a tratar.
 - b. Este tipo de tratamiento posee una gran capacidad de desinfección sin necesidad de utilizar algún tratamiento complementario, esto se debe al pequeño tamaño del poro de la membrana que impide el paso de virus y bacterias.
 - c. Menor producción de fango.
 - d. Permite el crecimiento de bacterias especializadas nitrificantes.
8. Este tipo de tratamiento (MBR) es capaz de cumplir con las estrictas restricciones de vertido y reutilización de agua y podrá satisfacer exigencias futuras.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio económico para la aplicación de la tecnología de membrana en la regeneración de aguas residuales, para dar a conocer su factibilidad económica en nuestro país.
2. Desarrollar programas educativos que permitan dar a conocer a los estudiantes relacionados en el tema de tratamiento de aguas, las diferentes nuevas tecnologías que existen y que permiten obtener efluentes de calidad para reutilizar el agua residual.
3. Obtener fuentes de consulta bibliográfica que permitan ampliar el conocimiento en materia de regeneración de aguas residuales aplicando la tecnología de un biorreactor de membranas.
4. Promover la aplicación de una política activa amigable con el ambiente en las instituciones públicas o privadas mediante la regeneración y reutilización de las aguas residuales que permita la reducción de los desechos líquidos que son vertidos a un cuerpo receptor.
5. Como entidad educativa, la Facultad de Ingeniería debe impulsar programas de investigación que contribuyan a ampliar el tema de la regeneración y reutilización del agua residual y de esta manera lograr un consumo más responsable de este líquido tan importante para el desarrollo de la vida misma.

BIBLIOGRAFÍA

Referencia Bibliográfica

1. Alcarria, M. (Abril, 2005). Evaluación tecnológica de la aplicación de reactores de membrana en proceso de tratamiento de aguas residuales. Proyecto de fin de carrera de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, España.
2. CEDEX, CENTA. (2007). La depuración de las aguas residuales en pequeñas poblaciones españolas. Aragón, C., Ferrer, Y., Ortega, E., Salas, J., y Sobrados, L.
3. Chao, C., y Silvio, M. (Noviembre, 1998). Reuso de Aguas Residuales de instalaciones turísticas con opción anaerobia. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima, Perú.
4. DIRECTIVA 91/271/CEE. Sobre Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas. Manual de interpretación y elaboración de informes. Unión Europea.
5. González, L. (Septiembre, 2006). Estudio Comparativo de un proceso Biológico Convencional y un proceso mediante Biomembranas para el tratamiento de aguas residuales Urbanas. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad de Cádiz, España.

6. Granero J., y Ferrando, M. (2005). Como implantar un sistema de gestión ambiental según la norma ISO 14001:2004. Editorial TAXUS. Madrid, España.
7. Informe de Vigilancia Tecnológica: Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales. Colección por CEIM y Dirección General de Universidades e Investigación.
8. Hernández Lehmann, A. (1997). Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España.
9. Informe GREENPEACE (2006). La Calidad de las Aguas en España, un Estudio por Cuencas.
10. Judd, S. y C. Judd. (2006). The MBR Book, Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment.
11. Llamas, M. (2002). Del uso y del abuso del agua en España. Real Academia de Ciencia. España.
12. METCALF & EDDY. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Tercera Edición, Editorial McGRAW-HILL. Madrid, España.
13. Moya, L. (2007). Hidroeficiencia en el sector Hotelero. Editado por HOSTEMUR. Murcia, España.

14. Poyatos, J. (Marzo, 2007). Biorreactores de Membranas aplicados al tratamiento de aguas residuales Urbanas y su influencia en la calidad de agua tratada. Tesis doctoral, Universidad de Granada, España.
15. Ramalho, R. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales (ed., y revisado) España.
16. REAL DECRETO 1620/2007. (7 de diciembre 2007). Reutilización de las aguas depuradas. España.

Referencias electrónicas.

17. Aqueagest Medio Ambiente. Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Compactas mediante Biodiscos "System S&P". [<http://www.searsa.es/pdf/presentacion.pdf>] (diciembre 2009)
18. Cámara del Comercio de Santiago de Compostela. Buenas prácticas ambientales en el sector hotelero. [<http://www.camaracompostela.com/mambiente/sh.pdf>] (septiembre 2009)
19. Centro Canario del Agua Introducción a los biorreactores de Membrana. (2003). [<http://www.fcca.es/Docs/introMBR.pdf>. Diciembre 2004] (noviembre 2009)
20. Echarri, L. (2007). Asignatura para el Curso Población, ecología y ambiente. Universidad de Navarra, España. [[www.unav.es/.../Tema%208%20Contaminacion%20del%20agua %202007.pdf](http://www.unav.es/.../Tema%208%20Contaminacion%20del%20agua%202007.pdf)] (septiembre 2009)

21. Petrus, J. Gestión Medio Ambiental en los Hoteles: Q Verde. Tercera Sesión técnica "Hacia un turismo sostenible: Hoteles". Pág. 2. [http://www.mma.es/secciones/raa/documentos_enlaces_raa/jornadas_red/jornada_10/pdf/jornada10_5.pdf] (septiembre 2009)
22. Junta de Extremadura. Estudio y Plan territorial de la Vera. López, B., et al. (Junio,2008). [<http://sitex.juntaex.es/sias/Territorial/Documentos/La%20Vera/2.%20Memoria%20de%20Ordenacion.pdf>] (noviembre 2009)
23. Lopetegui, J. et., al. Limpieza química de membranas de MF y UF en el tratamiento de aguas residuales [http://www.likuidnanotek.com/articulos/Limpieza_quimica_membranas....pdf] (octubre 2009)
24. Perales, J. Procesos biológicos de cultivo en suspensión aerobio. Área de tecnologías del medio Ambiente, Universidad de Cádiz, España. [http://gdeh.fct.unl.pt/Semin_FDB_PAg/Doc_FDB/Activated_Sludge.pdf] (noviembre 2009)
25. Rico, A. (2007). Tipologías de consumo de Agua en Abastecimientos Urbano-Turísticos de la Comunidad Valenciana. Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante, España. [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8630/1/IG_42_01.pdf] (octubre 2009)
26. Salas, J. (2004). Tecnologías de Depuración: Situación Actual y Perspectivas. IV Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Tarragona, España. [www.en.us.es/ciberico/archivos_word/JuanJoseSalas.doc] (septiembre 2009)

ANEXO

1. DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA UN HOTEL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA MBR	115
1.1 Características del hotel.	115
1.2 Caudal de Aguas Residuales (de alimentación)	116
1.3 Características del agua a tratar	116
1.4 Características del efluente	117
1.5 Demanda de la cantidad de agua a reutilizar	118
1.6 Consideraciones de diseño	120
1.7 Elección de la membrana	121
1.8 Procedimiento de diseño.	123
1.9 Dimensionamiento del tanque de permeado y tanque químico	143
1.9.1 Tanque de permeado	143
1.9.2 Tanque químico	145
1 CÁLCULO DEL REACTOR BIOLÓGICO.	149
2.1 Cálculo de la Cuba de Aireación (Reactor Biológico).	149
3 REITERACIÓN DE CÁLCULOS	165
3.1 Reactor Biológico	165
3.1.1 Volumen de la cuba de aireación:	165
3.1.2 Comprobación de la carga másica:	165
3.1.3 Tiempo de retención hidráulico:	166
3.1.4 Caudal de purga de lodos	166
3.1.5 Caudal de recirculación:	168
3.1.6 Necesidad teórica de oxígeno:	169
3.1.7 Necesidades reales de oxígeno:	170
3.1.8 Potencia de aireación	175

3.1.9	Dimensiones de la cuba de aireación	178
3.2	Biorreactor de membrana sumergida	178
3.2.1	Volumen de la cuba de aireación:	178
3.2.2	Necesidad teórica de oxígeno	179
3.2.3	Necesidades reales de Oxígeno:	180
3.2.4	Potencia de aireación	182

ANEXO

1. DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA UN HOTEL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA MBR

Para diseñar una planta de tratamiento se debe contar con los siguientes datos:

1) Caudal de alimentación; 2) Características del agua a tratar y 3) Características del efluente. Dado que parte del agua residual regenerada será reutilizada, también es necesario contar con 4) La cantidad de agua a reutilizar.

1.1 Características del hotel.

El diseño de la instalación de tratamiento de aguas residuales se realizará para un hotel hipotético de categoría cinco estrellas de 100 habitaciones distribuidas de la siguiente manera:

Habitación	Número
Sencilla	20
Doble	70
Triple	10

Estos datos sugieren que el hotel tiene capacidad de atender hasta 190 personas. El establecimiento cuenta con 45 empleados y con un índice de ocupación promedio de 80 %, las instalaciones tienen un jardín de 20,000 m² (área verde).

1.2 Caudal de Aguas Residuales (de alimentación)

Como se consideró en la sección 4.3.3.5, el caudal de alimentación con el que se diseña debe ser el caudal medio diario de aguas residuales producidas. En esta sección se calculará el caudal en base a la dotación de agua potable, como se consideró en la tabla V de la sección 2.1 la dotación de agua potable para un hotel cinco estrellas es de 516L/cliente.día y 40L/empleador.día con un factor retorno de aproximadamente 85 %.

A continuación se definen los datos a utilizar para el cálculo de caudal de alimentación.

Tabla XXI Datos para el cálculo de caudal de alimentación

Dotación de agua potable cliente	D_C	516 L/cliente.día
Dotación de agua potable empleado	D_E	40 L/empleador.día
Factor de Ocupación	F_O	1
Factor Retorno	F_R	0.85
Capacidad Total Clientes		190
Cantidad de empleados		45
Caudal de alimentación	Q_F	?

$$Q_F = F_R * [190(F_O) (D_C) + 45(D_E)] = 68,197 \text{ L/día} \\ = 68.20 \text{ m}^3/\text{día}$$

1.3 Características del agua a tratar

Las aguas producidas por un establecimiento hotelero se consideran de origen doméstico por lo que las características con las cuales se diseñará son las utilizadas en la tabla VIII de la sección 2.2.

Tabla XXII. Características del agua residual

Símbolo	Contaminante Alimentador	Concentración Media [mg/L]
X _{VF}	Sólidos en suspensión volátiles	165
X _{NVF}	Sólidos en suspensión fijos	55
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días 20 °C	220
DQO	Demanda Química de Oxígeno	500
N _F	Nitrógeno total en la forma N	40
P _F	Fósforo total en la forma P	8
	Alcalinidad como (CaCO ₃)	100
	Coliformes totales	10 ⁷ - 10 ⁸ (No./100mL)

1.4 Características del efluente

Para conocer el nivel de tratamiento que se necesita realizar es necesario saber cuál es la calidad del efluente que la instalación de tratamiento debe producir, los requisitos que el efluente debe cumplir están dados por la legislación de vertido y reutilización de aguas residuales según el lugar en donde este se ubica. En la tabla II y III de la sección 1.2.1 se hace mención de la calidad que el agua debe reunir para poder ser vertida y en la tabla VI para ser reutilizada a los usos destinados.

Tabla XXIII Características del efluente

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción
DBO 5 a 20°C	25 mg/l O ₂	70 – 90
DQO	125 mg/l O ₂	75
Sólidos en suspensión	10 mg/L	90
Fósforo total	2 mg/L	80
Nitrógeno total ⁽²⁾	15 mg/l	70 - 80

Parámetro	Valor máximo admisible
Nematodos Intestinales	1 huevo/10L
Escherichia coli	0 (UFC ⁴ /100 mL)
Turbidez	2 UNT ⁵

Estos parámetros deben ser cumplidos ya que una parte del efluente que exceda a la demanda de reutilización será vertida

1.5 Demanda de la cantidad de agua a reutilizar

Esta demanda está dada por la cantidad de agua que consumen actividades en donde no es necesario un agua de gran calidad, los usos a los cuales se destina el agua regenerada es al riego de jardines (áreas verdes), recarga de cisterna de inodoros y aseo en área exterior del hotel.

Los siguientes datos son de utilidad para determinar la cantidad de agua a reutilizar:

Datos para Cálculo caudal de reutilización		
Dotación de agua para Jardines	D _J	2 L/m ²
Área de Jardín	A	20,000 m ²
Dotación de agua para Inodoro	D _I	80 L/cliente.día
Dotación para limpieza exterior	D _L	24 L/cliente.día
Factor ocupación	F _O	0.80
Capacidad Total Clientes		190
Caudal de reutilización	Q _R	?

Paso 1. Cálculo caudal de reutilización para un jardín:

$$Q = A (D_J) = 40,000 \text{ L/día}$$

$$= 40 \text{ m}^3/\text{día}$$

Paso 2. Cálculo caudal de reutilización para inodoro

$$Q = 190 (F_O) (D_I) = 12,160 \text{ L/día}$$

$$= 12.16 \text{ m}^3/\text{día}$$

Paso 3. Cálculo caudal de reutilización para inodoro

$$Q = 190 (F_O) (D_L) = 3,648 \text{ L/día}$$

$$= 3.65 \text{ m}^3/\text{día}$$

Demanda de Caudal de reutilización:

$$Q_R = (40 + 12.16 + 3.35) \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{55.81 \text{ m}^3/\text{día}}$$

1.6 Consideraciones de diseño

Para el diseño del biorreactor de membrana se tendrán las siguientes consideraciones de diseño:

1. La concentración de Sólidos Volátiles en Suspensión (VSS) en el influente se considera despreciable, por ser una concentración de microorganismos heterogénea y al no haberse efectuado en esta etapa una cantidad apreciable de aireación. Los VSS se producen continuamente en el Reactor debido a la síntesis de materia biológica y se purga continuamente en el efluente.⁵⁵
2. La presencia de la membrana en el Biorreactor permite que la concentración de VSS esté comprendida normalmente entre 10,000 y 20,000 mg/L. Para mantener constante esta concentración en el reactor, es necesario purgar del sistema una cantidad de sólidos en suspensión igual a la producción de lodo biológico en el reactor, ΔXV .⁵⁶
3. La DBO insoluble es separada del agua residual gracias a la presencia de las membranas.
4. Según lo observado en la Figura 20 de la sección 5.1, la DBO soluble en el licor mixto se considera que es igual a la DBO del efluente ya que las membrana utilizadas en las BRM son

⁵⁵ Ramalho, R. et., al. (1996) pág. 258

⁵⁶ Alcarria, Marta (Abril 2005, pág. 107 y 108)

mayoritariamente de Microfiltración y ultrafiltración por lo que raramente eliminan material disuelto.⁵⁷

5. Se considerará que el reactor con el que se está trabajando es un reactor de flujo continuo en tanque agitado debido a que este reactor opera en estado estable y las condiciones de reacción y conversión permanecen invariables durante el tiempo de reacción y son homogéneo.

