

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ACONDICIONAMIENTO DE UNA
PLANTA PILOTO TIPO
BIORREACTOR DE MEMBRANAS
CON EFLUENTES PAPELEROS**

**TRABAJO ACADEMICO PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO**

**Bachiller:
TONY RENSO NEIRA CÓRDOVA**

**Asesor:
Ing. LUIS CARRASCO VENEGAS**

Callao, noviembre del 2017

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLA	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCION.....	7
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
1.1. Situación problemática	9
1.2. Formulación del problema	9
1.2.1. Problema general.....	9
1.2.2. Problemas específicos.....	10
1.3. Objetivos de la investigación	10
1.3.1. Objetivo general.....	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación y propósito	11
1.4.1. Consideraciones técnicas – operacionales de un sistema MBR.....	11
1.4.2. Cumplimiento de política ambiental peruana.....	13
1.4.3. Eficiencia operativa	14
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Antecedentes de la investigación	16
2.1.1. Estudios previos - Antecedentes	16
2.2. Referencial teórico conceptual.....	19
2.2.1. Tratamiento de aguas residuales.....	19
2.2.2. Membrane Biological Reactor (MBR)	20
2.2.3. Carga hidráulica del sistema.....	24
2.2.4. Presión transmembrana.....	25
2.2.5. Permeabilidad	25
2.2.6. Aireación.....	26
2.2.7. Concentración del licor de mezcla	26
2.2.8. Edad de lodos	27
2.2.9. Planta Piloto	27
CAPÍTULO III VARIABLES E HIPÓTESIS	32
3.1. Variables de la investigación.....	32
3.1.1. Variables dependientes.....	32
3.1.2. Variables independientes	32
3.2. Operacionalización de las variables	33
3.3. Hipótesis general	33
CAPÍTULO IV DISEÑO METODOLÓGICO.....	34

4.1.	Tipo de la investigación	34
4.2.	Diseño de la investigación.....	34
4.3.	Población y muestra.....	35
4.4.	Participantes o sujetos del estudio.....	35
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	36
4.6.	Procedimientos de recolección de datos	37
4.7.	Plan de trabajo de campo	37
4.8.	Cálculos	39
CAPÍTULO V RESULTADOS		40
4.1.	Caracterización del afluente	40
4.1.1.	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 Afluente	40
4.1.2.	Demanda Química de Oxígeno DQO Afluente	41
4.1.3.	Sólidos Suspedidos Totales SST Afluente	41
4.1.4.	Turbidez _{Afluente}	42
4.1.5.	Temperatura T Afluente	42
4.1.6.	Potencial de Hidrógeno pH Afluente	43
4.1.7.	Nitrógeno Total NT Afluente	43
4.1.8.	Fósforo total FT Afluente	44
4.2.	Evaluación de los parámetros de control	44
4.2.1.	Presión Transmembrana.....	44
4.2.2.	Aireación.....	44
4.2.3.	Sólidos Suspendidos	45
4.3.	Caracterización del efluente	46
4.3.1.	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 Efluente	46
4.3.2.	Demanda Química de Oxígeno DQO Efluente	46
4.3.3.	Sólidos Suspedidos Totales SST Efluente	47
4.3.4.	Turbidez _{Efluente}	47
4.3.5.	Temperatura T Efluente.....	48
4.3.6.	Potencial de Hidrógeno pH Efluente	48
4.3.7.	Nitrógeno Total NT Efluente	49
4.3.8.	Fósforo total FT Efluente	49
4.4.	Eficiencia de la planta piloto.....	49
CAPÍTULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS		51
6.1.	Contrastación de los resultados con los objetivos planteados	51
6.2.	Contrastación de resultados con otros estudios similares	52
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES		54
CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES		56
CAPÍTULO IX REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		58
Anexos		60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Capacidad instalada acumulada en m ³ /día de Kubota y Zenon (Judd, 2006)...	17
Figura 2 Diagrama de flujo de un sistema MBR	20
Figura 3 Esquema de la unidad de filtración	21
Figura 4 Diagrama de sistema MBR con membrana externa	22
Figura 5 Sistema MBR con membrana sumergida (a) membrana interna y (b) membrana externa.....	23
Figura 6 Esquema de flujos en la membrana (Fundación Centro Canario del Agua, 2003)	25
Figura 7 Planta piloto MBR (OMC Collareda)	28
Figura 8 Esquema del reactor MBR con membranas sumergidas	29
Figura 9 Módulo de membranas y sus componentes (Manual de Operaciones – OMC Collareda).....	30
Figura 10 Principio de filtración del lodo activado (Manual de Operaciones – OMC Collareda).....	31
Figura 11 Esquema de ubicación del estudio	35
Figura 12 Diagrama de operación de la planta piloto MBR	38
Figura 13 DBO ₅ del afluente.....	40
Figura 14 DQO del afluente	41
Figura 15 Sólidos suspendidos en el afluente	41
Figura 16 Turbidez del afluente.....	42
Figura 17 Temperatura del afluente	42
Figura 18 Potencial de Hidrógeno del afluente	43
Figura 19 Nitrógeno total en el afluente	43
Figura 20 Presión Transmembrana.....	44
Figura 21 Oxígeno disuelto en el licor de mezcla	45
Figura 22 Sólidos suspendidos en el licor de mezcla	45
Figura 23 DBO ₅ en el efluente.....	46
Figura 24 DQO en el efluente	47
Figura 25 Turbidez del efluente.....	47
Figura 26 Temperatura del efluente	48
Figura 27 Potencial de Hidrógeno en el efluente.....	48
Figura 28 Nitrógeno total en el efluente	49

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Operacionalización de variables	33
Tabla 2 Análisis realizados en laboratorio.....	37
Tabla 3 Eficiencia de remoción obtenido	50

RESUMEN

La presente investigación forma parte de un estudio realizado para determinar el acondicionamiento de un Biorreactor de Membranas con efluentes provenientes de una planta papelera en Lima. Se desarrolló en las instalaciones de una planta papelera en el distrito de Puente Piedra, en cuyo laboratorio se realizaron los análisis del estudio.

El presente estudio tiene como objetivo principal acondicionar un sistema MBR a nivel piloto, operando con efluentes papeleros y bajo ciertas condiciones a fin de alcanzar un 98% de remoción de carga orgánica la remoción de carga orgánica.

El acondicionamiento de la planta piloto consistió en mantener una edad de lodo de 30 días, $8,0 \pm 1$ g/L de sólidos suspendidos en el licor de mezcla, 450 L/h de flujo de entrada, un caudal teórico de purga de 170 L/d y la carga hidráulica 20 L/m²h. El modo de trabajo fijado para el sistema fue 9 minutos de operación y 1 minuto de parada. El afluente de la planta piloto provino de un tratamiento primario previo.

Durante la fase de estabilización, el reactor alcanzó 7200 mg/L SSLM y 0.05 Bar de presión transmembrana. Posterior al arranque y estabilización de la planta piloto, bajo las condiciones de operación mencionadas se alcanzó una eficiencia de remoción de 98.8% en demanda bioquímica de Oxígeno, 96.3% en la demanda química de Oxígeno, 99.2% de remoción de sólidos suspendidos totales y 99.8% de remoción de turbidez.

ABSTRACT

The present research is part of a study to determine the conditioning of a Membranas Bioreactor with effluents from a paper mill in Lima. It was developed in the facilities of a paper mill in the district of Puente Piedra, in whose laboratory the analyzes of the study were realized.

The present study has as main objective to condition a MBR system at pilot level, operating with paper effluents and under certain conditions in order to achieve a 98% removal of organic load the removal of organic load.

The conditioning of the pilot plant consisted of maintaining a sludge age of 30 days, 8.0 ± 1 g/L of solids suspended in the mixing liquor, 450 L/h of inlet flow, a theoretical purge flow of 170 L/d and hydraulic load 20 L/m²h. The working mode set for the system was 9 minutes of operation and 1 minute of stop. The tributary of the pilot plant came from a previous primary treatment.

During the stabilization phase, the reactor reached 7200 mg/L SSLM and 0.05 bar of transmembrane pressure. Subsequent to the start-up and stabilization of the pilot plant, under the aforementioned operating conditions 98.8% removal efficiency was achieved in biochemical oxygen demand, 96.3% in chemical oxygen demand, 99.2% removal of total suspended solids and 99.8% % turbidity removal.

INTRODUCCION

Para la fabricación de papel Tissue, ya sea con fibra reciclada o virgen como materia prima o ambas, es necesario emplear una gran cantidad de agua por cada tonelada de papel producido. El agua sirve como medio de transporte a la celulosa durante todas las etapas del destintado y la formación de la hoja de papel. En un proceso de producción de papel con fibra reciclada se emplea mucha más agua que en un proceso basado en fibra virgen. La diferencia se debe a la etapa de destintado de la fibra reciclada. Sin embargo, en ambos casos se genera un agua residual industrial con alta carga orgánica, la cual debe ser tratada fundamentalmente por dos motivos: para ser reutilizada en el proceso de producción de papel y para cumplir con los valores máximos admisibles de vertidos no domésticos. Por ser el Perú un país con gran estrés hídrico, se hace imperante la necesidad de optimizar los consumos de agua fresca en los procesos industriales mediante la reutilización de los efluentes.

La disminución de la cantidad de agua fresca a emplear en el proceso de producción de papel, depende de incrementar la proporción de recirculación del agua tratada al sistema. La reutilización del agua tratada en proceso papelerero depende también de la calidad que alcancen los efluentes luego del tratamiento que se le dé. La calidad de agua a emplear en un proceso papelerero está básicamente regida por la cantidad total de sólidos en suspensión y turbidez. En cuanto al cumplimiento de

los valores máximos admisibles de aguas residuales no domésticas, los parámetros de mayor relevancia son la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno. Podemos resumir que para que los efluentes papeleros puedan ser reutilizados o vertidos deben ser tratados adecuadamente para remover la carga orgánica contenida, siendo los sólidos totales suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno las variables de mayor impacto y relevancia.

La presente investigación tiene la finalidad de evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica medida como los sólidos totales suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno en una planta piloto con el sistema de un biorreactor de membranas, comúnmente conocido como MBR.

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Situación problemática

Se requiere evaluar el desempeño de un sistema de tratamiento MBR con efluentes procedentes de un proceso papelerero, a fin de contar con una alternativa eficaz para el tratamiento de los efluentes y reutilizarlos en el proceso de producción de papel. Los efluentes de un proceso papelerero variarán de planta en planta, de máquina en máquina. Básicamente la variación se debe al tipo y a la calidad de la materia prima empleada, y también por las etapas comprendidas en el proceso de producción de papel. Por ello, se hace indispensable la realización de evaluaciones de desempeño para reconocer las ventajas y desventajas del tratamiento en cuestión. Cabe señalar que los efluentes de cualquier proceso papelerero no siempre cuentan con la cantidad de nutrientes adecuada para un tratamiento biológico. Sin embargo, esto se puede suplir mediante la adición de químicos, los cuales acarrearán un mayor costo que debe también ser evaluado. Tampoco se conocen los parámetros de operación del sistema MBR con efluentes papeleros, por lo que se hace necesaria la medición del desempeño del sistema MBR mediante una prueba piloto.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo acondicionar una planta piloto de tipo MBR con los efluentes procedentes de un proceso papelerero para alcanzar una remoción de 98% de carga orgánica?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿cuáles son las características de los afluentes en la entrada de la planta piloto MBR?
- b) ¿cuáles son los parámetros de las variables de control para la operación de la planta piloto MBR?
- c) ¿cuáles son las características de los efluentes en la salida de la planta piloto MBR?
- d) ¿Cuál es el porcentaje de remoción de carga orgánica alcanzado en la planta piloto MBR?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar las condiciones de operación de una planta piloto tipo MBR con efluentes de un proceso papelerero para alcanzar una remoción de 98% de carga orgánica.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Evaluar las características del afluente, tales como la demanda bioquímica de oxígeno en 5 días, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, turbidez, temperatura, potencial de Hidrógeno, Nitrógeno total y Fósforo total, medidos en la entrada de la planta piloto.

- b) Evaluar las variables de control del sistema, tales como: sólidos suspendidos en el licor de mezcla, presión transmembrana y aireación.
- c) Evaluar las características del efluente, tales como la demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días, demanda química de Oxígeno, sólidos suspendidos totales, turbidez, temperatura, potencial de Hidrógeno, Nitrógeno total y Fósforo total, medidos en la salida de la planta piloto.
- d) Evaluar la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y turbidez.

1.4. Justificación y propósito

La importancia de este estudio radica en las implicancias técnicas, legales, ambientales y económicas que conlleva la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales con un sistema MBR.

1.4.1. Consideraciones técnicas – operacionales de un sistema MBR

Este estudio tiene por finalidad evaluar las condiciones para operar adecuadamente un sistema de tratamiento MBR y ser capaz de alcanzar 98% de remoción de carga orgánica de efluentes papeleros. Los resultados de este estudio brindarán una referencia técnica sobre los requerimientos básicos y variables de control a considerar para una

adecuada operación de este sistema. Debido al mayor control de la calidad de efluentes vertidos no domésticos por parte de las entidades ambientales y empresas prestadoras de servicios, se hace una prioridad para las empresas peruanas el contar con un adecuado sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual garantice mantener en todo momento los Valores Máximos Admisibles de los efluentes no domésticos dentro de los límites permitidos, ya que de no ser cumplidos, quedan expuestos a sanciones, que pueden ir desde multas proporcionales al grado de incumplimiento y flujo vertido hasta el cierre del buzón de descarga de aguas residuales. En la actualidad hay una gran variedad de tecnologías desarrolladas para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, la decisión de cual elegir dependerá, sobre todo para el caso de la empresa privada, que alternativa es la más conveniente para el negocio.

En adición a esto, la conveniencia deberá ser evaluada en función al costo de inversión, costo operativo, costo de mantenimiento, huella, eficiencia requerida y garantía. Debemos tener en consideración que para la empresa privada el objetivo es y será siempre generar mayor rentabilidad, la cual puede crearse a partir de su mayor productividad y de su eficiencia operativa.

Para el caso de implementar un sistema MBR en una empresa papelera, se tendrá un alto costo de inversión inicial, un bajo costo operativo, un alto costo de mantenimiento debido al recambio de membranas que, de ser

bien operadas, pueden alcanzar entre 5 – 6 años de tiempo de recambio. Actualmente, los costos de membrana se han reducido y tienen una tendencia a seguir bajando por la mayor oferta y producción de las mismas. Además, ofrecen una menor huella por ser de diseño compacto y son de mucho menor tamaño en comparación a un sistema convencional. Ofrecen una alta eficiencia de remoción de carga orgánica y brindarán una mayor garantía si y solo si su operación y monitoreo es el adecuado, razón por la cual surge la importancia de realizar el pilotaje del sistema MBR.

1.4.2. Cumplimiento de política ambiental peruana

El agua es materia prima para muchas industrias, como por ejemplo las del rubro textil, minera, alimentaria, siderúrgica, papelera, entre otros. Resultado de estas actividades, el agua cambia su calidad por la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos. En el Perú, la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2013) es la entidad encargada de elaborar la Política, Estrategia y Plan Nacional de Recursos Hídricos, teniendo en cuenta su construcción, desarrollo y ejecución, dentro del marco de la Política Nacional del Ambiente. La ANA ejerce jurisdicción administrativa exclusiva en materia de aguas, desarrollando acciones de administración, fiscalización, control y vigilancia, para asegurar la conservación y protección del agua en cuanto a su cantidad y calidad de los bienes naturales asociados a esta, además, de la infraestructura hidráulica multisectorial, ejerciendo para tal efecto la facultad

sancionadora y coactiva. En lo que refiere a vertidos no domésticos, las empresas deben cumplir lo normado a los *Valores Máximos Admisibles de Efluentes No Domésticos* en el Decreto Supremo N° 001-2015 VIVIENDA y son las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS) las encargadas de fiscalizar su cumplimiento (Mendoza, 2009).

1.4.3. Eficiencia operativa

La industria en el Perú, en lo que respecta a producción de papel y cartón, está mostrando de manera general un crecimiento continuo en los últimos años. En el informe técnico publicado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2013), señala que la rama de artículos de papel y cartón creció 4,46%, debido a la mayor demanda interna de papel higiénico, papel toalla, toallas higiénicas y pañales; sumado a la mayor venta externa de papel higiénico a Chile; etiquetas de toda clase, de papel o cartón, impresas a Guatemala; pañuelos y toallas a Chile, Bolivia y Argentina. De acuerdo al informe, el Perú es uno de los países con menor consumo de papel en América Latina. El principal problema de la industria es su falta de control sobre el precio de la pulpa de papel importada o el bagazo, cuyo precio se fija en función del costo del petróleo. La elevada competencia al interior de la industria y el bajo valor agregado de sus productos hacen que las empresas obtengan reducidos márgenes de utilidad e inclusive pérdidas. Por lo tanto, se hace imperante mejorar los procesos e incrementar la rentabilidad mediante la optimización de las

etapas que generan mayor impacto en cuanto a costos, recursos, mano de obra, volumen, etc. Si bien es cierto que el tratamiento de aguas no es el Core Business de la industria papelera, el volumen de agua utilizado en esta las obliga a tener un adecuado tratamiento de efluentes ya que el consumo de agua puede alcanzar los 80 metros cúbicos para fabricar una tonelada de papel seco. A esto debe agregarse el sobre costo que podrían verse expuestas en caso de una multa por parte de las EPS debido al incumplimiento del reglamento de valores máximos admisibles para vertidos no domésticos. Teniendo en cuenta que los efluentes papeleros pueden alcanzar valores de 3500 y 6000 mg O₂/L de DBO₅ y DQO respectivamente, esto podría representar un pago adicional del 600% adicional sobre el costo por derecho de vertido. Esto conlleva a evaluar el tratamiento que se da a los efluentes papeleros, el cual puede hacerse de manera más eficiente, garantizar el cumplimiento de las regulaciones vigentes e incluso generar ahorro en los costos de producción.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En la actualidad, la implementación de sistemas de tratamiento MBR viene incrementándose, principalmente debido a la alta eficiencia de remoción que alcanzan y a la mayor oferta de las membranas. La implementación de un sistema de tratamiento de efluentes cualquiera que sea, requiere de un estudio a nivel piloto para prever y/o validar las condiciones de diseño y operación, las cuales variarán en mayor o menor medida dependiendo la calidad de los afluentes a tratar y la calidad de los efluentes que se requiera alcanzar.

2.1.1. Estudios previos - Antecedentes

La tecnología de biorreactores de membrana ha sido usada desde los setenta para tratar aguas residuales en EEUU, Japón, Sudáfrica y Europa, pero fue hasta mediados de los noventa que fue aplicada en el tratamiento de agua potable. S. Judd (2006) menciona que los primeros biorreactores de membrana fueron desarrollados comercialmente por Dorr-Oliver a finales de los sesenta (Bemberis, Hubbard, & Leonard, 1971), con aplicación al tratamiento de aguas residuales de buques (Bailey, Bemberis, & Presti, 1971).

De acuerdo a S. Judd (2006), el proceso de tratamiento de aguas residuales con membrana de Dorr-Oliver se basó en membranas de ultrafiltración (UF) de hoja plana (FS) (...) y logró establecer el principio de acoplar un proceso de lodos activados con una membrana para

concentrar simultáneamente la biomasa mientras se genera un producto desinfectado clarificado. Desde finales de los años ochenta hasta principios de los noventa, se produjeron otros importantes desarrollos comerciales en el campo de los sistemas MBR. Zenon Environmental, una empresa formada en 1980, desarrollaba un sistema MBR que finalmente llevó a la introducción del primer proceso de iMBR de ZenoGem a principios de los años noventa. Mientras tanto, el gobierno japonés impulsó un programa para el desarrollo de una iMBR de microfiltración FS (Kubota). Posteriormente se realizaron demostraciones a escala piloto, primero en Hiroshima en 1990 y luego en Sakai-Rinkai en 1992. A finales de 1996, ya existían 60 plantas Kubota instaladas en Japón.

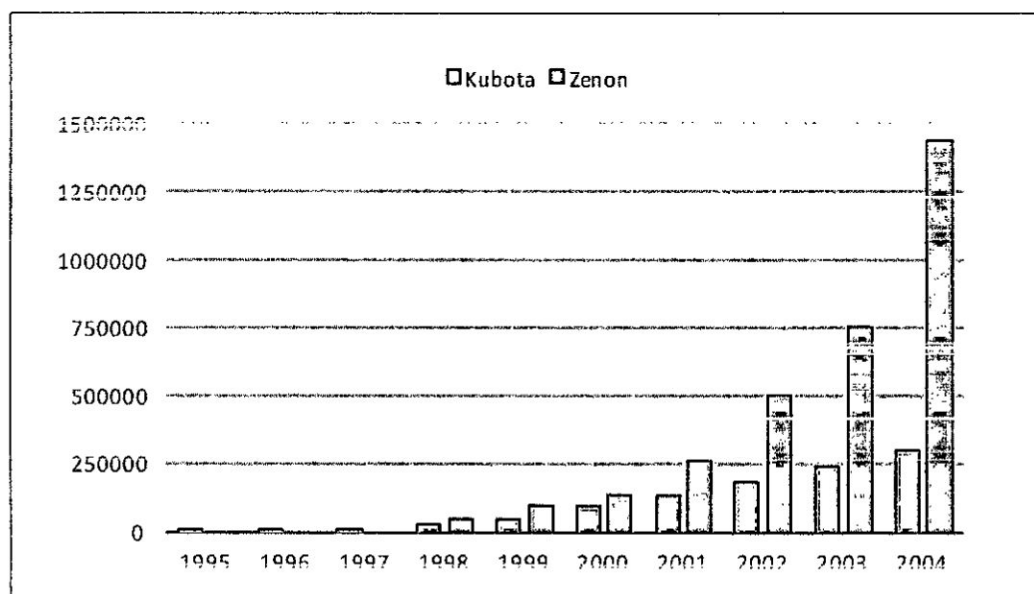


Figura 1 Capacidad instalada acumulada en m³/día de Kubota y Zenon (Judd, 2006)

Los primeros resultados de un sistema MBR utilizado para el tratamiento de agua potable se remontan a 1995, en Douchy, Francia. V. Urbain, R.

Benoit y J. Manem (1996) mostraron el uso exitoso de esta tecnología en la desnitrificación y eliminación de pesticidas.

N. Cicek, J. Franco, M. Suidan y V. Urbain (1998) lograron purificar aguas residuales municipales a través de un biorreactor de membrana a escala piloto. El pilotaje se realizó a lo largo de más de 500 días de operación en estado estacionario y las concentraciones totales de carbono orgánico <1,1 mg / L y demanda química de oxígeno <3,5 mg / L se mantuvieron de manera sostenida y tampoco se detectaron sólidos en suspensión en el efluente durante este período. Las bacterias heterotróficas y los virus MS-2 fueron completamente retenidos por el sistema de membrana, reduciendo la extensión de la desinfección final requerida.