1.7 Elección de la membrana

Como se ha expuesto en el capítulo 4, existen muchas diferencias respecto a las ventajas y desventajas que ofrece cada membrana según su configuración (geometría de la membrana y dirección del flujo), su superficie (tamaño de poro), su tipo y material.

Para el diseño del MBR se ha seleccionada una membrana de Fibra Hueca (fuera – dentro) de la marca **Zenón modelo zenon_Rserie 500**, considerando lo siguiente:

Es una marca con buena presencia en el mercado Europeo.

La membrana de fibra hueca puede retrolavarse periódicamente lo cual contribuye a compensar el ensuciamiento, retardar el lavado químico y aumentar el tiempo de uso de la membrana.

Posee una Presión transmembranal (PTM) baja y uniforme, lo que permite una reducción del ensuciamiento.

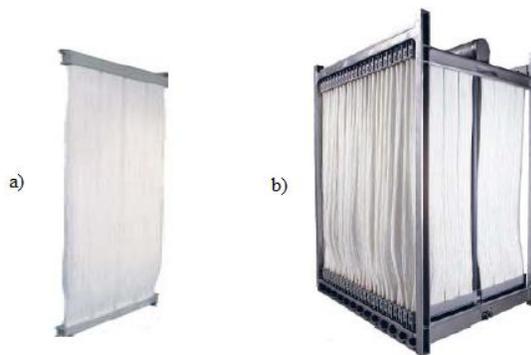
⁵⁷ Ibíd. pág. 108

La elección fuera – dentro permite que se puedan tratar afluentes con mayor concentración de sólidos en suspensión.

En este tipo de membranas, la filtración se consigue con flujos críticos aproximadamente entre 40-70 l/m²h bajo una PTM entre 10-50 KPa, la cual se obtiene mediante una combinación de una presión estática en el lado del reactor y una presión negativa en el lado del permeado usando bombas centrífugas convencionales.

Esta membrana consta de fibras huecas de 1.9 mm de diámetro exterior y un tamaño de poro nominal de 0.04 µm. En la figura 24 se muestra la forma de un modulo y cassette de este tipo de membrana.

Figura 24. a) Modulo; b) cassette.



Fuente: http://www.zenonenv.com/MBR/reinforced_membranes.shtml

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones y características de la membrana.

Tabla XXIV. Dimensiones de modulo de membrana y cassette

CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE MEMBRANA ZeeWeed serie 500	
Dimensiones del módulo (cm)	Altura: 200 Ancho: 70 Grosor: 20
Área de filtración (m²)	46
Número de módulos por cassette	4
Dimensiones del cassette (cm)	Altura: 200 Longitud: 180 Ancho: 70
Área de filtración (m²)	184

Fuente: Alcarria, M. (Abril 2005, pág. 130)

1.8 Procedimiento de diseño.

Una vez teniendo las características del flujo de alimentación y la calidad del efluente necesaria así como la membrana a utilizar se puede empezar con el diseño del biorreactor de membrana.

En la siguiente tabla se muestran los datos con los cuales se diseñará el Biorreactor de Membrana.

Tabla XXV. Datos de Partida

DATOS DE LA ALIMENTACIÓN INICIAL	
Parámetro	Valor
Q _F	68.20 m ³ /d
DBO _F	220 mg/L
X _{VF}	≈ 0
X _{NVF}	55mg/L
N _F	40 mg/L
P _F	8 mg/L
T _F Verano	18° C
T _F Invierno	8° C
DATOS SOBRE CALIDAD DEL EFLUENTE	
DBO _e	15 mg/L ^a
N _e	15 mg/L
X _{Ve}	≈ 0
X _{VNe}	≈ 0
INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO DEL REACTOR	
X _{Va}	15,000 mg/L ^b
T _a verano	26° C
T _a Invierno	-1° C
Parámetro biocinético a 20° C	
K	0,00123 h ⁻¹ · l/mg
θ (coeficiente de Arrhenius para k)	1.03
K _d	0,0025 h ⁻¹
θ (coeficiente de Arrhenius para kd)	1.05
Y	0,5 Kg MLVSS/Kg DBO _r
X _{VU}	≈ X _{Va}

INFORMACIÓN SOBRE LA MEMBRANA	
Parámetro	Valor
J _e	20 l/m ² h (por debajo del flujo crítico) = 0.48
PTM	$\left[\frac{m^3}{m^2d}\right]$
N _C	0.5 bar
	1 Cassettes
Dimensiones características membrana	Ver tabla 1.4

- Aunque la calidad del efluente requiere 25 mg/L trabajaremos con un valor inferior por la capacidad que la membrana tiene para la reducción del mismo.
- Como se ha considerado, la concentración en el reactor esta en el orden de los 10,000 y 20,000 mg/L por lo que se utilizará un valor intermedio.

Paso 1. Una vez teniendo los datos de partida, las dimensiones y características de la membrana, se calcula el número de tanques de aireación con membrana sumergida en su interior que debe tener la planta para tratar 68.20 m³ de agua residual.

$$Q = J_e (A_f) (N_M) (N_C) \qquad Q = 88. \frac{m^3}{d} \qquad [1.1]$$

Donde:

$$J_e: \text{ Flujo de permeado } \left[\frac{m^3}{m^2 d} \right] = 0.48 \left[\frac{m^3}{m^2 d} \right]$$

$$A_f: \text{ Área de filtración } [m^2] = 46 m^2$$

$$N_M: \text{ Número de módulos por cassettes} = 4$$

$$N_C: \text{ Número de cassettes por tanque} = 1$$

$$Q: \text{ Capacidad de agua a tratar por tanque} = ?$$

Conociendo la cantidad de agua que se puede tratar por tanque, se procede a calcular el número de tanques necesario.

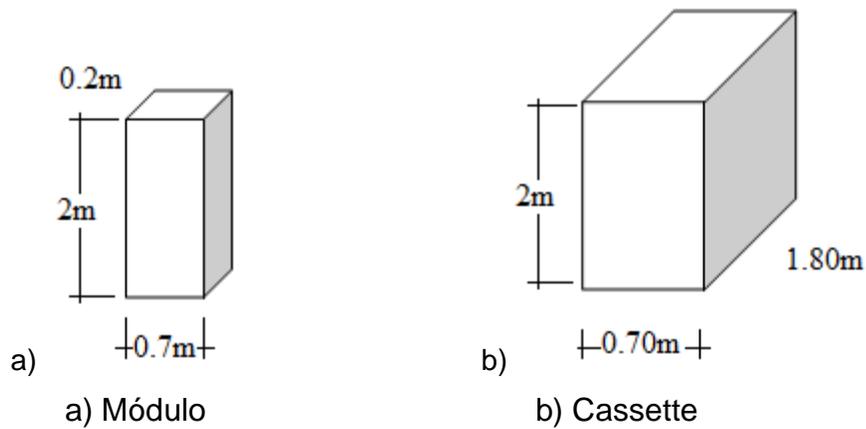
$$N_T = \frac{Q_F}{Q} = 0.77 \approx 1 \text{ Tanque} \qquad [1.2]$$

Donde:

$$N_T: \text{ Número de tanques necesarios} = ?$$

$$Q_F: \text{ Caudal de la alimentación} = 68.2 \left[\frac{m^3}{d} \right]$$

Paso 2. Conociendo el tipo de membrana a utilizar se podrá calcular el volumen del tanque. Según los datos de la tabla 1.4 cada cassette contará con 4 módulos.

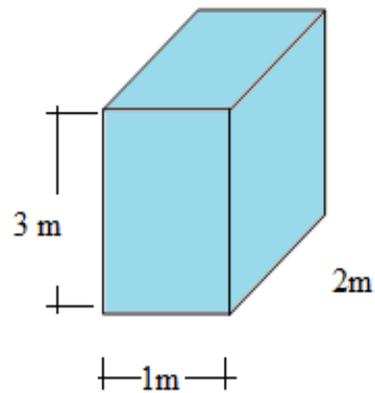


Para las medidas del tanque, considerando que solamente contará con un cassette.

Alto = 3 m

Ancho = 0.70m ≈ 1m

Largo = 1.80m ≈ 2m



$$V_{\text{Tanque}} = \text{Alto} \times \text{Ancho} \times \text{Largo} = 6 \text{ m}^3 \quad [1.3]$$

Paso 3 Conociendo el volumen del tanque y el caudal que entra en él se puede calcular el tiempo de retención hidráulica de la siguiente forma:

$$Q_F' = \frac{Q_F}{N_T} = 68.2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [1.4]$$

Donde:

Q_F' : El caudal de entrada a un tanque.

T_h : Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Dado que el caudal el número de tanques es 1, $Q_F' = Q_F$ en este caso.

$$T_h = \frac{V_{Tanque}}{Q_F'} = 0.087 \text{ d} = 2.11 \text{ h} \quad [1.5]$$

Paso 4 En este paso se calcula la relación Alimento/Microorganismo (A/M)

$$A/M = \frac{DBO_F}{T_h \cdot X_{Va}} = 0.007 \frac{Kg DBO_5}{Kg MLVSS \cdot d} = 0.17 \frac{Kg DBO_5}{Kg MLVSS \cdot d} \quad [1.6]$$

Donde

A/M = Carga másica Cm

$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$

$X_{Va} = 15,000 \text{ mg/L}$

Paso 5 Conociendo la calidad del agua que entra a la planta y la calidad del efluente requerido se calcula la cantidad de sustrato ($Kg DBO_r$) que debe ser eliminado).

$$Kg DBO_r/d = (DBO_F - DBO_e) \cdot Q_F = 13.98 \text{ Kg/d} \quad [1.7]$$

Donde:

$DBO_F = 220 \text{ mg/L} = 22.0 \text{ mg/L} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Kg/L}$

$DBO_e = 15 \text{ mg/L} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Kg/L}$

$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d} = 68,200 \text{ L/d}$

Paso 6 A continuación se calcula la potencia requerida para la aireación. Esta constituye una estimación preliminar por lo que más adelante se verificará, de no existir acuerdo con este valor, se seguirá un procedimiento iterativo hasta alcanzar una convergencia deseada.

$$P = (DBO_F - DBO_e) \cdot \frac{Q_F}{20 \text{ a } 22} = \frac{13.98 \frac{Kg}{d}}{21 \frac{Kg}{CV \cdot d}} = 0.67 \text{ Cv ó } 0.657 \text{ HP} \quad [1.8]$$

En este proceso biológico se considera que se consume aproximadamente de 20 a 22 Kg de DBO₅/Cv.d

Paso 7 Luego se realiza una estimación preliminar de la temperatura T_w del licor mixto del reactor en invierno y verano.

$$T_w = \frac{A \cdot F \cdot T_a + Q_F \cdot T_F}{A \cdot F + Q_F} \quad [1.9]$$

Al sustituir los siguientes valores en la ecuación: $F = \frac{h}{3.6 \times 10^6}$ y luego el producto h.A resultante de la sustitución anterior, se sustituye por 1134 .P, permitirá obtener una ecuación equivalente con la cual se realizará la estimación de temperatura.

$$T_w = \frac{3.6 \times 10^6 \cdot Q_F \cdot T_F + 1134 \cdot P \cdot T_a}{3.6 \times 10^6 \cdot Q_F + 1134 \cdot P} \quad [1.10]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d} = 0.00079 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = 0.67 \text{ Cv}$$

Verano:

$$T_F = 18^\circ\text{C}$$

$$T_a = 26^\circ\text{C}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.10 se obtiene: **T_w = 19.69 °C**

Invierno:

$$T_F = 8^\circ\text{C}$$

$$T_a = -1^\circ\text{C}$$

Al sustituir los valores en la ecuación 1.10 se obtiene: $T_w = 6.10^\circ\text{C}$

Paso 8 En este paso se calculan los parámetros biocinéticos k , k_d para las temperaturas de verano e invierno.

$$k_{T_w} = k \cdot \theta^{(T_w - 20)} \quad [1.11]$$

$$k_{d_{T_w}} = k_d \cdot \theta_d^{(T_w - 20)} \quad [1.12]$$

Donde:

$$K = 0.00123 \text{h}^{-1} \text{L/mg}$$

$$\theta = 1.03$$

$$K_d = 0.0025 \text{h}^{-1}$$

$$\theta_d = 1.05$$

Sustituyendo estos valores y las respectivas temperaturas de verano e invierno se obtienen los parámetros biocinéticas.

Verano

$$T_w = 19.69^\circ\text{C}$$

$$K_{19.69} = 0.00122 \text{ L/mg.h} = 0.029 \text{ L/mg.d}$$

$$K_{d_{19.69}} = 0.00246 \text{ h}^{-1} = 0.059 \text{ d}^{-1}$$

Invierno

$$T_w = 6.10^\circ\text{C}$$

$$K_{6.10} = 0.0008 \text{ L/mg.h} = 0.019 \text{ L/mg.d}$$

$$K_{d_{6.10}} = 0.00127 \text{ h}^{-1} = 0.0305 \text{ d}^{-1}$$

Paso 9 Se ha considerado el biorreactor como un reactor biológico continuo de tanque agitado (RFCTA) que opera bajo régimen estacionario y mezcla completa. En la siguiente figura se muestra un diagrama simplificado de un RFCTA.