En lo que refiere a efluentes papeleros, Dhagumudi & Yan (2012) realizaron el pilotaje de un sistema MBR y Osmosis Inversa con aguas residuales procedentes de una planta papelera en EEUU. La descarga de aguas residuales fue enviada a la planta piloto MBR de 4 galones por minuto, la cual consistía en un tanque biológico y un tanque de membrana. El efluente del MBR se envió a una unidad piloto de ósmosis inversa de módulo único de 4 pulgadas para tratamiento adicional para desmineralizar el agua para cumplir con la calidad de fabricación de papel. El efluente del MBR promedió una reducción del DBO del 98%, una reducción del DQO del 90% y una remoción del 99% del TSS. No hubo problemas de ensuciamiento ni con el MBR ni con el RO durante el estudio piloto.

2.2. Referencial teórico conceptual

2.2.1. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales se remonta a tiempos antiguos. Según referencias históricas, fueron los griegos en el siglo V a C., los primeros interesados en el tratamiento de las aguas mediante la filtración y hervido previo a su ingestión. Sin embargo, no fue hasta 1804 que John Gibb construyó la primera planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad Pasley, Escocia. Posteriormente en 1806, en la ciudad de Paris entra en funcionamiento la mayor planta de tratamiento de aguas. Ambas plantas se basaban en la filtración mediante arena y carbón.

De acuerdo a Ramalho (1983) el grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente. Existe una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales, agrupándolos en 3 tipos, Tratamiento Primario, Tratamiento Secundario y Tratamiento Terciario o "Avanzado".

El tratamiento primario se utiliza para eliminar sólidos en suspensión y materiales flotantes, según los límites de descarga, ya sea a un medio receptor o para llevar los efluentes a un tratamiento secundario. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales, y su función principal es la reducción de la carga orgánica, expresada como DBO₅ y DQO. El tratamiento terciario tiene como finalidad la eliminación de contaminantes que no se logran

separar mediante tratamientos biológicos convencionales (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2.2. Membrane Biological Reactor (MBR)

También conocido como biorreactor de membrana (BRM), es un sistema de tratamiento convencional de lodos activados modificado, en el cual se ha reemplazado la decantación secundaria por unidades de membrana de ultra filtración UF o micro filtración MF. Los sistemas MBR integran la degradación biológica de los efluentes con la filtración por medio de membranas.

Los sistemas MBR se componen básicamente de dos partes: la unidad biológica o reactor biológico y la unidad de filtración.

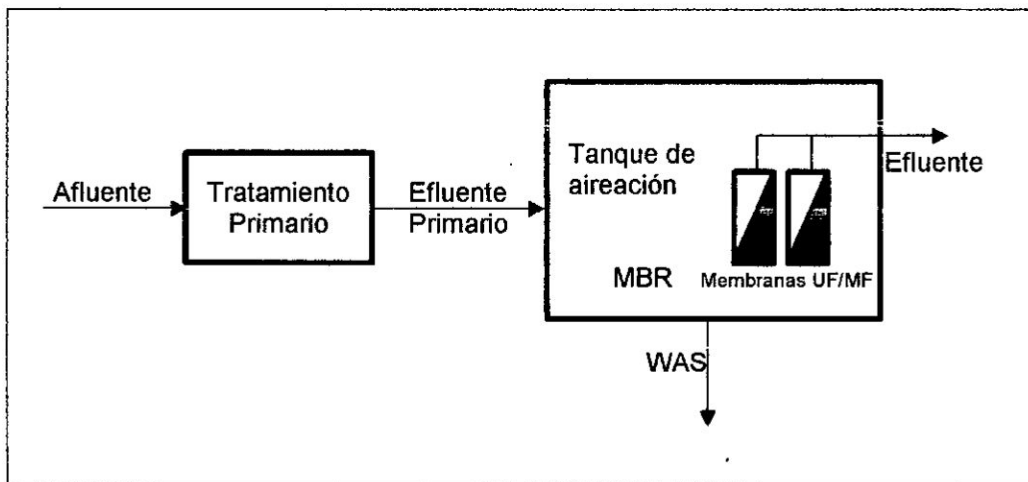


Figura 2 Diagrama de flujo de un sistema MBR

Funcionamiento. Básicamente un sistema MBR realiza una separación Sólido – Líquido mediante membranas. El proceso inicia con el ingreso del afluente pretratado al biorreactor, donde entrará en contacto con la biomasa para luego ser filtrado a través de las membranas. El agua

filtrada, también conocida como permeado, será retirada (efluente) mientras que la biomasa queda acumulada en el biorreactor. Luego se purgará el exceso de lodos con determinada frecuencia para mantener un tiempo de retención celular constante. La operación de filtración se alternará con cortos periodos de limpieza o retrolavado. Los cuales constan de la inversión del sentido de flujo del agua permeada desde el interior al exterior de la membrana. Dependiendo el grado de ensuciamiento de las membranas, deben ser sometidas a una limpieza química ácida y/o básica.

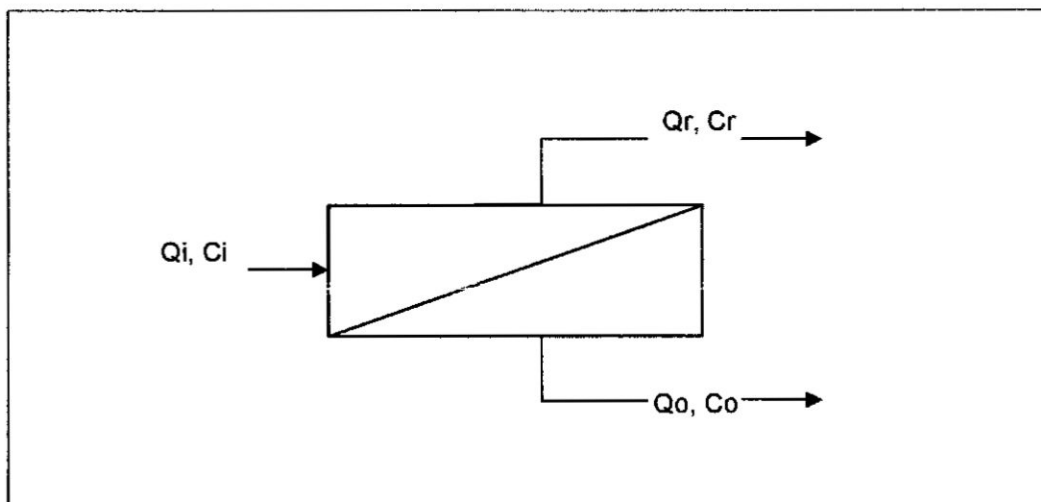


Figura 3 Esquema de la unidad de filtración

En la unidad de filtración o de membranas, el caudal de alimentación (Q_i) resulta igual a la suma del caudal retenido (Q_r) más el caudal del permeado (Q_o).

$$Q_i = Q_o + Q_r$$

De acuerdo al balance de masas, los sólidos de la alimentación serán igual a la suma de los sólidos en el permeado más los sólidos retenidos.

$$Q_i \cdot C_i = Q_o \cdot C_o + Q_r \cdot C_r$$

Donde:

C_i = Concentración de la alimentación

C_o = Concentración del permeado

C_r = Concentración del agua retenida

Como en los sistemas de filtración (UF, MF, OI) la retención de sólidos es aproximadamente el 100%, podemos suponer que $C_o = 0$.

Por lo tanto:

$$Q_i \cdot C_i = Q_r \cdot C_r$$

Configuración. Según la disposición de la unidad de filtración, los sistemas MBR se pueden configurar con membranas externas o con membranas sumergidas.

Los sistemas MBR con membranas externas disponen la biomasa desde el biorreactor hacia la unidad de filtración externa a una alta velocidad de flujo.

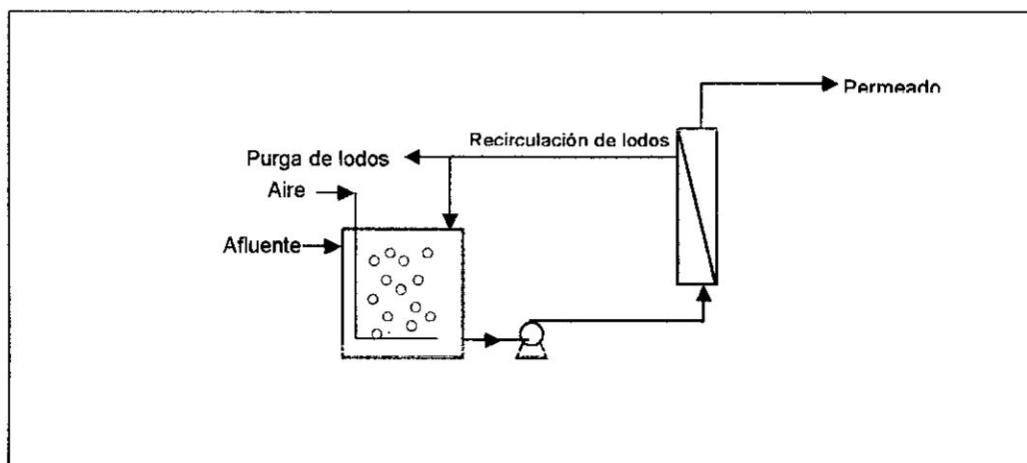


Figura 4 Diagrama de sistema MBR con membrana externa

Los sistemas MBR con membranas sumergidas contienen la unidad de filtración en el interior del biorreactor. Esta configuración puede tener las

membranas instaladas dentro del mismo reactor (Membranas con sumersión interna) o en un pequeño reactor independiente (Membranas con sumersión externa)

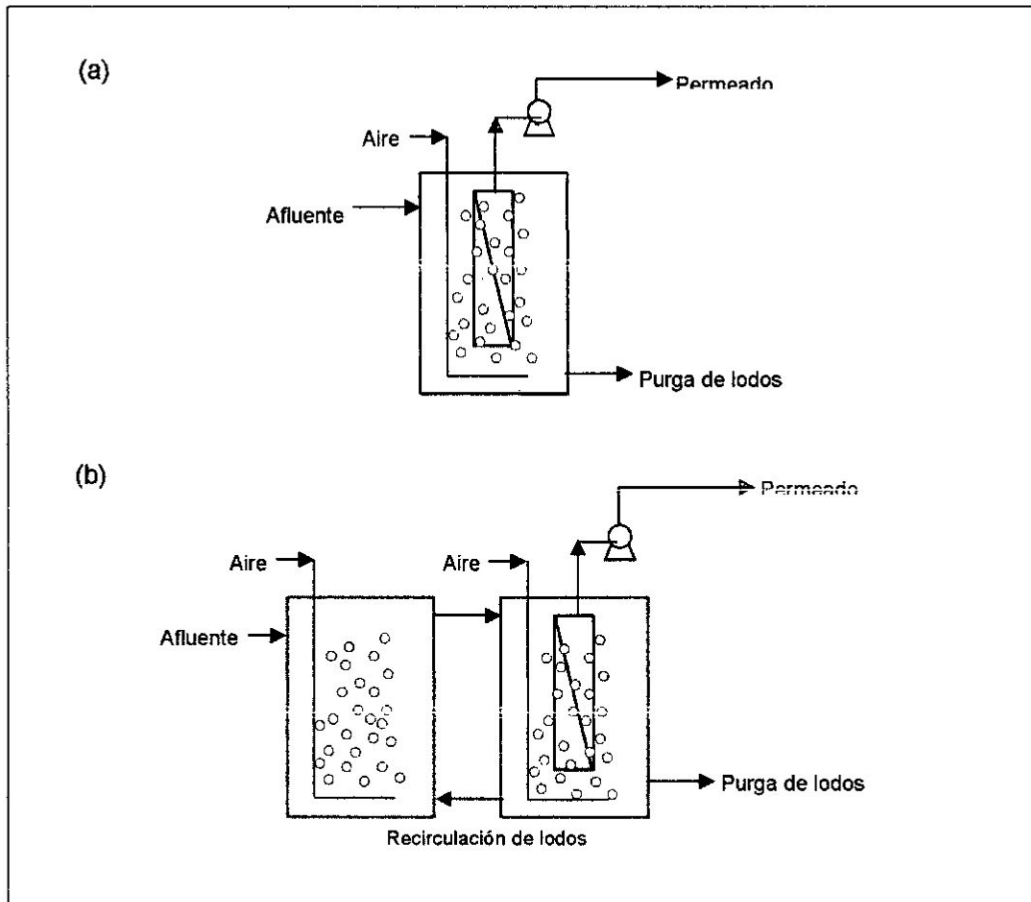


Figura 5 Sistema MBR con membrana sumergida (a) membrana interna y (b) membrana externa

Tipos de membranas.

Las membranas utilizadas en sistemas MBR pueden ser de Microfiltración (MF), con un tamaño de poro entre 0,1 y 1 μm y las de Ultrafiltración (UF), con un tamaño de poro entre 0,005 y 0,1 μm . Las membranas MF son ideales para separar sólidos suspendidos y las UF se utilizan para separar partículas mucho más pequeñas, sobre todo en la retención de bacterias y virus (Trapote, 2013).

Existen 4 tipos de configuración de membranas, los cuales son:

- Placa – bastidor
- Arrollamiento en espiral
- Tubular
- Capilar

Parámetros de diseño y Operación. Es importante que se preste especial atención a ciertos parámetros operacionales, los cuales permitirán llevar un adecuado control del sistema MBR. Los parámetros a tener en cuenta son:

- Carga hidráulica del sistema
- Presión transmembrana
- Permeabilidad
- Aireación
- Concentración de Sólidos Suspendidos en el Licor de Mezcla SSLM y Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor de Mezcla SSVLM
- Edad de lodos

2.2.3. Carga hidráulica del sistema

La carga hidráulica del sistema es el caudal permeado o filtrado que ha pasado a través de una unidad de área de la membrana.

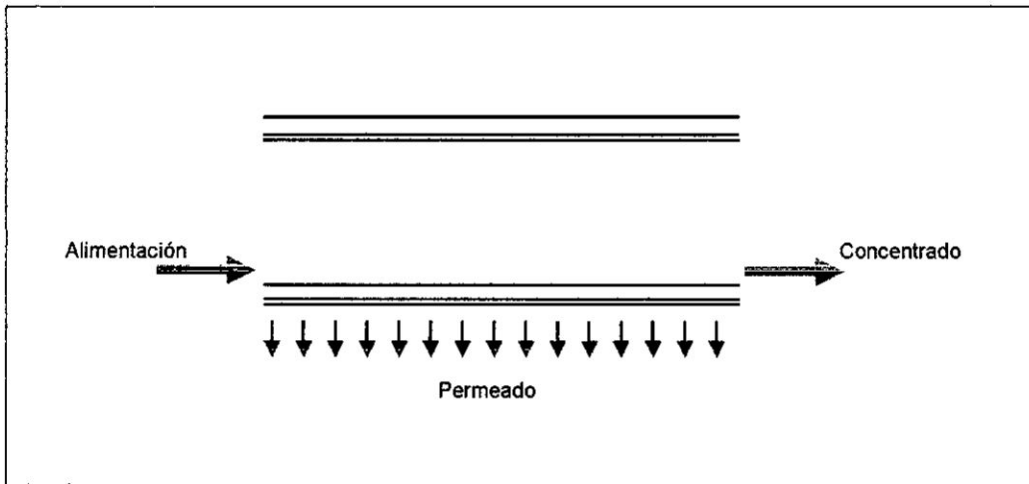


Figura 6 Esquema de flujos en la membrana (Fundación Centro Canario del Agua, 2003)

Se define como:

$$C_H = \frac{Q_o}{S_m}$$

donde:

C_H = flujo o carga hidráulica (L/m².h)

Q_o = caudal de permeado (L/h)

S_m = superficie de membrana (m²)

2.2.4. Presión transmembrana

La presión transmembrana (PTM) es la diferencia entre la presión en el lado alimentación (P_i) y la presión en el lado del permeado (P_o).

$$PTM = P_i - P_o$$

2.2.5. Permeabilidad

La Permeabilidad (K) se define como la cantidad de caudal (Q_o) que puede filtrar la membrana por superficie (S_m) a una determinada presión transmembrana (PTM). La permeabilidad suele expresarse en L/m².h.bar

$$K = \frac{J}{PTM} = \frac{Q_0}{S_m \cdot PTM}$$

2.2.6. Aireación

La aireación es una de las condiciones más importantes en un sistema MBR ya que de esta dependerá la reducción del ensuciamiento de las membranas y el acondicionamiento adecuado de la biomasa. La cantidad de aire dosificado debe satisfacer la demanda de oxígeno necesaria para la biodegradación de la materia orgánica y la respiración endógena de los microorganismos. La dosificación de aire mediante difusores de burbuja fina (menores a 0,5 mm) brinda mayor eficiencia en la oxigenación del sistema en comparación a trabajar con burbujas gruesas (mayores a 2 mm). Además del flujo de aire y el tamaño de burbuja, se debe tener en cuenta la concentración de sólidos en suspensión y la viscosidad del lodo para conseguir una mezcla adecuada y mantener la biomasa en suspensión.

2.2.7. Concentración del licor de mezcla

La concentración del licor de mezcla es la cantidad de sólidos suspendidos por unidad de volumen, la cual se determina mediante método gravimétrico.

La concentración del licor de mezcla puede expresarse como sólidos suspendidos en el licor de mezcla (SSLM) o como sólidos volátiles en el licor de mezcla (SVLM). Ambas medidas guardan una relación entre 70 – 80%.

En un sistema MBR, el rango de operación suele variar entre 8 y 15 g/L de sólidos suspendidos, aunque es posible encontrar algunas plantas que operan a valores mayores. Si bien es cierto que los sistemas MBR trabajan a concentraciones mayores que un sistema convencional, un incremento excesivo de los sólidos suspendidos genera un incremento en la viscosidad del licor de mezcla, lo que trae por consecuencia una deficiente difusión de burbujas de aire y el ensuciamiento de las membranas.

2.2.8. Edad de lodos

Se define como el tiempo promedio en el que las bacterias permanecen en el reactor antes de ser rechazadas (Orozco, 2005).

Ya que en el sistema MBR el efluente está prácticamente libre de sólidos suspendidos, la edad de lodo θ (días) para un determinado volumen de reactor queda definida sólo por la cantidad de sólidos extraídos en la purga Q_r .

$$\theta = \frac{V}{Q_r}$$

Para un adecuado control de la edad de lodo se realiza la purga de los lodos de reactor producidos en exceso.

2.2.9. Planta Piloto

La planta piloto está conformada por dos partes: (a) un tanque de oxidación biológica y (b) y un reactor MBR con membranas de ultrafiltración sumergidas.

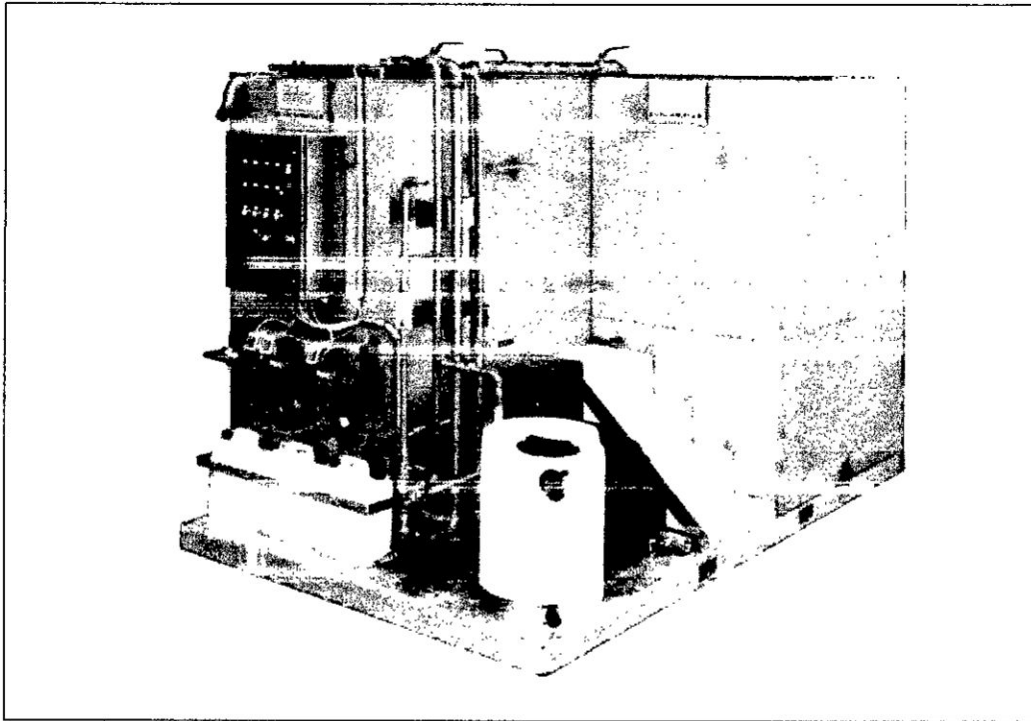


Figura 7 Planta piloto MBR (OMC Collareda)

Tanque de oxidación biológica

El tratamiento biológico se realiza en el tanque de oxidación biológica, a donde llegan las aguas residuales a tratar. Aquí tiene lugar el proceso de aireación y la condición aeróbica para el desarrollo de la masa bacteriana.

El tanque de oxidación biológica tiene un volumen de 5.2 m^3 y está fabricado en acero inoxidable AISI 304, equipado con difusores de aire.

Reactor MBR con membranas de ultrafiltración sumergidas

El licor de mezcla de salida del sector de oxidación es transportado por gravedad (rebose) al sector MBR (biorreactor de membrana), el cual está compuesto por un tanque de 2.6 m^3 , fabricado en acero inoxidable AISI 304 y equipado con un módulo de 25 paneles de membranas de fibra hueca ($22,5 \text{ m}^2$ de área total de membrana), marca TORAY modelo

MEMBRAY. El módulo cuenta con una junta para la conexión del colector de permeado y una junta para el sistema difusor de aire.

El sistema MBR elimina los sólidos suspendidos del lodo líquido con mucha mayor eficacia con las membranas que el proceso de sedimentación convencional. El sistema MBR también retiene microorganismos como *Escherichia coli* y *Cryptosporidium* de manera eficiente.