Figura 25. Diagrama simplificado de un RFCTA



A nivel cinético, el balance de materia del sustrato que entra y abandona el biorreactor puede escribirse como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Velocidad neta de} \\ \text{cambio en el reactor} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la que el} \\ \text{sustrato entra en el} \\ \text{reactor} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la que el} \\ \text{sustrato abandona el} \\ \text{reactor} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la que el} \\ \text{sustrato se oxida en el} \\ \text{reactor} \end{array} \right)$$

Bajo régimen estacionario, la concentración de sustrato en el reactor permanece constante y por lo tanto la velocidad neta de cambio en el reactor es cero. Sustituyendo cada una de las velocidades de la expresión anterior se tiene:

$$0 = Q_F \cdot DBO_F - Q_e \cdot DBO_e - \frac{dS}{dt} \cdot V \quad [1.13]$$

La velocidad de consume de sustrato se expresa por unidad de MLVSS presente en el reactor, y se define mediante:

$$q = \frac{1}{X_{Va}} \left(\frac{dS}{dt} \right) \quad [1.14]$$

Despejando $\frac{dS}{dt}$ de la ecuación 1.13 y luego sustituyendo este valor en la ecuación 1.14 se obtiene la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{X_{Va} \cdot V} (Q_F \cdot DBO_F - Q_e \cdot DBO_e) \quad [1.15]$$

$$\frac{dS}{dt} \quad \text{También puede expresarse como:} \quad \frac{dS}{dt} = K \cdot DBO_e \quad [1.16]$$

Sustituyendo la ecuación 1.16 en la ecuación 1.14 y luego igualándola con la ecuación 1.15 se tiene:

$$\frac{1}{X_{Va}} K \cdot DBO_e = \frac{1}{X_{Va} \cdot V} (Q_F \cdot DBO_F - Q_e \cdot DBO_e) \quad [1.17]$$

ya que la concentración de MLVSS en equilibrio (X_{Va}) viene fijada por una operación específica de reactor continuo, la relación K/X_{Va} es una constante que se denotará mediante la letra k , así:

$$k = \frac{K}{X_{Va}} \quad [1.18]$$

Sustituyendo este valor en la ecuación 1.17:

$$k \cdot DBO_e = \frac{1}{X_{Va} \cdot V} (Q_F \cdot DBO_F - Q_e \cdot DBO_e) \quad [1.19]$$

Despejando DBO_e de la ecuación anterior se obtiene:

$$DBO_e = \frac{Q_F \cdot DBO_F}{k \cdot X_{Va} \cdot V + Q_e} \quad [1.20]$$

Para aplicar la ecuación anterior y determinar la variación del DBO₅ respecto a la temperatura, se considerará que Q_e ≈ Q_F, esto se debe a que el caudal de purga (Q_w) es bastante reducido comparado con el caudal del efluente. Por tanto la ecuación a utilizar será:

$$BO_e \approx \frac{Q_F \cdot DBO_F}{k \cdot X_{Va} \cdot V + Q_F} \quad [1.21]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$X_{Va} = 15,000 \text{ mg/L}$$

$$V = V_T = 6 \text{ m}^3$$

$$k_{19.69} = 0.0029 \text{ L/mg.d}$$

$$k_{6.10} = 0.019 \text{ L/mg.d}$$

Sustituyendo estos valores según la Temperatura indicada se obtienen los siguientes resultados:

Condiciones de Verano (19.69 °C)

$$DBO_e = 5.60 \text{ mg/L}$$

Condiciones de Invierno (6.10°C)

$$DBO_e = 8.44 \text{ mg/L}$$

Paso 10 En este paso se calculará la producción neta de biomasa en el reactor (ΔX_v) considerando la temperatura y el cambio que produce en el parámetro biocinética k_d .

$$\Delta X_V = Y \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot Q_F' - k_d \cdot X_{Va} \cdot V_T \quad [1.22]$$

Donde:

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBO}_r$$

$$Q_F' = 68200 \text{ L/d}$$

$$V = 6 \text{ m}^3 = 6000 \text{ L}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 1.22, variando k_d según el clima y considerando que se trabajará con Kg por lo que se multiplicará todo por 10^{-6} (factor de conversión de mg a Kg) se tiene:

Verano:

$$k_{d19.69} = 0.059d^{-1}$$

$$DBO_e = 5.60 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 2 \text{ Kg/d}$$

Invierno:

$$k_{d6.10} = 0.0305d^{-1}$$

$$DBO_e = 8.44 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 4.47 \text{ Kg/d}$$

Paso 11 Para calcular el consumo de oxígeno en la degradación biológica, se debe conocer el nitrógeno total Kjendahl en el afluente y efluente (N_F , N_e). El requerimiento de oxígeno p está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = \frac{Q_F' \cdot (DBO_F - DBO_e)}{f} - 1.42 \cdot \Delta X_V + 4.57 \cdot Q_F' \cdot (N_F - N_e) \quad [1.23]$$

Donde:

$$Q_F' = 68,200 \text{ L/d}$$

N_F : nitrógeno total Kjendahl del afluente = 40 mg/L = 40×10^{-6} Kg/L

N_e : nitrógeno total Kjendahl del efluente = 15 mg/L = 15×10^{-6} Kg/L

1.42 = Factor de conversión para la demanda de oxígeno

4.57 = Factor de conversión para la oxidación completa

$\Delta X = 2$ Kg/d

$DBO_F = 220$ mg/L = 220×10^{-6} Kg/L

$DBO_e = 5.60$ mg/L = 5.6×10^{-6} Kg/L

$f = 0.68$

Como se ha considerado este tipo de proceso permite trabajar con tiempos de retención de sólidos (TRS) elevado, lo cual permite la degradación de los microorganismos de crecimiento lento por lo que al sustituir los valores anteriores (en estos se consideran las condiciones de verano) se obtiene:

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 26.45 \text{ Kg/d}$$

Como información adicional calculado para invierno considerando una $DBO_e = 8.44$ mg/L y una $\Delta X = 4.47$ Kg/d

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 26.45 \text{ Kg/d}$$

Paso 12 Con el dato obtenido en el paso anterior se calcula la potencia requerida de aireación (verano) para posteriormente compararla con la potencia que se calculó en el paso 6, de existir una diferencia entre ambas potencias, se realizará iteraciones del paso 6 al 12 hasta que la pareja de P y T_w concuerden con P' y T_w' .

$$P' = \frac{\text{Kg O}_2/\text{d}}{(RT)_{real}} \quad [1.24]$$

Donde:

RT: representa el rendimiento de transferencia de oxígeno (en este caso se considerará un $RT = 0.85 \text{ kg O}_2/(\text{Cv.h}) = 20.4 \text{ Kg}/(\text{Cv.d})$)

Sustituyendo este valor y el obtenido en el paso 11 se tiene: $P' = 1.30 \text{ Cv}$

Como se observa, este valor es mayor al obtenido en el paso 6, por lo que se realizarán iteraciones con la ayuda de una hoja de cálculo hasta llegar a un valor aproximado.

P_{inicial}	T_w	DBO_e	ΔX	$\text{Kg O}_2/\text{d}$	P_{final}
0.67	19.69	5.6	2	26.45	1.3
1.3	18.000048	5.832476	2.40514191	26.0267913	1.2758231
1.2758231	18.0000471	5.83247615	2.40514211	26.026791	1.27582309

$K \text{ (L/mg.d)}$	$k_d \text{ (d}^{-1}\text{)}$
0.02782547	0.0544219
0.02782547	0.05442189

Los nuevos valores (verano) serían:

$$T_w = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{DBO}_e = 5.83 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_v = 2.41 \text{ Kg/d}$$

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 26.03 \text{ Kg/d}$$

$$P' = 1.28 \text{ Cv}$$

$$K = 0.0278 \text{ L/mg.d}$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

Calculando los valores de invierno también en una hoja de cálculo se tiene:

$$T_w = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
 \text{DBO}_e &= 7.77 \text{ mg/L} \\
 \Delta X_V &= 4.23 \text{ Kg/d} \\
 \text{Kg O}_2/\text{d} &= 23.24 \text{ Kg/d} \\
 P' &= 1.14 \text{ Cv} \\
 K &= 0.0207 \text{ L/mg.d} \\
 K_d &= 0.0334 \text{ d}^{-1}
 \end{aligned}$$

Una vez obtenidos estos resultados, a partir del consumo de oxígeno puede calcularse los requerimientos de aireación:

$$Q_{\text{air}} = \frac{\text{Kg O}_2/\text{d}}{4 \cdot \eta \cdot m} \quad [1.25]$$

La eficiencia específica de transferencia de oxígeno (η) se calcula mediante la expresión:

$$\eta = 9 - 8.63 \times 10^{-4} \cdot X_{Va} + 2.56 \times 10^{-8} \cdot X_{Va}^2 \quad [1.26]$$

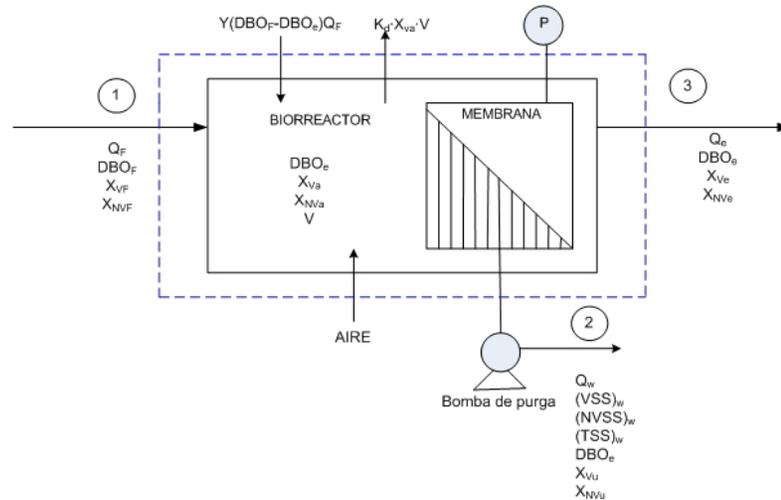
Sustituyendo $X_{Va} = 15,000 \text{ mg/L}$: $\eta = 1.81\%/m$

En la ecuación 1.25 $m =$ la profundidad del tanque, el cual se había calculado con anterioridad por lo que $m = 3 \text{ m}$. Sustituyendo se tiene:

$$Q_{\text{air}} = 119.84 \text{ kg/d}$$

Paso 13 Realizando un balance de material de sólidos en suspensión en el reactor, se podrá determinar la cantidad en Kg/d de sólidos volátiles en suspensión en el exceso de fango, donde el término $K_d \cdot X_{Va} \cdot V$ indica la biomasa perdida por respiración endógena y el término $Y \cdot (\text{DBO}_F - \text{DBO}_e) \cdot QF$, la producción de biomasa por síntesis en el reactor.

Figura 26. Balance de masa de los sólidos en suspensión en un MBR sumergido



Fuente: Alcarria, M. (Abril 2005, pag. 115).

$$Y \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot Q_F + Q_F \cdot X_{VF} = Q_w \cdot X_{Vu} + k_d \cdot X_{Va} \cdot V + Q_e \cdot X_{Ve}$$

$$(VSS)_w = Q_w \cdot X_{Vu} = Y \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot Q_F - k_d \cdot X_{Va} \cdot V - Q_e \cdot X_{Ve} + Q_F \cdot X_{VF}$$

Dado que $\Delta X_V = Y \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot Q_F' - k_d \cdot X_{Va} \cdot V_T$ por lo que lo sustituimos en la expresión anterior para obtener:

$$(VSS)_w = \Delta X_V + Q_F \cdot X_{VF} - Q_e \cdot X_{Ve} = Q_w \cdot X_{Vu} \quad [1.27]$$

A partir de este punto la presencia de la membrana determina el proceso. Al contar los MBR con membranas de MF o UF impide el paso de los sólidos en suspensión (X_V) a través de ellas. Por lo que la concentración de sólidos en suspensión en el efluente será prácticamente nula ($X_{Ve} \approx 0$). Al retener la membrana todos los sólidos volátiles en suspensión presentes en el reactor se puede considerar $X_{Va} \approx X_{Vu}$. Aplicando estas consideraciones en la ecuación 1.27 se obtiene:

$$Q_w' \cdot X_{Va} = \Delta X_V + Q_F \cdot X_{VF}$$

$$Q_w' = \frac{\Delta X_V + Q_F' \cdot X_{VF}}{X_{Va}} \quad [1.28]$$

Donde:

$$X_{Va} = 15000 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 2.41 \text{ Kg/d (Verano)}$$

$$\Delta X_V = 4.23 \text{ Kg/d (Invierno)}$$

$$Q_F = 68200 \text{ L/d}$$

$$X_{VF} \approx 0$$

Para verano: $Q_w' = 0.161 \text{ m}^3/\text{d}$

Para invierno: $Q_w' = 0.28 \text{ m}^3/\text{d}$

En este punto se puede ver como Q_F es mucho mayor a Q_w por lo que la aproximación que se hizo al inicio $Q_e \approx Q_F$ es aceptable.

Se tomará como valor de Q_w' un valor medio entre las condiciones anteriores, por lo que $Q_w' = 0.22 \text{ m}^3/\text{d}$.