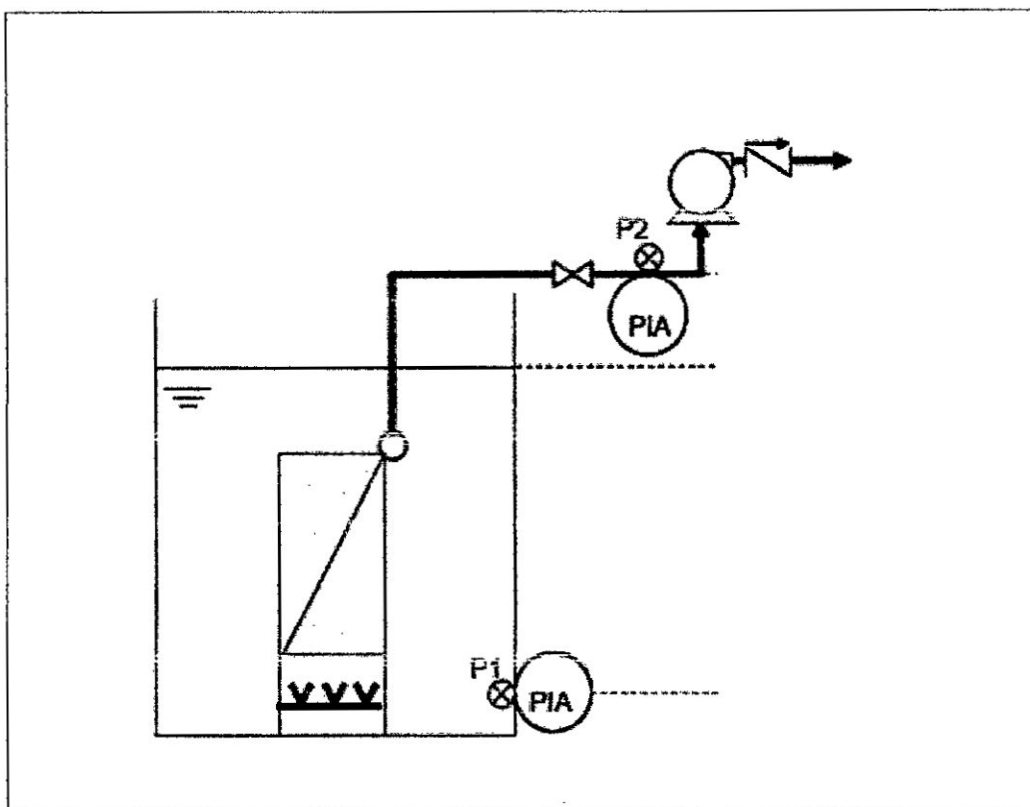


Figura 8 Esquema del reactor MBR con membranas sumergidas

Módulo de membranas de ultrafiltración

Está compuesto por el bloque de elementos y el bloque de aireación. El bloque de elementos contiene una serie de elementos de membrana dispuestos a igual distancia, cada uno de los cuales tiene membranas de lámina plana fijadas a ambos lados del panel de ABS. Cada elemento está conectado a través del tubo de poliuretano al colector de agua permeada. El bloque de aireación consiste en difusores de aire de burbujas finas para suministrar aire de limpieza ubicado en la parte inferior del módulo.

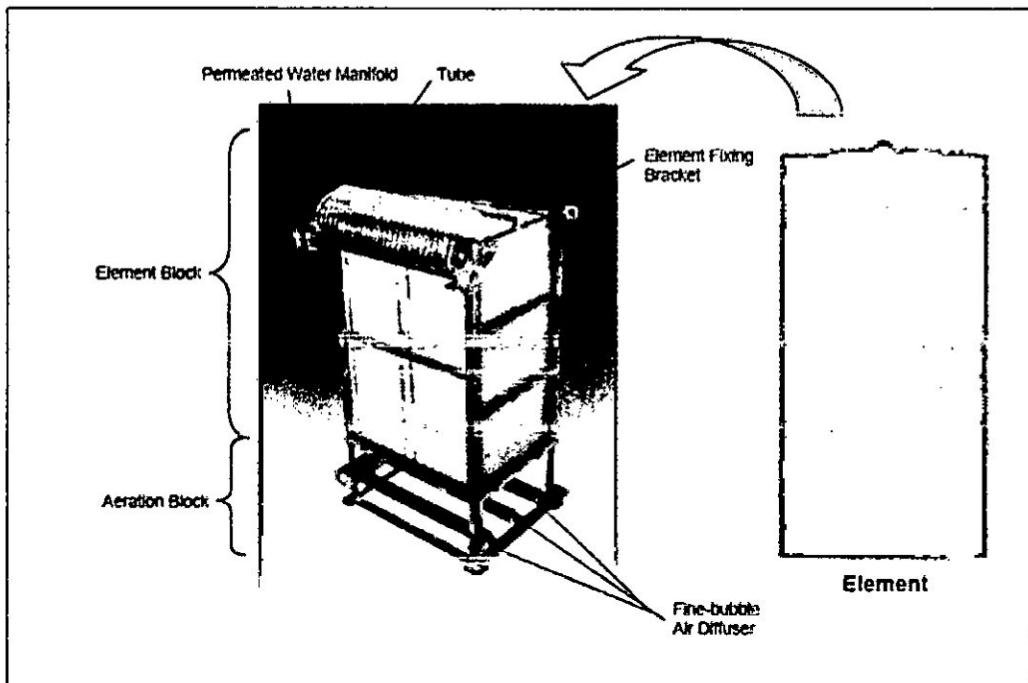


Figura 9 Módulo de membranas y sus componentes (Manual de Operaciones – OMC Collareda)

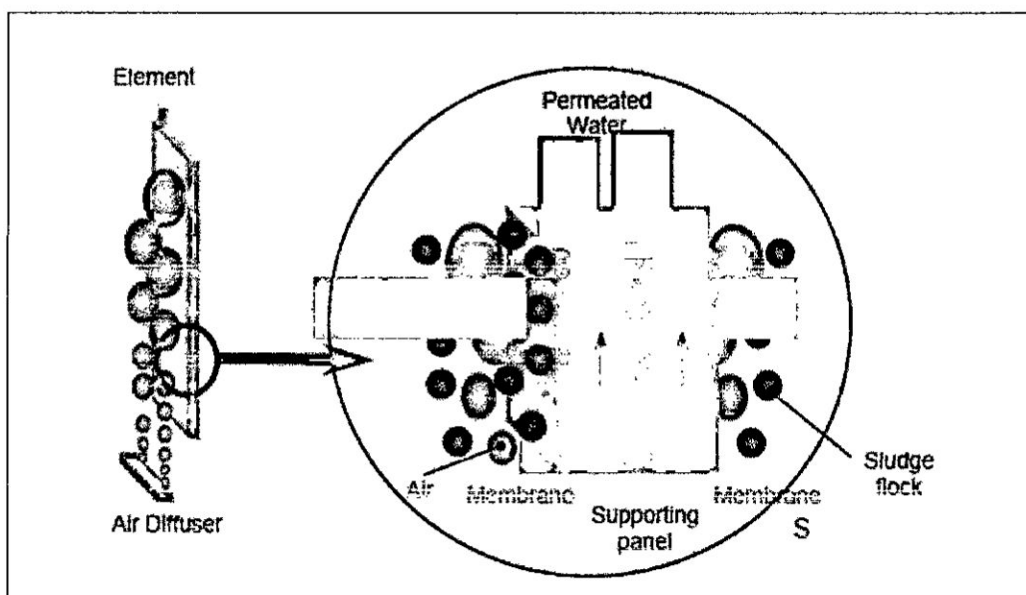


Figura 10 Principio de filtración del lodo activado (Manual de Operaciones – OMC Collareda)

CAPÍTULO III VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de la investigación

De acuerdo a Muñoz (2015), la variable dependiente es aquella que sufren modificaciones y la variable independiente es aquella que produce ciertas modificaciones en la variable dependiente, con la cual está relacionada. En nuestra investigación, denotamos la variable dependiente con la letra O y la variable independiente con la letra X.

$$O = f(X)$$

3.1.1. Variables dependientes

- Cantidad de materia orgánica (O), medida como:
 - o Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días, DBO₅
 - o Demanda Química de Oxígeno, DQO
 - o Sólidos Suspendidos Totales, SST
 - o Turbidez, Turb.

3.1.2. Variables independientes

- Tratamiento biológico con Sistema MBR (X), medido como:
 - o Presión Transmembrana
 - o Aireación
 - o Sólidos Suspendidos en el Licor de Mezcla
 - o Sólidos Suspendidos Volátiles
 - o Edad de Lodo
 - o Dosificación de Nutrientes

3.2. Operacionalización de las variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
O = Cantidad de materia orgánica	DBO ₅ DQO SST Turbidez	mg/L O ₂ mg/L O ₂ mg/L NTU	Cuantitativo: Análisis de muestras en laboratorio
VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X = Tratamiento con sistema MBR	PTM Aireación SSLM SVLM Edad de Lodo Nutrientes	Bar mg O ₂ /L mg/L mg/L días L/h	Cuantitativo: análisis de muestras en campo y laboratorio

Tabla 1 Operacionalización de variables

3.3. Hipótesis general

Empleando un sistema MBR en el tratamiento de efluentes papeleros, se alcanza 98% de remoción de carga orgánica.

CAPÍTULO IV DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo de la investigación

De acuerdo a Arbaiza (2014), "en los cuasi-experimentos, se manipula por lo menos una variable independiente con el fin de observar sus efectos sobre una o más variables dependientes". Por lo tanto, esta investigación se define de tipo Cuasi-experimental, ya que se estudió el desempeño de la planta piloto MBR con los efluentes de un proceso papelerero, bajo condiciones similares a una planta real y considerando la regulación de variables de control al inicio del estudio, a fin de provocar cambios en las variables dependientes. Para ello se evaluó las condiciones de efluente antes y después del tratamiento con el sistema MBR.

4.2. Diseño de la investigación

La presente investigación sigue el diseño de un grupo con medición antes y después, también llamado Pretest - Postest, por ser un estudio en el cual se comparan las condiciones previas y posteriores al tratamiento.

Este estudio se diagrama de la siguiente manera:

G O₁ X O₂

G: Efluentes de Proceso Papelerero

X: Tratamiento Sistema MBR

O₁: Materia Orgánica Inicial (Pretest)

O₂: Materia Orgánica Final (Postest)

4.3. Población y muestra

La planta piloto MBR operó con los efluentes de un proceso papelerero, el cual, previamente pasó por un tratamiento primario compuesto por una mesa gravitacional y un clarificador de flotación por aire disuelto DAF. El caudal de operación de la planta de tratamiento primario es de 3.5 m³/min. Para la investigación, trabajaremos con un caudal de ingreso a la planta piloto de 450 L/h.

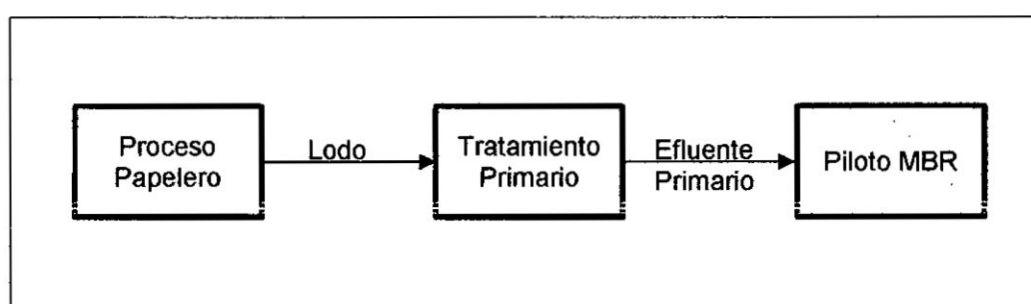


Figura 11 Esquema de ubicación del estudio

4.4. Participantes o sujetos del estudio

El presente estudio está enfocado en la determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de los efluentes de una planta papelerera expresada como DBO₅, DQO y SST, mediante un tratamiento de tipo MBR. Es importante señalar que para la determinación de la eficiencia de remoción de la materia orgánica se tomará como punto inicial el arranque de la planta piloto y el punto final será el momento de estabilización de los lodos, es decir, el momento en el que los sólidos totales en suspensión del licor de mezcla del reactor estabilicen su tasa de crecimiento.

Por lo tanto, podemos decir que los sujetos de este estudio son la planta piloto MBR y los efluentes del proceso papelerero.

Cabe señalar que los efluentes han pasado previamente por un tratamiento primario (efluente primario). Las características del efluente primario varían de acuerdo al tipo de fibra utilizada como materia prima en el proceso papelerero y a la cantidad de químicos dosificados para el blanqueo de la fibra. Esto tendrá un impacto considerable sobre la DBO₅, DQO y turbidez.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Para la realización de las pruebas de laboratorio se utilizaron los siguientes instrumentos y reactivos:

- Colorímetro - HACH, DR900
- Termorreactor - HACH, DRB200
- Medidor de Temperatura digital - OAKTON, Temp 4
- Medidor de Potencial de Hidrógeno - OAKTON, pH 5+
- Balanza analítica - Mettler –TOLEDO, AB 204 S
- Horno eléctrico - Binder, ED56
- Mufla – PROTHERM, PLF 110/6
- Kit gravimétrico (Matraz, embudo, bomba de vacío)
- Turbidímetro digital - HACH, H-2100Q
- Reactivo para Nitrógeno Total - HACH, rango: 10 a 150 mg/L
- Reactivo para Fósforo Total - HACH, rango: 1.0 a 100 mg/L
- Reactivo para DQO – HACH, rangos: 3 – 150 mg/L; 200 – 15,000 mg/L

4.6. Procedimientos de recolección de datos

Los análisis de laboratorio se realizaron de acuerdo a los procedimientos de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition.

Análisis	Nomenclatura	Método
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días	DBO ₅	APHA 5210b
Demanda Química de Oxígeno	DQO	APHA 5220d
Sólidos Suspendidos Totales	SST	APHA 2540d
Sólidos Volátiles Totales	SVT	APHA 2540e
Índice Volumétrico de Lodo	IVL	APHA 2710d
Turbidez	Turbidez	APHA 2130b
Potencial de Hidrógeno	pH	APHA 4500-H+
Temperatura	T	APHA 2550b
Nitrógeno Total	NT	APHA 4500-Nc
Fósforo Total	FT	APHA 4500-Pc

Tabla 2 Análisis realizados en laboratorio

4.7. Plan de trabajo de campo

Acondicionamiento de la planta piloto.

El acondicionamiento de la planta piloto consistió en mantener una edad de lodo de 30 días, una concentración constante de $8,0 \pm 1$ g/L de sólidos suspendidos en el licor de mezcla y un caudal teórico de purga de 170 L/d. El flujo de entrada a la planta piloto se mantuvo constante en 450 L/h, y la carga hidráulica 20 L/m²h. La cantidad de Oxígeno Disuelto en el reactor se mantuvo entre 1 – 1,5 mg/L y la presión transmembrana no

excedió 0.5 bar. El modo de trabajo fijado para el sistema fue 9 minutos de operación y 1 minuto de parada.

El estudio duró 30 días desde la estabilización de la biomasa. Comenzó con la fase de estabilización del sistema, el cual tuvo una duración de nueve días hasta el momento en el que la biomasa alcanza las condiciones requeridas para el estudio.

Arranque del Reactor.

Para el arranque se inoculó lodo biológico y se partió con una concentración inicial de 3140 mg/L sólidos suspendidos en el licor de mezcla. Se tuvo un crecimiento acelerado durante los primeros nueve días, que alcanzó 7200 mg/L. Luego se controló la concentración del licor de mezcla mediante la purga de lodos en exceso.

En la siguiente figura se aprecian las diferentes variables asociadas a la operación del sistema de lodos activos. Donde X representa los sólidos suspendidos expresados en mg/L, S es DBO₅ en mg/L y Q es el caudal.

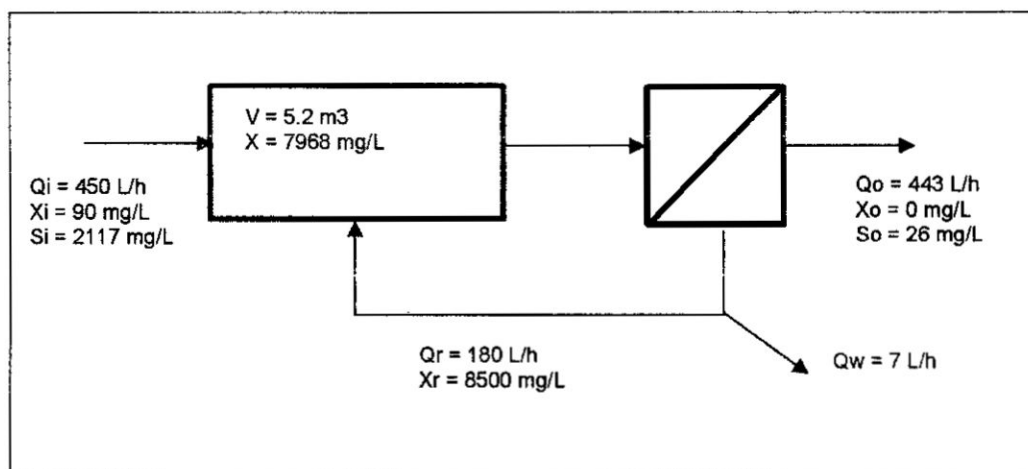


Figura 12 Diagrama de operación de la planta piloto MBR

Dosificación de Nutrientes

En el afluente se tiene Cero de Fósforo Total. Por ello se dosificó polifosfato de manera constante a razón de 1 Kg/día.

4.8. Cálculos

En el presente estudio se calculó la eficiencia de remoción de carga orgánica (Variable Dependiente O) mediante el análisis de remoción de demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días, demanda química de Oxígeno, sólidos suspendidos y turbidez, entre el afluente y efluente de la planta piloto.

De los datos obtenidos en las mediciones diarias de cada variable, se utilizó el promedio de los resultados de efluente ($\bar{O}_{Efluente}$) y el afluente ($\bar{O}_{Afluente}$) para el cálculo de la eficiencia de remoción, expresada en porcentaje (%R).

$$\%R = \frac{(\bar{O}_{Afluente} - \bar{O}_{Efluente})}{O_{Afluente}} \times 100\%$$

CAPÍTULO V RESULTADOS

4.1. Caracterización del afluente

La caracterización del afluente se consiguió mediante la evaluación de la demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días, la demanda química de Oxígeno, los sólidos suspendidos totales, la turbidez, la temperatura, el potencial de Hidrógeno, el Nitrógeno total y el Fósforo total, medidos a la entrada de la planta piloto.

4.1.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 Afluente

Se midió de la demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días del afluente, y la toma de muestras se realizó cada cinco días. El promedio de los resultados fue 2117 mg/L O_2 , con un mínimo de 1460 mg/L O_2 y un máximo de 2830 mg/L O_2 .

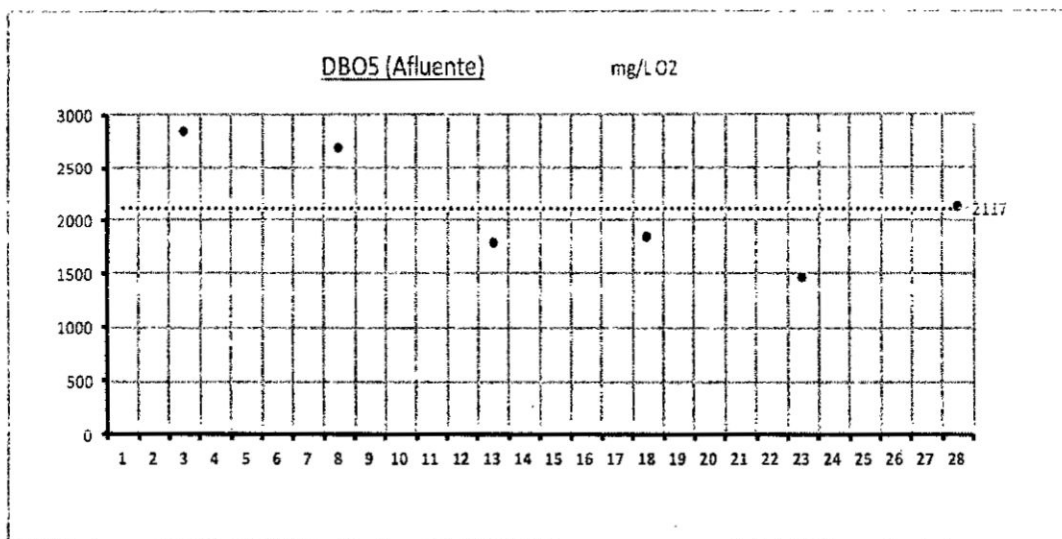


Figura 13 DBO_5 del afluente

4.1.2. Demanda Química de Oxígeno DQO_{Afluente}

El promedio de los resultados fue 3897 mg/L O_2 , con un mínimo de 2970 mg/L O_2 y un máximo de 5470 mg/L O_2 .

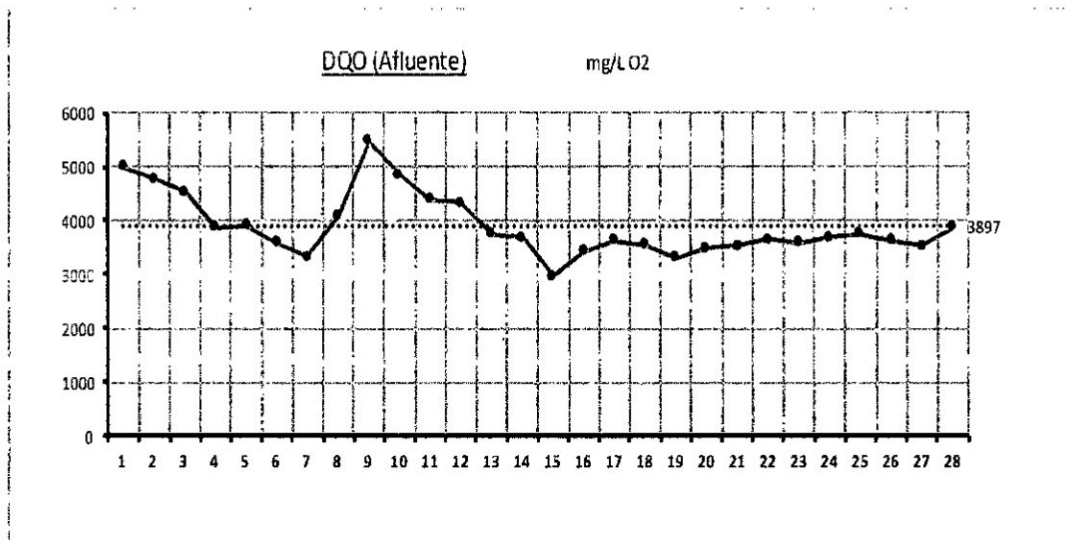


Figura 14 DQO del afluente

4.1.3. Sólidos Suspendedos Totales SST_{Afluente}

El promedio de los resultados fue 90 mg/L, con un mínimo de 70 mg/L y un máximo de 102 mg/L.

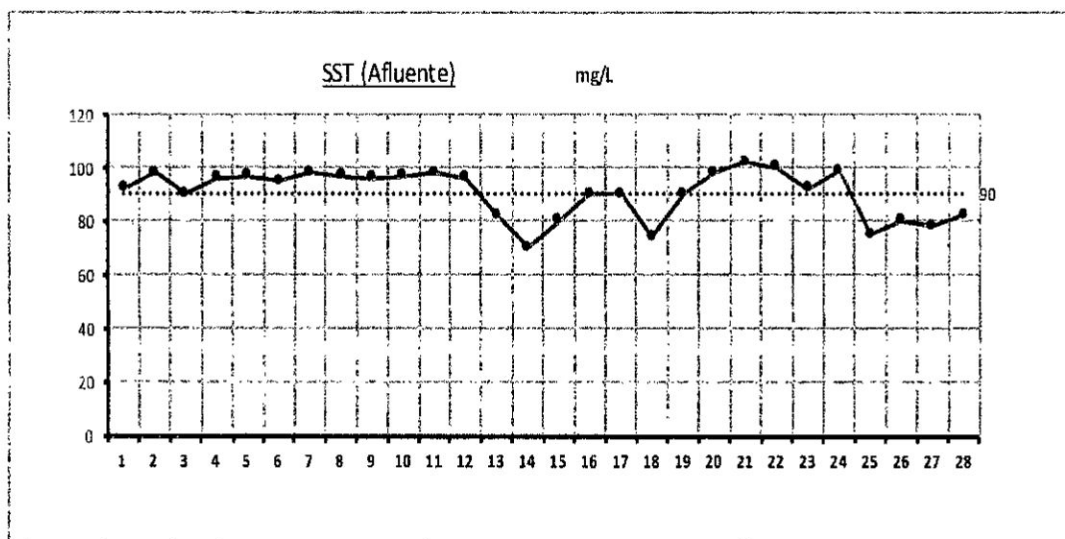


Figura 15 Sólidos suspendidos en el afluente

4.1.4. Turbidez_{Afluente}

El promedio de los resultados fue 246 NTU, con un mínimo de 92 NTU y un máximo de 376 NTU.