Paso 14 Realizando un balance global en el tanque de la figura 1.3 es posible encontrar el valor de caudal de salida.

$$Q_e' = Q_F' - Q_w' \quad [1.29]$$

Sabiendo que:

$$Q_F' = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_w' = 0.22 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_e' = 67.98 \text{ m}^3/\text{d}$$

Paso 15 En este paso se calcula la cantidad de sólidos totales en suspensión eliminados, primero realizando un balance de materia de sólidos en suspensión no volátiles en la figura 1.3 se obtiene:

$$(NVSS)_w = Q_w \cdot X_{NVU} = Q_F \cdot X_{NVF} - Q_e \cdot X_{NVe} \quad [1.30]$$

Donde:

$$X_{NVF} = 6.62 \text{ mg/L} = 8.6 \times 10^{-6} \text{ Kg/L (más adelante es calculado este valor)}$$

$$X_{NVe} \approx 0$$

$$Q_F = 68,200 \text{ L/d}$$

Sustituyendo los valores anteriores:

$$(NVSS)_w = 0.451 \text{ Kg/d}$$

Como se vió en el paso 13 $(VSS)_w = Q_w' \cdot X_{Vu}$ y sabiendo que $Q_w' = 0.22 \text{ m}^3/\text{d}$ y considerando $X_{Vu} \approx X_{Va}$ debido a como ya se consideró, la membrana retiene todos los sólidos volátiles en suspensión:

$$(VSS)_w = 3.3 \text{ Kg/d}$$

Conociendo $(VSS)_w$ y $(NVSS)_w$ se puede determinar los sólidos totales en suspensión eliminados:

$$(TSS)_w = (VSS)_w + (NVSS)_w \quad [1.31]$$

$$(TSS)_w = 3.751 \text{ Kg/d}$$

Paso 16 Ahora se calcula la DBO_e para las condiciones de verano e invierno, conociendo que $(Q_e = 67.98 \text{ m}^3/\text{d})$ según lo calculado en el paso 14.

$$DBO_e = \frac{Q_F \cdot DBO_F}{k \cdot X_{Va} \cdot V + Q_e} \quad [1.19]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$X_{Va} = 15,000 \text{ mg/L}$$

$$V = V_T = 6 \text{ m}^3$$

$$k_{18 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.0278 \text{ L/mg.d}$$

$$k_{8 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.0207 \text{ L/mg.d}$$

Sustituyendo se tiene:

(verano)	$DBO_e = 5.84 \text{ mg/L}$
(Invierno)	$DBO_e = 7.77 \text{ mg/L}$

Paso 17 En la degradación aerobia biológica de las aguas residuales se necesita una cantidad adecuada de nutrientes la mayoría de los cuales se encuentran presentes en la cantidad necesaria en las aguas residuales, excepto en algunos casos como el de aguas industriales. Se estima que es necesario nitrógeno equivalente al 12.4 % de la biomasa total producida (ΔX_v) y que el fósforo necesario es aproximadamente la quinta parte de nitrógeno.

$$N_{\text{REQUERIDO}} = 0,124 \cdot \Delta X_v \text{ (kg/d)} \quad [1.32]$$

$$P_{\text{REQUERIDO}} = 0.2 (0.124) \Delta X_v \text{ (kg/d)} \quad [1.33]$$

Para conocer si existen las cantidades suficientes de nitrógeno y fósforo en el agua residual, debe calcularse la cantidad total de nitrógeno y fósforo disponible en la alimentación inicial:

$$N_{\text{DISPONIBLE}} = 86,4 \cdot Q_F \cdot (\text{NTK}) \text{ (kg/d)} \quad [1.34]$$

$$P_{\text{DISPONIBLE}} = 86,4 \cdot QF \cdot (P) \text{ (kg/d)}$$

[1.35]

Sabiendo que:

$$\Delta X_v \text{ (verano)} = 2.41 \text{ Kg/d}$$

$$\Delta X_v \text{ (invierno)} = 4.23 \text{ Kg/d}$$

$$QF = 68,200 \text{ L/d}$$

$$NTK = 40 \text{ mg/d}$$

$$P = 8 \text{ mg/d}$$

Se tiene:

$$N_{\text{DISPONIBLE}} = 2.36 \text{ Kg/d}$$

$$P_{\text{DISPONIBLE}} = 0.47 \text{ Kg/d}$$

Condiciones de Verano

$$N_{\text{REQUERIDO}} = 0.30 \text{ Kg/d}$$

$$P_{\text{REQUERIDO}} = 0.06 \text{ Kg/d}$$

Condiciones de Invierno

$$N_{\text{REQUERIDO}} = 0.52 \text{ Kg/d}$$

$$P_{\text{REQUERIDO}} = 0.10 \text{ Kg/d}$$

Paso 18 Cálculo de la edad de fango:

$$\theta_c = \frac{V \cdot X_{Va}}{Q_w \cdot X_{Vu} + Q_e \cdot X_{Ve}} \quad [1.36]$$

Donde:

$$V = 6 \text{ m}^3$$

$$Q_w' = 0.22 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$X_{Vu} \approx X_{Va}$$

$$\theta_c = 27.28 \text{ d}$$

Paso 19 Cálculo de la carga volumétrica:

$$Cv = \frac{DBO_5 \cdot Q_F}{V} \quad [1.37]$$

Donde:

$$DBO_5 = 220 \text{ mg/L} = 220 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$Q_F = 68,200 \text{ L/d}$$

$$V = 6 \text{ m}^3$$

Entonces se tiene que: $Cv = 2.50 \text{ Kg DBO}^5/\text{m}^3\text{d}$

Paso 20 Por último se calculan algunas eficiencias del proceso como:

6. Porcentaje de conversión de las membranas

$$Yc = 100 \cdot \frac{Q_e'}{Q_F'} \quad [1.37]$$

$$Q_e' = 67.98 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_F' = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Yc = 99.68 \%$$

7. Eficiencia de eliminación de DBO del MBR

$$\eta_T = \frac{DBO_F - DBO_e}{DBO_F} \cdot 100 \quad [1.38]$$

Donde $DBO_e = 5.84 \text{ mg/L}$ para verano y 7.77 mg/L para invierno, sustituyendo se tiene:

$$\eta_T = 97.3 \%$$

1.9 Dimensionamiento del tanque de permeado y tanque químico

Una vez diseñado el tanque de la membrana se procede a diseñar los tanques que la acompañaran y tendrán como función la realización de la limpieza de la misma.

1.9.1 Tanque de permeado

Este tanque tiene la función de evitar la acumulación de las partículas sólidas sobre la superficie de las membranas por lo cual se almacena una pequeña cantidad de agua tratada que será recirculada a partir de una bomba de succión utilizada durante el proceso de filtración en el interior del tanque de aireación. La frecuencia de limpieza dependerá de condiciones de operación como el tiempo de operación, las características del agua de alimentación y del flujo de permeado entre otros. En la mayor parte de los casos, el retrolavado tiene lugar cada 30 – 60 min de trabajo del sistema, se hace durar un tiempo de 1 a 3 minutos realizándose de manera continua mientras el sistema se encuentre en funcionamiento.⁵⁸

Paso 1 Para dimensionar el tanque de permeado, se considerará que el flujo de retrolavado necesario es 1.5 veces el flujo de permeado.⁵⁹ Por lo que se tiene:

$$F_R = 1.5 F_P$$

$$Q_R = F_R \cdot A_F \quad [1.39]$$

Donde

F_P : Flujo de permeado = 20 L/m²h

F_R : Flujo de retrolavado [m³/m²d]

⁵⁸ González, L. (Septiembre 2006, pág. 177)

⁵⁹ ibíd

Q_R : caudal de retrolavado

A_F : Área de filtración de la membrana = 184 m^2 (1 cassette) = 184 m^2

$$\text{Por tanto } F_R = 30\text{L/m}^2\text{h} = 0.72 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.39 se obtiene:

$$Q_R = 132.48 \text{ m}^3/\text{d} = 5.52 \text{ m}^3/\text{h}$$

De la ecuación 1.5 del TRH se tiene que:

$$V_{\text{TANQUE}} = \text{TRH} \cdot Q_R$$

Considerando un tiempo de permanencia del agua tratada en el tanque de 60 min (TRH = 1h) se obtendrá el volumen del tanque.

$$V_{\text{TANQUE}} = 5.52 \text{ m}^3$$

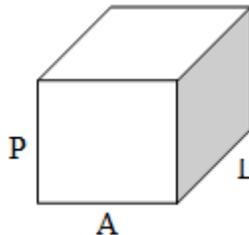
Teniendo el volumen del tanque se puede encontrar las medidas del mismo. (Aquí se trabajará con valores exactos) entonces se tiene:

Ancho = 1.5 m

Largo = 2m

Profundidad = 2 m

Volumen = 6 m^3



Paso 2 En los MBR con membrana sumergidas, la fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada creando una presión pegativa en el lado de permeado de la membrana, o mediante la aspiración a través de la propia membrana. Para ello se utiliza una bomba de aspiración con una PTM = 0.5 bar

(ver pág. 93). Esta bomba es la misma que impulsará el caudal de permeado hacia la limpieza de las membranas.

$$P_c \frac{\Delta P Q_R}{\eta} = \quad [1.40]$$

ΔP : Presión transmembranal [$\text{Pa} = \text{N/m}^2$]

Q_R : Caudal de retrolavado [m^3/s]

η = Eficiencia de la bomba (supondremos una eficiencia del 70 %) dato que puede ser obtenido de las características de la bomba a utilizar.

Convirtiendo $\Delta P = 0.5$ bar a pascales [Pa] y el caudal de retrolavado a m^3/s y sustituyendo los valores en la ecuación 1.39 se tiene:

$$Q_R = 132.48 \text{ m}^3/\text{d} = 1.53 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P = 0.5 \text{ bar} = 50,000 \text{ Pa}$$

$$P_c = 109.53 \text{ watt} \text{ ó } \mathbf{0.11 \text{ Kw}}$$

Sabiendo que $1 \text{ N.m/s} = 1 \text{ J/s} = \text{Watt}$

1.9.2 Tanque químico

Paso 1 La limpieza química de las membranas se realiza una vez que el flujo del permeado haya disminuido un 20 % [F_{Pf}] respecto al original [F_{Po}], esto sucede en la mayoría de los casos una vez cada 6 – 12 meses.⁶⁰

$$F_{Pf} = 0.80 (F_{Po})$$

⁶⁰ González, L. (septiembre 2006, pág. 179)

Donde:

F_{P_0} = flujo de permeado inicial = 20 L/m²h

F_{P_f} = flujo de permeado final

Sustituyendo se tiene: $F_{P_f} = 16 \text{ L/m}^2\text{h} = 0.384 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$

Aplicando la ecuación 1.39 en este caso y sabiendo que el área de permeado $A_F = 184 \text{ m}^2$ se tiene:

$$Q_P = F_{P_f} \cdot A_F$$

Donde:

$F_{P_f} = 0.384 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$

$$Q_P = 70.56 \text{ m}^3/\text{d}$$

Paso 2 Cálculo de Volumen del tanque químico. Según el tipo de agua se puede utilizar una dosis de hipoclorito sódico (NaOCl) entre 1 y 5 mg/L ⁶¹. Considerando una dosis máxima de 5mg/L y teniendo en cuenta el caudal de permeado a la salida del tanque calculado en el paso anterior, se calcula la cantidad de hipoclorito sódico una vez sea necesaria la realización de una limpieza química.

$$M_{\text{NaOCl}} = D \cdot Q_P \quad [1.41]$$

Donde:

D: Dosificación de NaOCl en (Kg/m³) = 5 mg/L = $5 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$

Q_P : 70.56 m³/d

Sustituyendo estos valores se tiene: $M_{\text{NaOCl}} = 0.35 \text{ Kg/d}$

⁶¹ Ibid.

Conociendo que la disolución comercial del hipoclorito sódico tiene una densidad de $\rho_{NaOCl} = 0.98\text{Kg/L}$ (en este cálculo se utilizará su equivalente 980 Kg/m^3) se tiene:

$$Q_{NaOCl} = \frac{M_{NaOCl}}{\rho_{NaOCl}} \quad [1.42]$$

Sustituyendo estos valores $Q_{NaOCl} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{d}$

El volumen del tanque químico se obtiene multiplicando el caudal de NaOCl por los días del año, esto es:

$$V_{TANQUE} = Q_{NaOCl} \cdot 365\text{d} \quad [1.43]$$

Sustituyendo se tiene: $V_{TANQUE} = 0.14 \text{ m}^3$

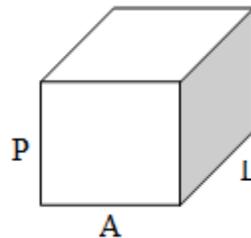
Según el resultado se observa de la necesidad de un tanque de pequeñas dimensiones:

Ancho = 0.50 m

Largo = 0.60 m

Profundidad = 0.50 m

Volumen = 0.15 m³



2 CÁLCULO DEL REACTOR BIOLÓGICO.

Como se ha considerado, el sistema de tratamiento aplicando la tecnología MBR, está formado por un reactor biológico similar al reactor en el proceso de fangos activados, en el cual es sumergida la membrana. En este apartado se calcula las dimensiones del Reactor biológico en el cual ira inmerso el tanque de la membrana calculado en el Anexo A 1.8

2.1 Cálculo de la Cuba de Aireación (Reactor Biológico).

Datos de partida:

Estos son los mismos que en la tabla XV del Anexo con la diferencia que en los datos del efluente se tiene un $X_{Ve} = 30\text{mg/L}$, y en los datos del reactor se tiene que $X_{Va} = 3000\text{ mg/L}$ y $X_{Vu} = 11000\text{ mg/L}$

Paso 1 Se calcula la cantidad de sustrato consumida por día. Este valor se calculó en el diseño del MBR.

$$\text{Kg DBO}_r/d = (\text{DBO}_F - \text{DBO}_e) \cdot Q_F = 13.98 \text{ Kg/d} \quad [1.7]$$

$$\text{Kg DBO}_r/d = 13.98 \text{ Kg/d}$$

Paso 2 Se realiza una estimación preliminar de la Potencia requerida. Se calculó en el diseño MBR.