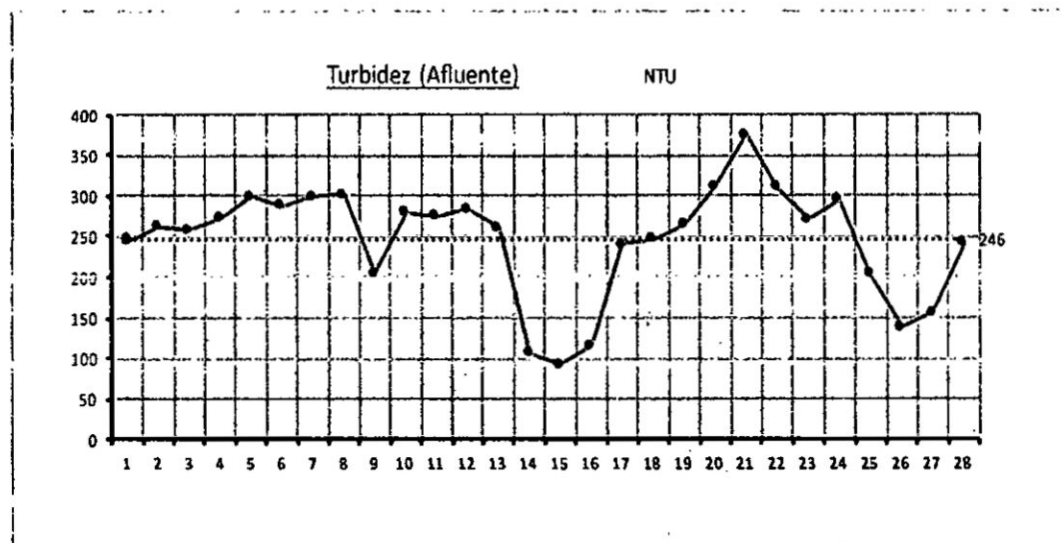


Figura 16 Turbidez del afluente

4.1.5. Temperatura $T_{Afluente}$

Se midió la temperatura del afluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue 38.6 °C, con un mínimo de 35.9 °C y un máximo de 40 °C.

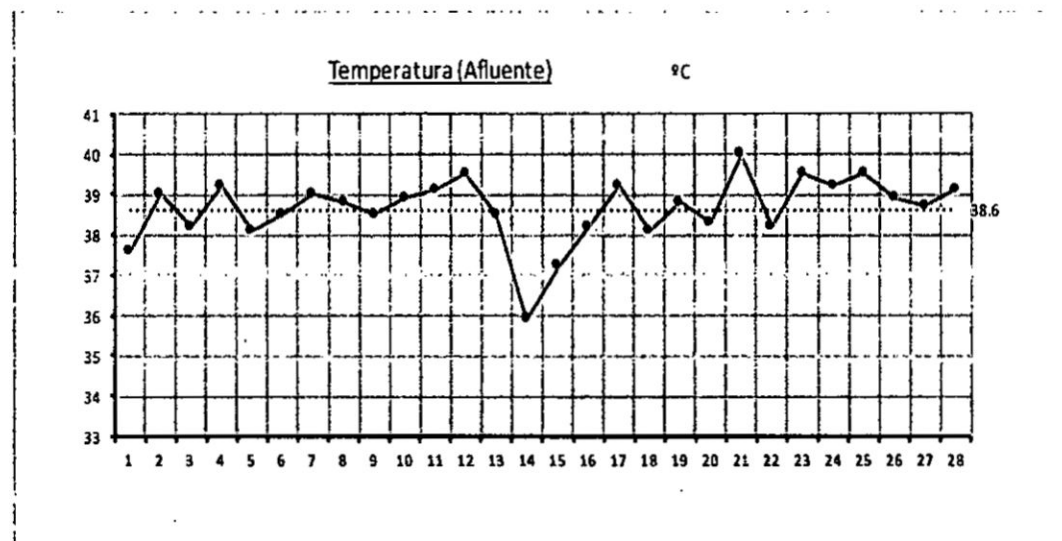


Figura 17 Temperatura del afluente

4.1.6. Potencial de Hidrógeno pH_{Afluente}

El promedio de los resultados fue 7.02, con un mínimo de 6.73 y un máximo de 7.74.

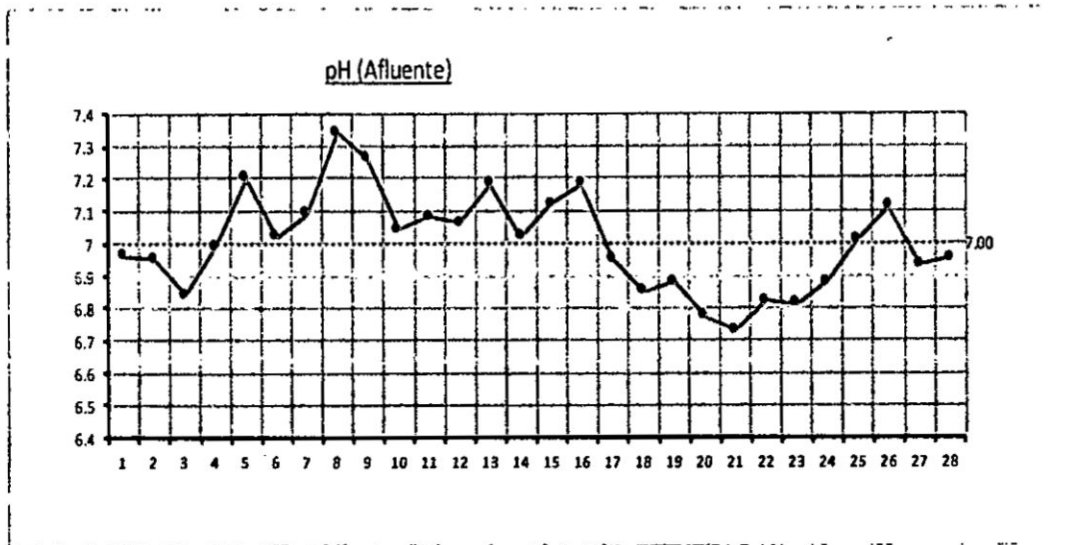


Figura 18 Potencial de Hidrógeno del afluente

4.1.7. Nitrógeno Total NT_{Afluente}

Se midió la cantidad de Nitrógeno total en el afluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue 55 mg/L, con un mínimo de 34 mg/L y un máximo de 72 mg/L.

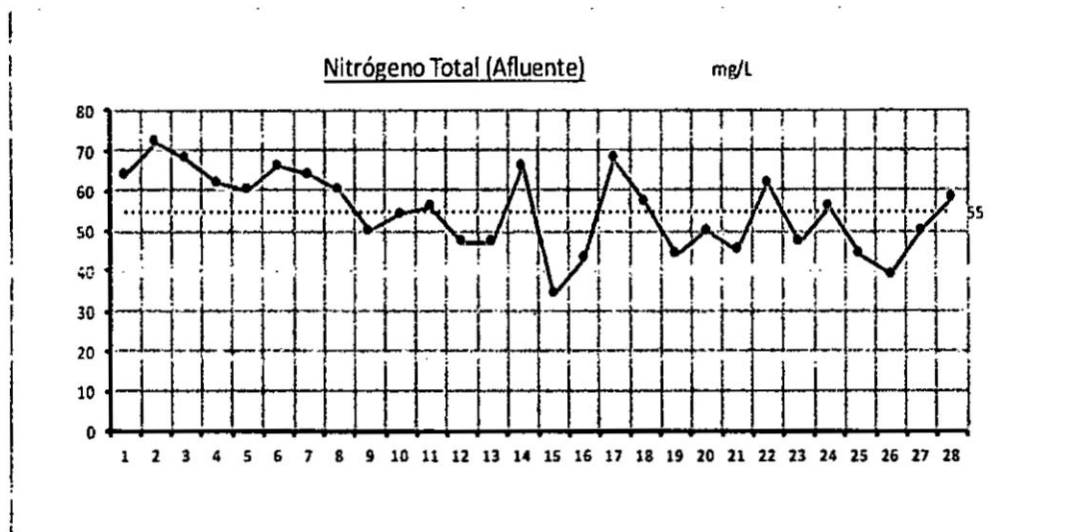


Figura 19 Nitrógeno total en el afluente

4.1.8. Fósforo total FT_{Afluente}

Se midió la cantidad de Fósforo total en el afluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue CERO mg/L.

4.2. Evaluación de los parámetros de control

4.2.1. Presión Transmembrana

Se ve un incremento lento a diferencia de las anteriores pruebas. Esto es beneficiado por la mayor agitación que se da en el tanque MBR con un mayor flujo de aire.

En el tanque de membrana no se aprecia restos de lodo muerto.

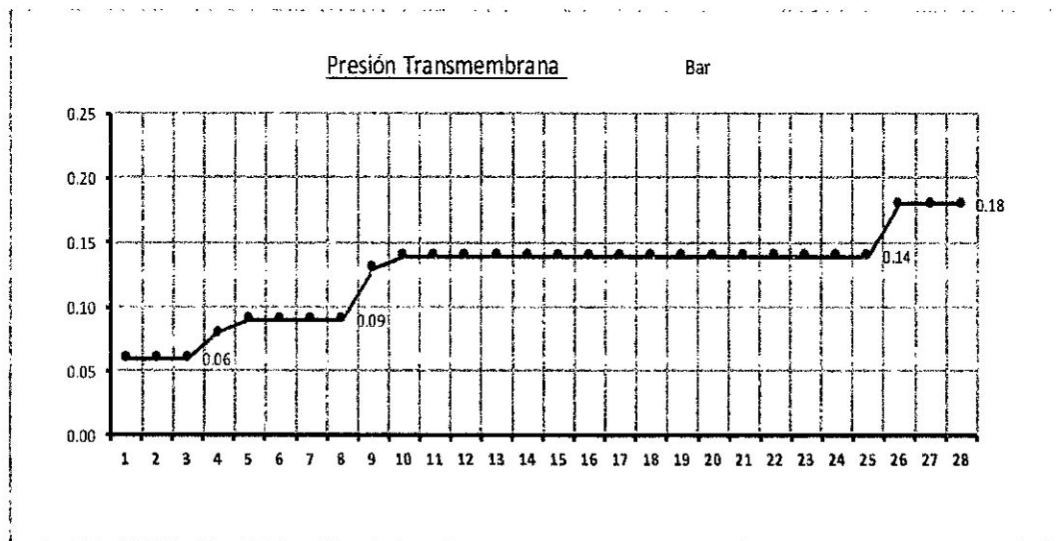


Figura 20 Presión Transmembrana

4.2.2. Aireación

Durante el estudio, se trató de mantener los valores de Oxígeno Disuelto entre 1 – 1,5 mg/L. La medición se realizó diariamente en el tanque reactor. El sistema en promedio se mantuvo en 1,21 mg/L de Oxígeno Disuelto.