$$P = (\text{DBO}_F - \text{DBO}_e \frac{Q_F}{20 \text{ a } 22}). \quad [1.8]$$

$$P = 0.67 \text{ Cv}$$

Paso 3 Ahora se procede a realizar una estimación preliminar de la Temperatura T_w , la cual se calculó en el diseño del MBR

$$T = \frac{3.6 \times 10^6 \cdot Q_F \cdot T_F + 1134 \cdot P \cdot T_a}{3.6 \times 10^6 \cdot Q_F + 1134 \cdot P} \quad [1.10]$$

Verano: $T_w = 19.69 \text{ °C}$

Invierno: $T_w = 6.10 \text{ °C}$

Luego se procede a calcular los parámetros biocinéticos, calculados anteriormente.

$$k_{T_w} = k \cdot \theta^{(T_w - 20)} \quad [1.11]$$

$$k_{d_{T_w}} = k_d \cdot \theta_d^{(T_w - 20)} \quad [1.12]$$

Verano

$$K_{19.69} = 0.029 \text{ L/mg.d}$$

$$K_{d_{19.69}} = 0.059 \text{ d}^{-1}$$

Invierno

$$K_{6.10} = 0.019 \text{ L/mg.d}$$

$$K_{d_{6.10}} = 0.0305 \text{ d}^{-1}$$

Paso 5 Ahora se calcula un tiempo de residencia en condiciones de invierno por ser las más críticas.

$$t = \frac{DBO_F - DBO_e}{X_{V_a} \cdot K \cdot DBO_e} \quad [2.1]$$

Donde:

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L}$$

$$X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$$

$$K = 0.019 \text{ L/mg.d}$$

$$t = 0.24 \text{ d} \quad \text{ó} \quad 5.75 \text{ h.}$$

Para el cálculo de t en verano únicamente se cambia el parámetro biocinético k por el de verano, obteniendo así un t = 0.157 d ó 3.77 h

Paso 6 Cálculo de la relación A/M

$$A/M = \frac{DBO_F}{t \cdot X_{Va}} \quad [1.6]$$

Sustituyendo las variables de esta ecuación definidas en el paso 5 para condiciones de invierno se tiene:

$$A/M = 0.013 \frac{Kg DBO_5}{Kg MLVSS \cdot h} = 0.31 \frac{Kg DBO_5}{Kg MLVSS \cdot d}$$

Paso 7 Cálculo de la DBO₅ soluble real en el efluente para condiciones de invierno (para condiciones de verano este valor será menor:

$$DBO_e = \frac{DBO_F}{1 + K \cdot X_{Va} \cdot t} \quad [2.2]$$

Donde:

Invierno

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L}$$

$$X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$$

$$K = 0.019 \text{ L/mg.d}$$

$$t = 0.24 \text{ d}$$

$$\text{DBO}_e = 22.11 \text{ mg/L}$$

Para condiciones de verano se utiliza un $k = 0.029$ y $t = 0.157 \text{ d}$

$$\text{DBO}_e = 15.01 \text{ mg/L}$$

Paso 8 Cálculo del volumen del reactor

$$V = Q_F \cdot t \quad [1.5]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$t = 0.24 \text{ d}$$

$$V = 16.37 \text{ m}^3$$

Paso 9 Se calcula la producción neta de biomasa

$$\Delta X_V = Y \cdot (\text{DBO}_F - \text{DBO}_e) \cdot Q_F' - k_d \cdot X_{Va} \cdot V \quad [1.22]$$

Donde:

$$\text{DBO}_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBO}_r$$

$$Q_F' = 68200 \text{ L/d}$$

$$V = 16.37 \text{ m}^3 = 16,370 \text{ L}$$

$$X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 1.22, variando k_d según el clima y considerando que se trabajará con Kg por lo que se multiplicará todo por 10^{-6} (factor de conversión de mg a Kg) se tiene:

Verano:

$$k_{d19.69} = 0.059d^{-1}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 4.10 \text{ Kg/d}$$

Invierno:

$$k_{d6.10} = 0.0305d^{-1}$$

$$DBO_e = 22.11 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 5.25 \text{ Kg/d}$$

Paso 10 Se calcula la demanda de oxígeno para la condición más crítica (en este caso la de verano) donde $f = 0.68$

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = \frac{Q_F' \cdot (DBO_F - DBO_e)}{f} - 1.42 \cdot \Delta X_V \quad [2.3]$$

Donde:

$$Q_F' = 68,200 \text{ L/d}$$

$$\Delta X = 4.10 \text{ Kg/d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L} = 220 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$DBO_e = 15.01 \text{ mg/L} = 15.01 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$f = 0.68$$

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 14.71 \text{ Kg/d}$$

Paso 11 Ahora se procede a calcular la potencia requerida en la aireación

$$P' = \frac{\text{Kg O}_2/\text{d}}{(RT)_{real}} \quad [1.24]$$

Donde:

$RT = 0.85 \text{ kg O}_2/(\text{Cv.h}) = 20.4 \text{ Kg}/(\text{Cv.d})$ (más adelante se calcula este valor)
 en esta ecuación utilizaremos el valor $20.4 \text{ kg}/\text{Cv.d}$

$$P' = 0.721 \text{ Cv}$$

Dado que existe una diferencia entre la potencia calculada en este paso respecto a la calculada en el paso 2, se procede a iterar hasta que tanto las potencias inicial y final como la temperatura T_w coincidan.

$P_{inicial}$	T_w	DBO_e	ΔX	$\text{Kg O}_2/\text{d}$	P_{final}
0.67	19.69	15.01	4.1	14.71	0.721
0.721	18.0000266	15.5964341	4.29750506	14.3980181	0.7057852
0.7057852	18.0000261	15.5964344	4.29750513	14.398018	0.7057852

$K \text{ (L/mg.d)}$	$k_d \text{ (d}^{-1}\text{)}$
0.02782545	0.05442184
0.02782545	0.05442184

Los nuevos valores (verano) serían:

$$T_w = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$DBO_e = 15.60 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_v = 4.30 \text{ Kg/d}$$

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 14.40 \text{ Kg/d}$$

$$P' = 0.71 \text{ Cv}$$

$$K = 0.0278 \text{ L/mg.d}$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

Calculando los valores de invierno también en una hoja de cálculo se tiene:

$$T_w = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{DBO}_e = 20.46 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 5.16 \text{ Kg/d}$$

$$\text{Kg O}_2/\text{d} = 12.68 \text{ Kg/d}$$

$$P' = 0.62 \text{ Cv}$$

$$K = 0.0207 \text{ L/mg.d}$$

$$K_d = 0.0334 \text{ d}^{-1}$$

Paso 12 Con los datos obtenidos en condiciones de verano, se puede calcular el caudal de aireación igual como se hizo en el proceso de MBR.

$$Q_{\text{air}} = \frac{\text{Kg O}_2/\text{d}}{4 \cdot \eta \cdot m} \quad [1.25]$$

La eficiencia específica de transferencia de oxígeno (η) se calcula mediante la expresión:

$$\eta = 9 - 8.63 \times 10^{-4} \cdot X_{V_a} + 2.56 \times 10^{-8} \cdot X_{V_a}^2 \quad [1.26]$$

Sustituyendo $X_{V_a} = 3,000 \text{ mg/L}$: $\eta = 6.64\%/m$

En la ecuación 1.25 $m =$ la profundidad del tanque, el cual se asumirá una profundidad $m = 3 \text{ m}$. Sustituyendo se tiene:

$$Q_{\text{air}} = 18.07 \text{ kg/d}$$

Paso 13 Cálculo de la relación de reciclado

$$r = \frac{X_{Va}}{X_{Vu} - X_{Va}} \quad [2.4]$$

Sabiendo que $X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$ y $X_{Vu} = 11000 \text{ mg/L}$ se tiene:

$$r = 0.375$$

Paso 14 Cálculo de los caudales restantes (se considera $r = 0.375$)

$$Q_R = r \cdot Q_F \quad [2.4]$$

$$Q_o = (r + 1) Q_F \quad [2.5]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_R = 25.56 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_o = 93.78 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_w = \frac{\Delta X_V + Q_F \cdot X_{VF} - Q_F \cdot X_{Ve}}{X_{Vu} - X_{Ve}} \quad [2.6]$$

Donde:

$$X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$$

$$\Delta X_V = 4.30 \text{ Kg/d (Verano)}$$

$$\Delta X_V = 3.16 \text{ Kg/d (Invierno)}$$

$$Q_F = 68200 \text{ L/d}$$

$$X_{VF} \approx 0$$

$$X_{Ve} = 30 \text{ mg/L} = 30 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$X_{Vu} = 11000 \text{ mg/L} = 11000 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

Sustituyendo se tiene:

Para verano: $Q_w = 0.21 \text{ m}^3/\text{d}$

Para invierno: $Q_w = 0.102 \text{ m}^3/\text{d}$

Lo que se observa es que estos caudales son muy pequeños por lo que se podría decir que $Q_F \approx Q_e$. Para simplificar el proceso se tomará un $Q_w = 0.16 \text{ m}^3/\text{d}$ que es el promedio de los anteriores.

$$Q_e = Q_F - Q_w = 68.04 \text{ m}^3/\text{d} \quad [1.29]$$

$$Q_u = Q_o - Q_e \quad [2.7]$$

Sabiendo que $Q_o = 93.78 \text{ m}^3/\text{d}$ y sustituyendo se tiene

$$Q_u = 25.74 \text{ m}^3/\text{d}$$

Paso 15 Ahora se calcula el tiempo de retención hidráulica t_h , esto es:

$$t_h = \frac{t}{r+1} \quad [2.8]$$

Para condiciones de invierno por ser el mayor, se tiene q $t = 5.75$ horas y $r = 0.375$, con esto se tiene:

$$t_h = 4.18 \text{ h}$$

Paso 16 Cálculo de la producción total de lodos.

1. Se calcula $(NVSS)_w$

$$1.1 \quad X_{NVa} = \frac{(1-Fv) \cdot X_{Va}}{Fv} \quad [2.9]$$

Donde $Fv = 0.8$ y $X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$

$$1.2 \quad X_{NVa} = 750 \text{ mg/L}$$

$$X_{NVu} = \frac{Q_F(r+1) \cdot X_{NVa}}{Q_u} \quad [2.10]$$

Sabiendo que $Q_u = 25.79 \text{ m}^3/\text{d}$ y $Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$ se tiene:

$$X_{NVu} = 2732.37 \text{ mg/L}$$

$$1.3 \quad X_{NVF} = (r + 1) \cdot X_{NVa} - r \cdot X_{NVu} \quad [2.11]$$

$$X_{NVF} = 6.62 \text{ mg/L}$$

Calculando los la purga de sólidos en suspensión no volátil se tiene:

$$(NVSS)_w = Q_F \cdot X_{NVF} - Q_e \cdot X_{NVe} \quad [1.30]$$

Conociendo el valor de las variables y que $Q_e = 67.99 \text{ m}^3/\text{d}$ y que $X_{NVe} \approx 0$

$$(NVSS)_w = 0.451 \text{ Kg/d}$$

De la ecuación 1.27 se calcula los sólidos volátiles en suspensión a eliminar:

$$(VSS)_w = \Delta X_V + Q_F \cdot X_{VF} - Q_e \cdot X_{Ve} \quad [1.27]$$

Conociendo todos los valores de la ecuación y sabiendo que $X_{VF} \approx 0$ y $X_{Ve} = 30\text{mg/L}$ se tiene:

Condiciones verano: $\Delta X_V = 4.30 \text{ Kg/d}$

$$(VSS)_w = 2.26 \text{ Kg/d}$$

Condiciones de Invierno: $\Delta X_V = 3.16 \text{ Kg/d}$

$$(VSS)_w = 1.12 \text{ Kg/d}$$

Así que la producción total de lodos viene dada por:

$$(TSS)_w = (VSS)_w + (NVSS)_w \quad [1.31]$$

Para verano: $(TSS)_w = 2.711 \text{ Kg/d}$

Para invierno: $(TSS)_w = 1.571 \text{ Kg/d}$

Paso 17 Se calcula la concentración de alimentación combinada

$$DBO_o = \frac{DBO_F + r \cdot DBO_e}{(1+r)} \quad [2.12]$$

Para verano: $(DBO_e = 15.60 \text{ mg/L})$

$$DBO_o = 164.25 \text{ mg/L}$$

Para Invierno: $(DBO_e = 20.46 \text{ mg/L})$

$$\text{DBO}_0 = 165.58 \text{ mg/L}$$

$$X_{V0} = \frac{X_{VF} + r \cdot X_{Vu}}{(1+r)} \quad [2.13]$$

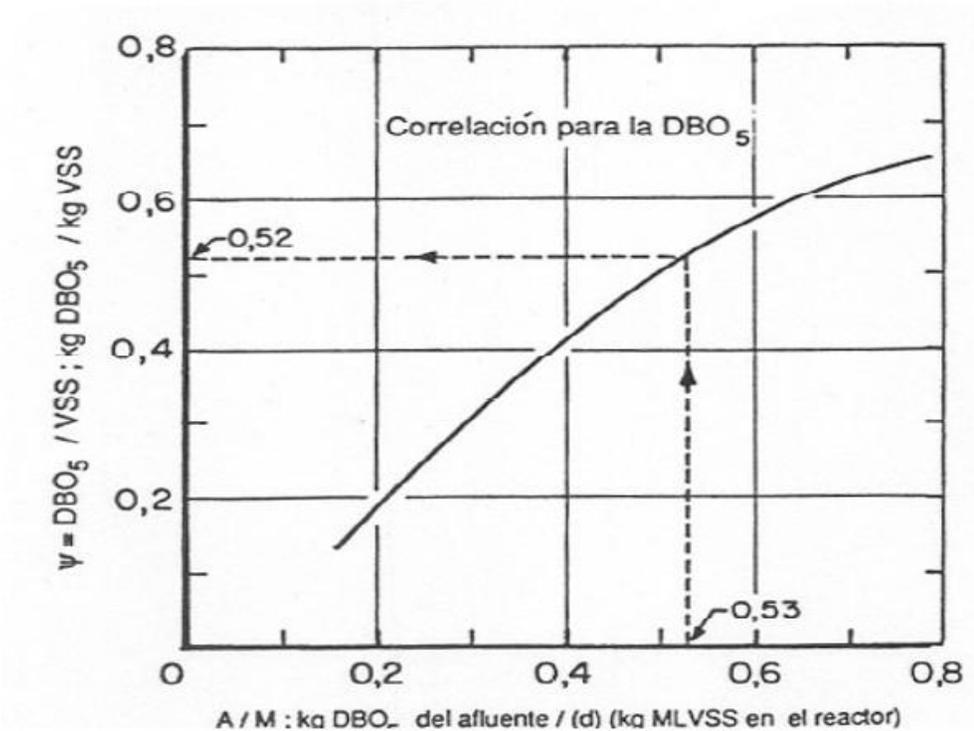
Donde $X_{VF} \approx 0$ y $X_{Vu} = 11000 \text{ mg/L}$

$$X_{V0} = 3000 \text{ mg/L}$$

Paso 18 Para finalizar se evalúa la DBO_5 Total final del efluente:

$$\text{DBO}_{5\text{Total}} = \text{DBO}_e + \psi \cdot X_{Ve} \quad [2.14]$$

Figura 27 Gráfica de relación ψ Vrs. A/M



Fuente: Ralmaho (1996 p. 332)

Interpolando en la grafica anterior se puede observar que para un valor $A/M = 0.31 \text{ d}^{-1}$ el valor de $\psi \approx 0.30$.

Conociendo los valores anteriores y sabiendo que $X_{Ve} = 30 \text{ mg/L}$ se tiene:

Para verano: ($\text{DBO}_e = 15.60 \text{ mg/L}$)

$$\text{DBO}_{5\text{Total}} = 24.60 \text{ mg/L}$$

Para Invierno: ($\text{DBO}_e = 20.46 \text{ mg/L}$)

$$\text{DBO}_{5\text{Total}} = 29.46 \text{ mg/L}$$

Paso 19 Cálculo del volumen del reactor con recirculación:

$$V = t_h \cdot Q_o \quad [2.15]$$

Donde $Q_o = 93.78 \text{ m}^3/\text{d}$ y $t_h = 4.18 \text{ h}$ ó lo que es igual 0.174 d . Sustituyendo se obtiene:

$$V = 16.33 \text{ m}^3$$

Paso 20 Cálculo de la edad de fango:

$$\theta = \frac{V \cdot X_{Va}}{Q_w \cdot X_{Vu} + Q_e \cdot X_{Ve}} \quad [1.36]$$

Conociendo que $X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$, $X_{Vu} = 11000 \text{ mg/L}$, $X_{Ve} = 30 \text{ mg/L}$ y tomando un valor medio de las condiciones de verano e invierno $Q_w = 0.16 \text{ m}^3/\text{d}$. Se tiene:

$$\theta = 12.89 \text{ d.}$$

Paso 21 Cálculo de la carga volumétrica:

$$Cv = \frac{DBO_o \cdot Q_o}{V} \quad [2.16]$$

Conociendo que $Q_o = 93.78 \text{ m}^3/\text{d}$ y que $V = 16,330 \text{ L/d}$, sustituyendo para las condiciones de verano e invierno se obtiene lo siguiente:

Verano ($DBO_o = 164.25 \text{ mg/L}$)

$$Cv = 0.94 \text{ Kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{d}$$

Invierno ($DBO_o = 165.58 \text{ mg/L}$)

$$Cv = 0.95 \text{ Kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{d}$$

Estos valores se encuentran comprendidos dentro del rango 0.8 – 1.8 aceptable para un reactor biológico (según el proceso de fangos activados)⁶²

Ahora se calcula la eficiencia del proceso:

2 Basado en el DBO soluble (verano)

$$E = \frac{DBO_F - DBO_e}{DBO_F} \times 100 \quad [2.17]$$

Sabiendo que $DBO_F = 220 \text{ mg/L}$ y $DBO_e = 15.60 \text{ mg/L}$

$$E = 92.90 \%$$

⁶² Hernández Lehmann, A. (1997, pág. 57)

3 Basado en el DBO_{5Total} (verano)

$$E = \frac{DBO_F - DBO_e}{DBO_F} \times 100$$

Donde $DB_{5Total e} = 24.60 \text{ mg/L}$

$$E = 88.88 \%$$

3 REITERACIÓN DE CÁLCULOS

En este apartado se realiza una reiteración de cálculos para verificar los resultados obtenidos en los capítulos 1 y 2 del presente anexo, estas reiteraciones se basan en lo expuesto en el “El manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales” de Hernández L., Aurelio y en lo expuesto por Metcalf & Eddy en “Ingeniería de aguas residuales”, y se reiteran los términos más importantes.

3.1 Reactor biológico

3.1.1 Volumen de la cuba de aireación:

$$V = \frac{Q_F \cdot Y \cdot \theta \cdot (DBO_F - DBO_e)}{X_{Va} \cdot (1 + \theta \cdot k_d)} \quad [3.1]$$

Donde:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBO}_r$$

$$\theta = 12.89 \text{ d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L}$$

$$X_{Va} = 3000 \text{ mg/L}$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

$$V = 17.66 \text{ m}^3$$

3.1.2 Comprobación de la carga másica:

$$C_m = A/M = \frac{DBO_F \cdot Q_F}{X_{Va} \cdot V} \quad [3.2]$$

$$C_m = 0.28 \frac{Kg DBO_5}{Kg MLVSS \cdot d}$$

El valor se encuentra comprendido en el rango de los valores recomendados para un proceso de mezcla completa (0.2 a 0.4 Kg DBO₅/KgVSS.d)⁶³

3.1.3 Tiempo de retención hidráulico:

$$T_h = \frac{V}{Q_F} \quad [1.5]$$

Sustituyendo el Q_F y V encontrado con anterioridad se tiene que Th = 0.259 d = 6.20 h.

3.1.4 Caudal de purga de lodos

$$Q_W = \frac{P_{SS} + P_x - Q_F \cdot X_{Ve}}{(X_{Vu} - X_{Ve})} \quad [3.3]$$

Donde:

P_{SS}: Carga de sólidos en suspensión no metabolizados del influente [KgSS/d]

P_x: Producción de microorganismos en el lodo activo [KgSS/d]

Cada término se calcula de la siguiente manera:

$$P_{SS} = Q_F \cdot \gamma \cdot SSo \quad [3.4]$$

Donde:

γ: Fracción de los sólidos en suspensión del influente que supone el material no biodegradable. Según experiencias previas en plantas de tratamiento

⁶³ Hernández, L., Aurelio (1997, pág. 65)

en funcionamiento, para aguas residuales urbanas este valor puede ser 0.50^{64} y considerando las características relativamente similares que estas tienen con las aguas residuales domésticas, en este cálculo se adoptará este valor.

SSo: Concentración de sólidos en suspensión en el influente [KgSS/m³]

$$P_x = \frac{Y \cdot Q_F \cdot (DBO_F - DBO_e)}{(1 + \theta \cdot k_d)} \times 1.25 \quad [3.5]$$

Donde 1.25 es el factor de conversión de VSS a TSS.

En cálculos anteriores se había considerado que X_{VF} era prácticamente despreciable por la concentración de microorganismos en el reactor, sin embargo; para el cálculo de la ecuación 3.4 se utilizará el valor de partida de la tabla 1.2 sección 1.3 de este anexo.

Con los siguientes datos se pueden calcular P_{SS} y P_x

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d} = 68,200 \text{ L/d}$$

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBO}_r$$

$$SS_o = 165 \text{ mg/L} = 165 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$\theta = 12.89 \text{ d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L} = 220 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L} = 15 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

$$P_{SS} = 5.63 \text{ KgSS/d}$$

$$P_x = 3.94 \text{ KgSS/d}$$

⁶⁴ Perales, J. Procesos biológicos de cultivo en suspensión aerobio. Pág. 14

Por lo tanto, con estos valores, se sustituye el caudal del afluente en [L/d] y sabiendo que $X_{VU} = 11,000 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$ y $X_{Ve} = 30 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$ se tiene:

$$Q_w = 0.72 \text{ m}^3/\text{d}$$

Entonces la cantidad real de lodos a purgar será:

$$P_w = Q_w \cdot X_{VU} = 7.92 \text{ KgSS/d}$$

3.1.5 Caudal de recirculación:

$$Q_r = \frac{Q_F(X_{Ve} - X'_{Va}) + Q_w \cdot (X_{Vu} - X_{Ve})}{(X'_{Va} - X_{Vu})} \quad [3.6]$$

Donde:

X'_{Va} : es la concentración de sólidos en suspensión en el licor mixto KgSS/m^3

Considerando que en la endogénesis que 1 gr de masa activa el 20% corresponde a la generación de residuos no degradables y el 80% a la oxidación completa. Por tanto:

$$X'_{Va} = 0.80X_{Va} = 2400 \text{ mg/L}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.6 los siguientes valores se obtiene:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$X_{Ve} = 30 \text{ mg/L}$$

$$Q_w = 0.72 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$X_{Vu} = 11,000 \text{ mg/L}$$

$$Q_r = 20.23 \text{ m}^3/\text{d}$$

Y la razón de recirculación vendrá dada por:

$$r = \frac{Q_r}{Q_F} = 0.30 \quad [3.7]$$

3.1.6 Necesidad teórica de oxígeno:

$$NO_T = NO_{\text{Síntesis}} + NO_{\text{Endogénesis}} \quad [3.8]$$

Donde:

$$NO_{\text{Síntesis}} = a' \cdot Q_F (DBO_F - DBO_e) \quad [3.9]$$

$$a' = 0.050 + 0.01 \cdot \theta \quad \text{si } \theta \leq 12 \text{ d} \quad [3.10]$$

$$a' = 0.62 \text{ KgO}_2/\text{KgDBO}_5 \quad \text{si } \theta > 12 \text{ d}$$

$$NO_{\text{Endogénesis}} = \lambda \cdot Y \cdot Q_F \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \theta \cdot k_d}\right] \cdot 1.42 \quad [3.11]$$

Donde:

λ : Fracción de Microorganismos biodegradables [$\text{KgSSV}_{\text{biodegradable}}/\text{KgSSV}$]

1.42 = Cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de microorganismos [$\text{KgO}_2/\text{KgSSV}$]

Conociendo que:

$$\theta = 12.89 \text{ d}$$

$$a' = 0.62 \text{ KgO}_2/\text{KgDBO}_5$$

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d} = 68,200 \text{ L/d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L} = 220 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L} = 15 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$\lambda = 0.65$$

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBO}_r$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

Sustituyendo se tiene:

$$NO_{\text{Síntesis}} = 8.67 \text{ KgO}^2/\text{d}$$

$$NO_{\text{Endogénesis}} = 2.65 \text{ KgO}^2/\text{d}$$

Entonces:

$$NO_T = 11.32 \text{ KgO}^2/\text{d}$$

3.1.7 Necesidades reales de oxígeno:

$$NO_R = \frac{NO_T}{K_T} \quad [3.12]$$

Donde K = Capacidad de transferencia de oxígeno del sistema de aireación.

$$K_{\text{Total}} = K_{T1} \cdot K_{T2} \cdot K_{T3} \quad [3.13]$$

Calculo de coeficientes:

a) K_{T1} : La aportación de oxígeno es proporcional al déficit de saturación.

$$K_{T1} = \frac{C'_s - C_x}{C_s - C_o} \quad [3.13]$$

Donde:

C_s = Concentración de saturación de oxígeno en condiciones normalizadas (agua limpia, 10°C, 1 atm.); 11.33 mg/L. (ver tabla 3.1)

C_0 = Concentración media en oxígeno al comienzo del ensayo normalizado (0 mg/L)

C'_S = Concentración de saturación en el licor mixto a una temperatura T

C_x = Concentración media de oxígeno en el licor mixto (2 mg/L)⁶⁵

Para obtener el valor de C'_S se aplica la siguiente ecuación:

$$C'_S = C_0 \cdot \beta \cdot C_P \cdot C_A \quad [3.14]$$

En condiciones reales hay que efectuar tres correcciones:

- 1- β Tiene en cuenta la salinidad y los sólidos en suspensión en el licor mixto ($\beta=0.98$ para salinidades <3g/L)
- 2- C_P se consideran las variaciones de presión debido a la altitud:

$$C_P = 1 - 0.111 \cdot h$$

Donde h = altitud en miles de metros (En este caso se considerará que h = 0)

$$C_P = 1$$

- 3- C_A que tiene en cuenta la altura de agua en el tanque de aireación:
En sistemas de aireación por turbinas de superficie $C_A = 1$, para sistemas por difusores tenemos que:

$$C_A = \frac{10.33 + 0.283 p}{10.33} \quad [3.15]$$

⁶⁵ Perales, J. Procesos biológicos de cultivo en suspensión aerobio. Pág. 20.

Donde:

p = profundidad del tanque (normalmente > 3 m. para difusores). En este caso $p = 3.5$ m para la cuba de aireación ya que anteriormente se había considerado una profundidad de 3m para el Tanque del MBR. Sustituyendo se tiene:

$$C_A = 1.10$$

- 4- En función de la Temperatura se calcula C^o_s con los valores de la siguiente tabla.

Tabla XXVI Valores de C_s en función de la Temperatura T

T(°C)	C_s (mg/l)	T(°C)	C_s (mg/l)
1	14,23	16	9,95
2	13,84	17	9,74
3	13,48	18	9,54
4	13,13	19	9,35
5	12,8	20	9,17
6	12,48	21	8,99
7	12,17	22	8,83
8	11,87	23	8,68
9	11,59	24	8,53
10	11,33	25	8,38
11	11,08	26	8,22
12	10,83	27	9,07
13	10,6	28	7,92
14	10,37	29	7,77
15	10,15	30	7,63

Fuente: González, L. (Septiembre 2006, pág. 166)

La temperatura a utilizar será $T = 19.69^\circ\text{C}$ como se había calculado tanto en el proceso de MBR como en el cálculo de la cuba de aireación.

Interpolando entre 19 y 20 °C se tiene que $C^0_s = 9.22$ mg/L para una temperatura de 19.69°C e y representa la concentración de saturación de oxígeno en agua limpia a presión atmosférica y Temperatura igual a la del licor mixto.

En resumen:

$$\beta = 0.98$$

$$C_P = 1$$

$$C_A = 1.10$$

$$C^0_s = 9.22 \text{ mg/L}$$

Una vez conocido estos factores ya se puede calcular C'_s sustituyéndolos en la ecuación 3.14.

$$C'_s = 9.94 \text{ mg/L}$$

Ahora sustituyendo $C'_s = 9.94$ mg/L; $C_x = 2$ mg/L y $C_s = 11.33$ mg/L se tiene:

$$K_{T1} = 0.70$$

b) K_{T2} : Tiene en cuenta la velocidad de la disolución de oxígeno en función de la temperatura. Se calcula:

$$K_{T2} = 1.024^{(T-10)} \quad \mathbf{[3.16]}$$

Conociendo que $T = 19.69^\circ\text{C}$ y sustituyendo se tiene:

$$K_{T2} = 1.26$$

c) K_{T3} : Considera la influencia que tienen los siguientes factores en la velocidad de transferencia de oxígeno. de los cuales depende la velocidad de disolución del oxígeno.

- La concentración de sólidos en suspensión del licor mixto
- El tipo de sistema de aireación.

$$K_{T3} = \frac{\text{Capacidad de transferencia de oxígeno en el licor del reactor}}{\text{Capacidad del oxígeno en agua limpia}}$$

Este factor es uno de los valores más difíciles de encontrar en el cálculo de la aireación por lo que se pueden utilizar los siguientes valores:

Tabla XXVII Valores del coeficiente K_{T3} para diferentes sistemas de aireación

Sistema de aireación	K_{T3}
Aire con burbuja fina	
Carga media sin nitrificación	0.55
Carga baja con nitrificación	0.65
Aire con difusores estáticos	0.80
Turbina de aireación	0.90
Aire con burbuja gruesa	0.90

Fuente: Hernández Lehmann, A. (1997, pág. 62)

En este caso se optará por el sistema de aireación de burbuja fina sin nitrificación por tanto:

$$K_{T3} = 0.55$$

Ya teniendo las 3 constantes $K_{T1} = 0.70$; $K_{T2} = 1.26$ y $K_{T3} = 0.55$ se tiene:

$$K_T = 0.49$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.12 y sabiendo que $NO_T = 11.32 \text{ KgO}^2/\text{d}$ se tiene:
 $NO_R = 23.10 \text{ KgO}^2/\text{d}$

3.1.8 Potencia de aireación

El caudal de aire necesario para satisfacer las Necesidades reales de oxígeno calculada para los difusores porosos (de burbuja fina) es:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{NO_{\text{Real}}}{K.Ef.} \quad [3.17]$$

Donde:

K: KgO_2/m^3 del reactor en condiciones normales. En este caso se adoptará un valor de 0.3^{66} .

Ef: La eficiencia del difusor. La eficiencia estándar de transferencia de oxígeno para difusores de tubo rígido está comprendida entre 28 – 32 % por lo que se adoptará un valor de 30 %. Según lo muestra la siguiente tabla.

⁶⁶ Hernández, A. (1997, pág. 63)

Tabla XXVIII Eficacia de transferencia de oxígeno de varios tipos de difusores.

Tipo de Aireador	Q_{aire} (m ³ /h.difusor)	Eficiencia.
Difusores porosos		
Domos cerámicos	0.85 – 4.24	27 - 39
Discos cerámicos	0.68 – 5.77	25 – 40
Difusor de tubo rígido	4.07 – 6.8	28 – 32
Difusor de tubo no rígido	1.7 – 11.88	26 – 36
Difusores no porosos		
	7.13 – 76.41	10 – 13
Otros sistemas.		
	91.69 – 509.4	15 - 24

Fuente: Perales, J. Procesos biológicos de cultivo en suspensión aerobio. Pág. 16.

Sustituyendo los valores anteriores y sabiendo que $NO_R = 23.10 \text{ KgO}_2/\text{d}$ se tiene:

$$Q_{\text{aire}} = 256.67 \text{ m}^3/\text{d}$$

Numero de difusores:

$$N_{\text{difusores}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{unitario}} / \text{difusor}} \quad [3.18]$$

De la tabla anterior, adoptando un valor de $5.5 \text{ m}^3/\text{difusor} \cdot \text{h}$, multiplicando este valor por 24h, se tiene $Q_{\text{unitario}} = 132 \text{ m}^3/\text{difusor}$ en un día. Sustituyendo este valor en la ecuación anterior se tiene:

$$N_{\text{difusores}} = 1.94 \approx 2 \text{ difusores.}$$

Ahora se calcula la capacidad de mezcla para este número de difusores:

$$C_{\text{Mezcla}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{Tanque}}} \quad [3.19]$$

Sustituyendo $Q_{\text{aire}} = 256.67 \text{ m}^3/\text{d}$ y $V_{\text{tanque}} = 17.66 \text{ m}^3$ se tiene que:

$$C_{\text{Mezcla}} = 0.01009 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{min} = 10.09 \text{ m}^3/(10^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{min})$$

Ahora se calcula la potencia de aireación, para sistemas de difusión la potencia se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{\text{aireación}} = \frac{0.227 \cdot Q_{\text{aire}}}{1.04} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right) \cdot C \quad [3.20]$$

Donde:

P_2 : P_1 + profundidad de la cuba + pérdida difusores (profundidad = 3.50 m, y se asume una pérdida de los difusores de 1m) $P_2 = 14.83$

P_1 : 10.33 m.c.a

Q_{aire} : Caudal de aire en [m³/h] por tanto = 10.69 m³/h

C : Coeficiente de seguridad (se asumirá un 10 %) entonces $C = 1.10$

Sustituyendo estos valores se tiene:

$$P_{\text{aireación}} = 0.28 C v = 0.21 \text{ Kw}$$

3.1.9 Dimensiones de la cuba de aireación

Considerando que su volumen es de 17.66 m³ las dimensiones de la cuba de aireación son las siguientes:

No. De difusores: 2

Alto = 3.50 m

Ancho = 2 m

Largo = 3 m

Volumen = 21 m³

$$C_{p \text{ aireación}} = 2 \text{ difusores } (5.50 \text{ m}^3/\text{difusor.h})(24\text{h/d})$$

$$C_p = 264 \text{ m}^3 \text{ aire/d}$$

3.2 Biorreactor de membrana sumergida

3.2.1 Volumen de la cuba de aireación

Aunque el volumen de la cuba de aireación ya fue calculada y reiterado su valor, es importante mencionar que el volumen y dimensiones de la membrana es quien define si el valor calculado es correcto, esto se debe a que el tanque de la membrana debe ir sumergido dentro de la cuba de aireación.

$$V_{\text{Tanque MBR}} \leq V_{\text{Cuba de aireación}}$$

$$7. \text{ m}^3 \leq 21 \text{ m}^3$$

Dado que las condiciones se cumplen, el volumen de la cuba de aireación será el calculado con anterioridad.

De lo calculado en la sección 1.8 de este anexo se tienen los siguientes datos:

$$V \text{ Tanque} = 6 \text{ m}^3$$

$$Q_F' = 68.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{TRH} = 2.11 \text{ h}$$

$$C_m = 0.17 \text{ Kg DBO/KgSS.d}$$

$$Q_w = 0.22 \text{ m}^3/\text{d} \text{ (Valor medio de condiciones de verano e invierno)}$$

3.2.2 Necesidad teórica de oxígeno

$$NO_T = NO_{\text{Síntesis}} + NO_{\text{Endogénesis}} \quad [3.8]$$

Donde:

$$NO_{\text{Síntesis}} = a' \cdot Q_F (DBO_F - DBO_e) \quad [3.9]$$

Aquí se utilizará un valor $a' = 0.62 \text{ KgO}_2/\text{KgDBO}_5$ ya que la edad de fangos calculada en la sección 1.8 para el MBR es $\theta = 27.28 \text{ d} > 12 \text{ d}$. Conociendo los siguientes valores y sustituyéndolos se tiene:

$$Q_F = 68.2 \text{ m}^3/\text{d} = 68,200 \text{ L/d}$$

$$DBO_F = 220 \text{ mg/L} = 220 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$DBO_e = 15 \text{ mg/L} = 15 \times 10^{-6} \text{ Kg/L}$$

$$NO_{\text{Síntesis}} = 8.67 \text{ KgO}_2/\text{d}$$

$$NO_{\text{Endogénesis}} = \lambda \cdot Y \cdot Q_F \cdot (DBO_F - DBO_e) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \theta \cdot k_d} \right] \quad 1.42 \cdot 4.57 \quad [3.11]$$

A diferencia el reactor biológico, en este caso se incluye el factor 4.57 que hace referencia a la demanda de oxígeno necesario para la oxidación completa del nitrógeno, ya que al operar con edades de fango elevada, el sistema puede nitrificar convirtiendo el amoníaco en nitrato y consumiendo oxígeno adicional.

Conociendo los datos anteriores y los siguientes se puede calcular NO

Endogénesis·

$$\lambda = 0.65$$

$$Y = 0,5 \text{ Kg MLVSS/Kg DBOr}$$

$$K_d = 0.0544 \text{ d}^{-1}$$

$$NO_{\text{Endogénesis}} = 17.56 \text{ KgO}^2/\text{d}$$

Entonces: $NO_T = 26.23 \text{ KgO}^2/\text{d}$

3.2.3 Necesidades reales de Oxígeno:

El procedimiento para calcular la necesidad real de oxígeno es el mismo que en el caso de la cuba de aireación.

$$NO_R = \frac{NO_T}{K_T} \quad [3.12]$$

Donde

$$K_{\text{Total}} = K_{T1} \cdot K_{T2} \cdot K_{T3} \quad [3.13]$$

Calculo de coeficientes:

$$a) \quad K_{T1} = \frac{C'_s - C_x}{C_s - C_0} \quad [3.13]$$

Donde:

$C_s = 11.33 \text{ mg/L}$ (agua limpia, 10°C, 1 atm.). (Ver tabla 3.1 de este anexo)

$C_0 = 0 \text{ mg/L}$

$C'_s = ?$

$C_x = 3 \text{ mg/L}$ (con nitrificación)

Para obtener el valor de C'_s se aplica la siguiente ecuación:

$$C'_s = C_s^0 \cdot \beta \cdot C_P \cdot C_A \quad [3.14]$$

Donde:

$$\beta = 0.98$$

$$C_P = 1$$

$$C_A = \frac{10.33 + 0.283 p}{10.33} \quad [3.15]$$

Donde:

p = profundidad del tanque (en este caso 3 m)

$$C_A = 1.08$$

$C_s^0 = 9.54 \text{ mg/L}$ para $T = 18^\circ\text{C}$ (Ver tabla 3.1 anexos)

Una vez conocido estos factores ya se puede calcular C'_s sustituyéndolos en la ecuación 3.14

$$C'_s = 10.10 \text{ mg/L}$$

Ahora sustituyendo $C'_s = 10.10 \text{ mg/L}$; $C_x = 3 \text{ mg/L}$ y $C_s = 11.33 \text{ mg/L}$ se tiene:

$$K_{T1} = 0.63$$

$$\text{b) } K_{T2} = 1.024^{(T-10)} \quad [3.16]$$

Conociendo que $T = 18^\circ\text{C}$ y sustituyendo se tiene:

$$K_{T2} = 1.21$$

$$\text{c) } K_{T3}: \text{ Sistema de aireación}$$

Se ha comentado previamente que para el MBR se seleccionaría un sistema de un sistema de aireación mediante difusores de burbuja gruesa ya que este tipo de aireación proporciona una limpieza continua a la membrana que permitirá reducir el ensuciamiento, entonces:

$$K_{T3} = 0.90 \text{ (Ver tabla 3.2 de este anexo)}$$

Una vez encontradas las constantes se sustituyen en la ecuación 3.13 en donde:

$$K_T = 0.69$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.12 y sabiendo que $NO_T = 26.23 \text{ KgO}^2/\text{d}$ se tiene:

$$NO_{Real} = 38.01 \text{ KgO}^2/\text{d}$$

3.2.4 Potencia de aireación

$$Q_{aire} = \frac{NO_{Real}}{K.Ef.} \quad [3.17]$$

Como ya se había definido en el cálculo del caudal de aireación para el reactor:

K: 0.3

Ef: 30 %.

Sustituyendo estos valores se tiene:

$$Q_{aire} = 422.3 \text{ m}^3/\text{d}$$

Numero de difusores:

$$N_{\text{difusores}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{unitario /difusor}}} \quad [3.18]$$

Conociendo Q_{aire} y adoptando un valor de $5.5 \text{ m}^3/\text{difusor} \cdot \text{h}$, multiplicando este valor por 24h, se tiene $Q_{\text{unitario}} = 132 \text{ m}^3/\text{difusor}$ en un día. Sustituyendo este valor en la ecuación anterior se tiene:

$$N_{\text{difusores}} = 3.20 \approx 4 \text{ difusores.}$$

Por último se calcula la potencia de aireación requerida, para difusores de burbuja gruesa se utilizará la ecuación 3.20.

$$P_{\text{aireación}} = \frac{0.227 \cdot Q_{\text{aire}}}{1.04} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right) \cdot C$$

Donde:

P_1 : 10.33 m.c.a

$P_2 = 14.33$ (P_1 + profundidad del tanque MBR = 3 m + perdida de difusores = 1m)

Q_{aire} : [m³/h] = 17.60 m³/h

$C = 1.10$ (factor de seguridad)

Sustituyendo estos valores se tiene:

$$P_{\text{aireación}} = 0.41 \text{ Cv} = 0.30 \text{ Kw}$$

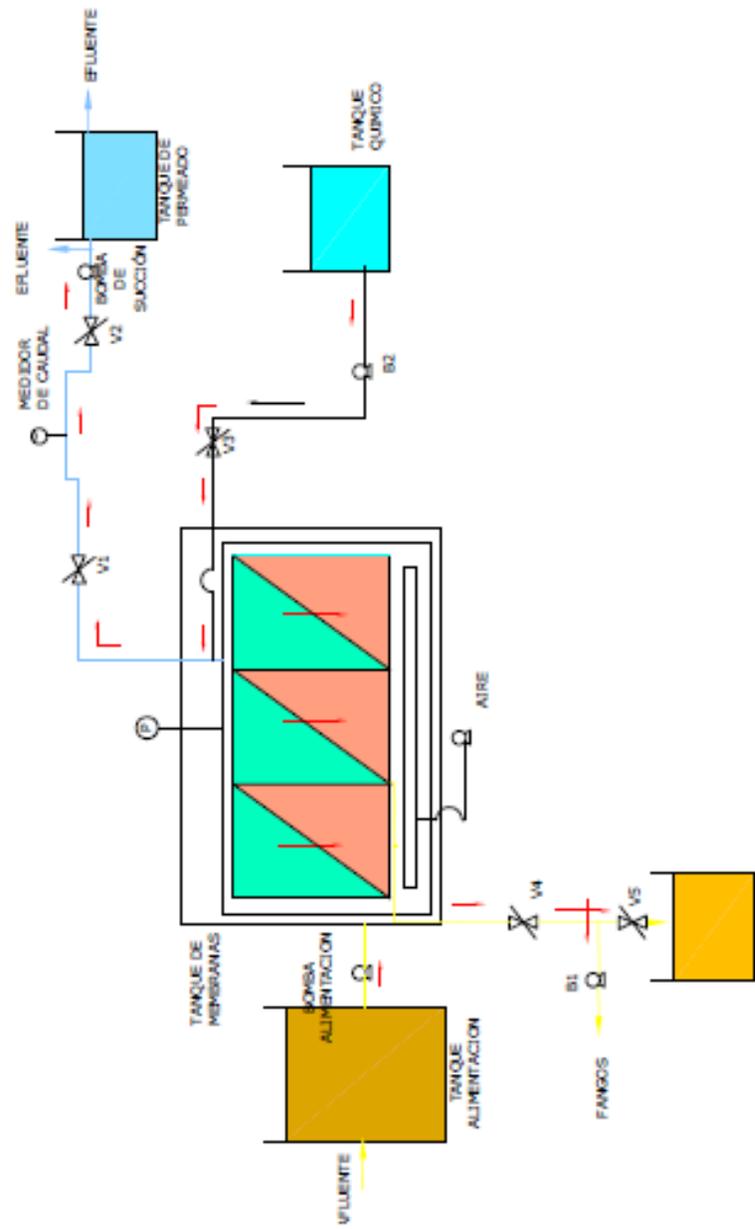


DIAGRAMA DE FLUJO DE UN MBR DURANTE UN PROCESO DE LIMPIEZA QUÍMICA

SIN ESCALA

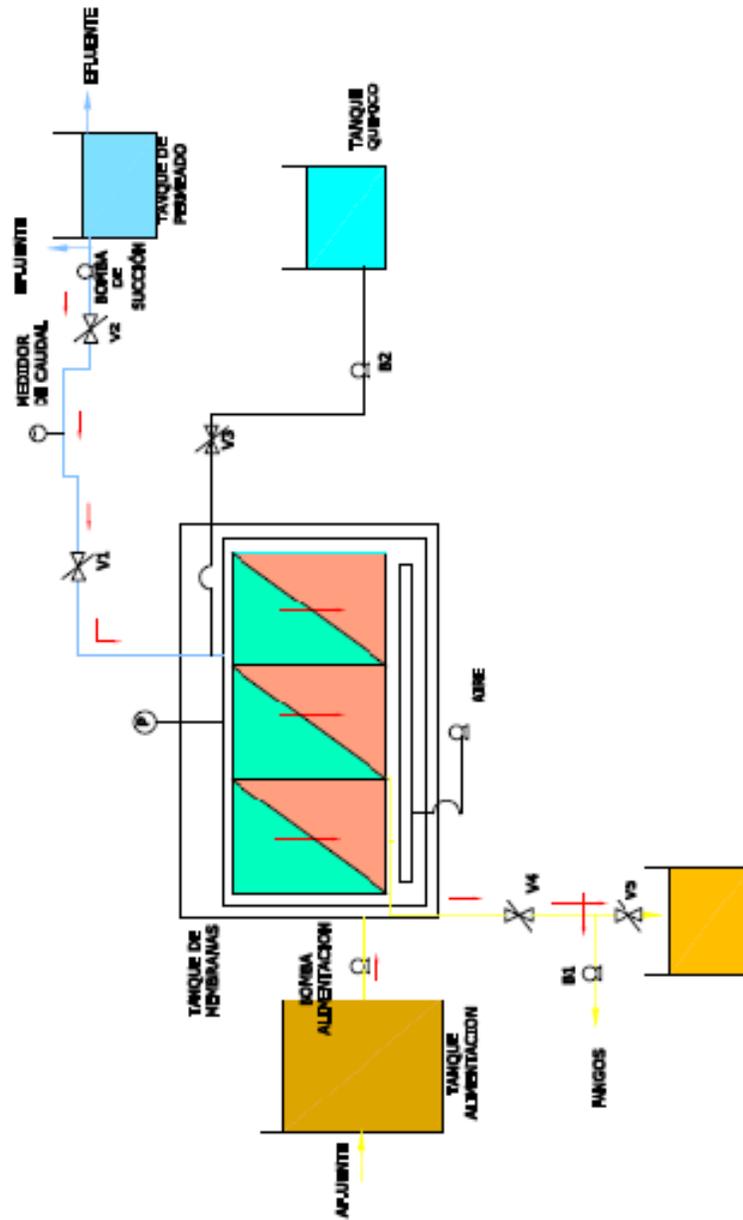
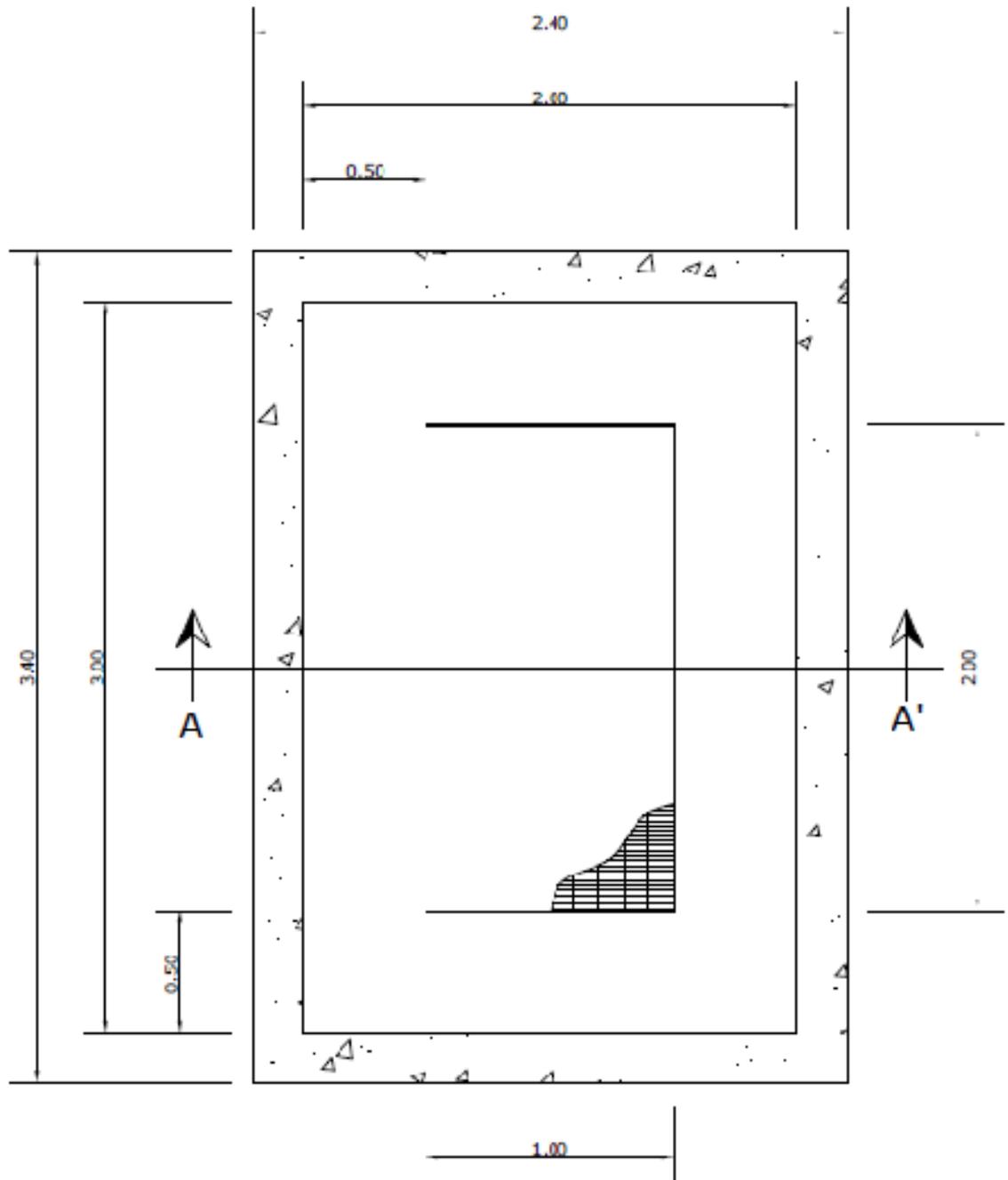


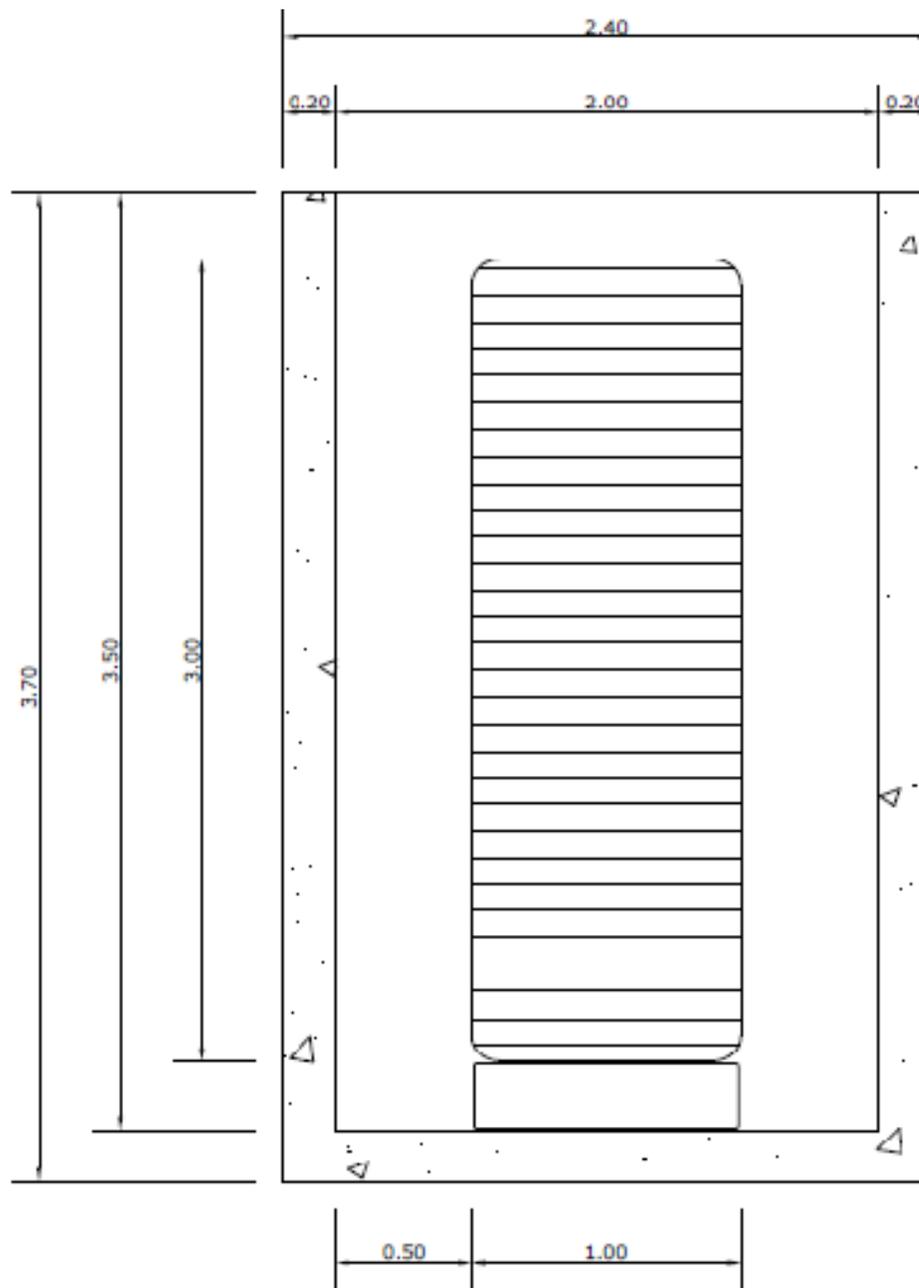
DIAGRAMA DE FLUJO DE UN MBR SUMERGIDO EN EL PROCESO DE RETROLAVADO

SIN ESCALA



DETALLE BIORREACTOR DE MEMBRANA

ESCALA: 1/2E



SECCIÓN A-A'
 ESCALA: 1/30