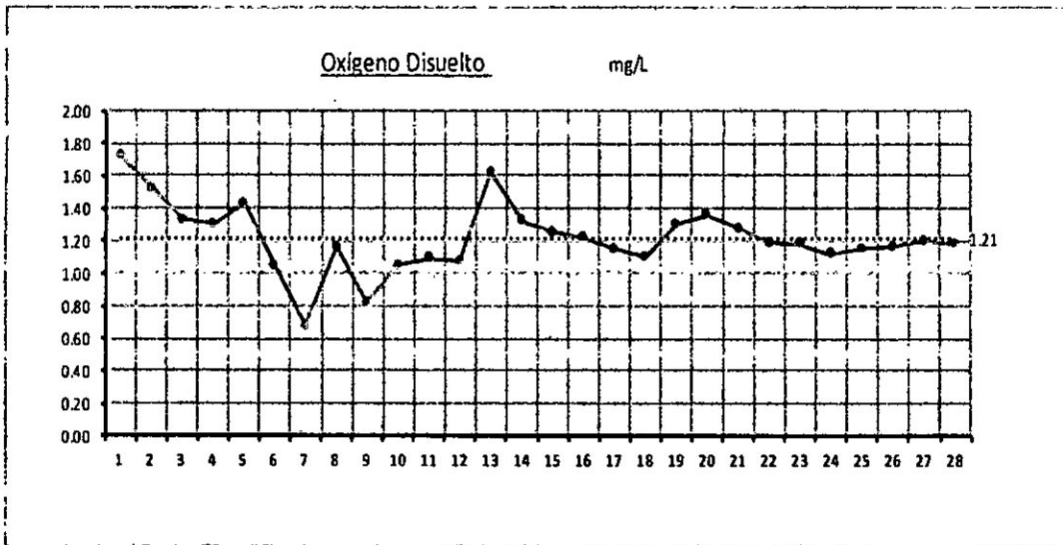


Figura 21 Oxígeno disuelto en el licor de mezcla

4.2.3. Sólidos Suspendidos

Se realizó diariamente la medición de los sólidos suspendidos en el licor de mezcla. Para el estudio se consideró los resultados a partir del día nueve que alcanzó la estabilización del sistema. Se trató de mantener los sólidos suspendidos en 8 ± 1 g/L. El promedio fue 7,9 g/L.

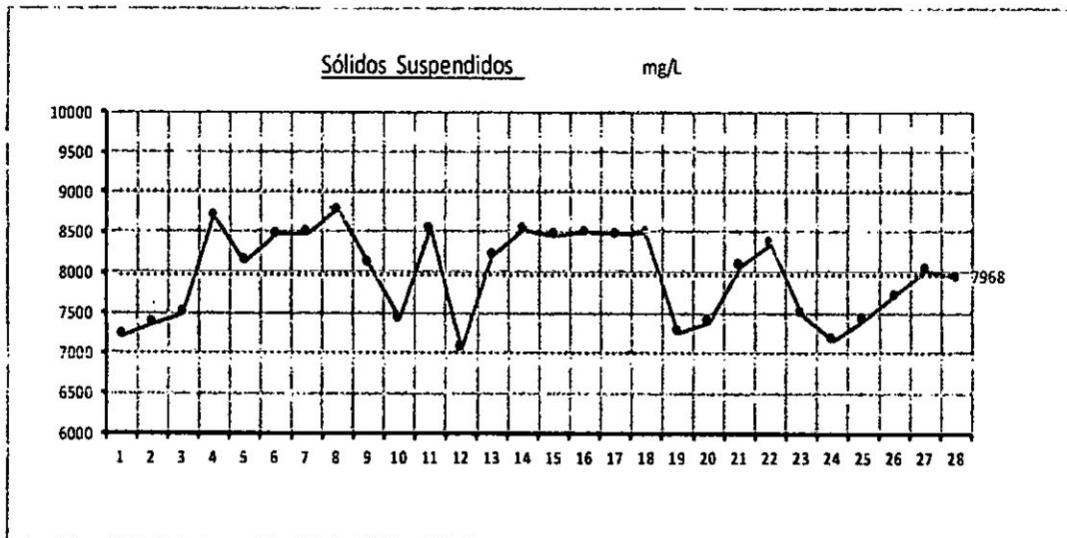


Figura 22 Sólidos suspendidos en el licor de mezcla

4.3. Caracterización del efluente

La caracterización del efluente se determina mediante la evaluación de la demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días, la demanda química de Oxígeno, los sólidos suspendidos totales, la turbidez, la temperatura, el potencial de Hidrógeno, el Nitrógeno total y el Fósforo total, medidos a la salida de la planta piloto.

4.3.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO_5 Efluente

Se realizó la medición de la demanda bioquímica de Oxígeno en 5 días del efluente. El promedio de los resultados fue 26 mg/L O_2 , con un mínimo de 6 mg/L O_2 y un máximo de 50 mg/L O_2 .

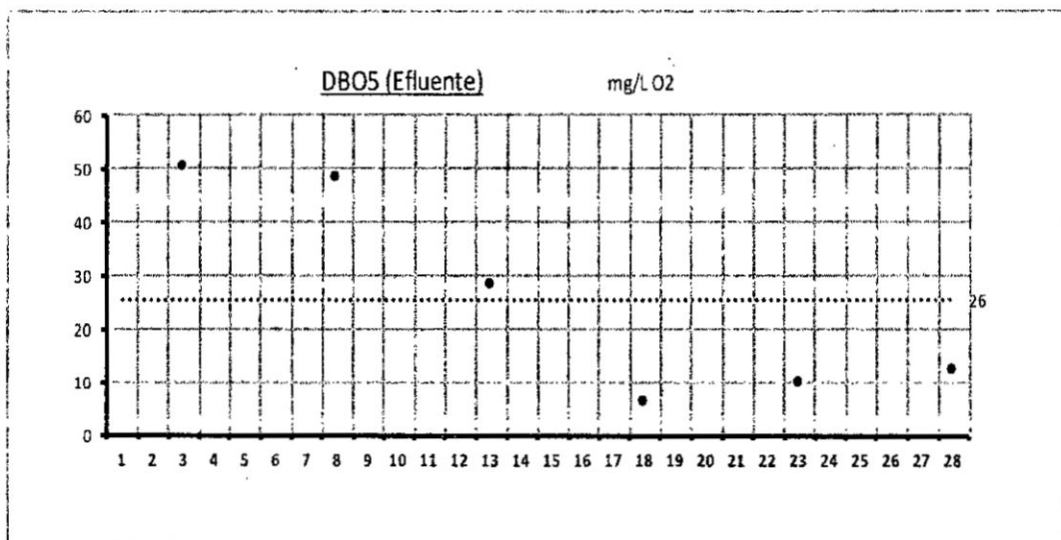


Figura 23 DBO_5 en el efluente

4.3.2. Demanda Química de Oxígeno DQO Efluente

La medición de la demanda química de Oxígeno del efluente se realizó diariamente. La DQO promedio del efluente resultó 145 mg/L O_2 , con un mínimo de 25 mg/L O_2 y un máximo de 520 mg/L O_2 .

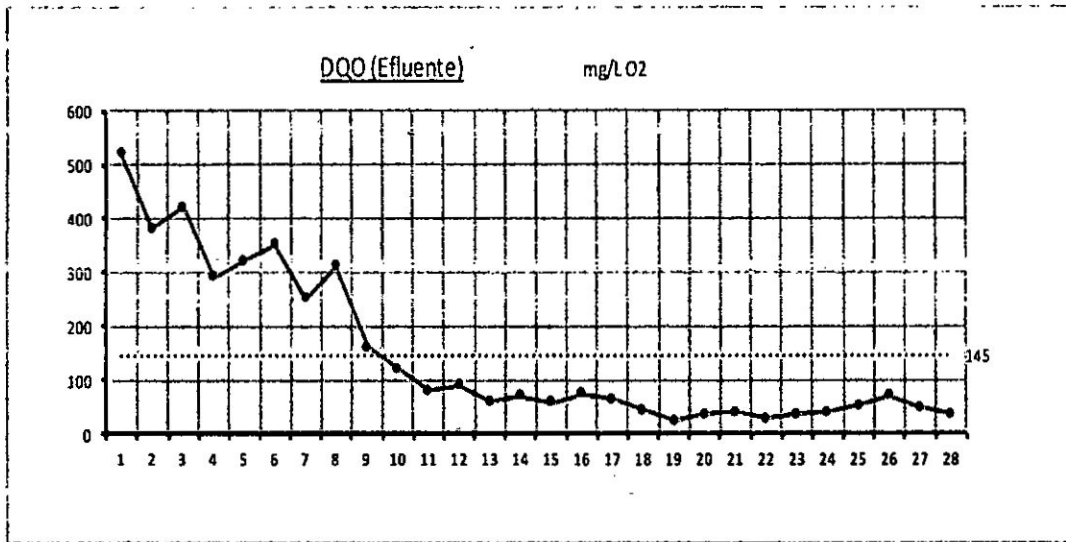


Figura 24 DQO en el efluente

4.3.3. Sólidos Suspendedos Totales SST_{Efluente}

El resultado de los sólidos suspendidos en el efluente es 0.7 mg/L, con un mínimo de CERO mg/L y un máximo de 1 mg/L.

4.3.4. Turbidez_{Efluente}

El promedio de los resultados fue 0.47 NTU, con un mínimo de 0.25 NTU y un máximo de 0.95 NTU.

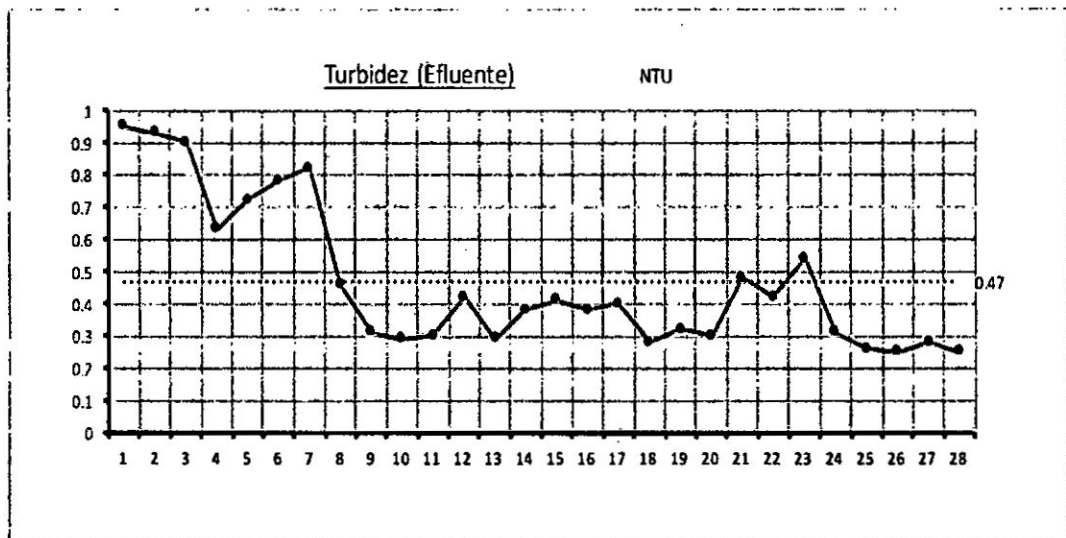


Figura 25 Turbidez del efluente

4.3.5. Temperatura T_{Efluente}

Se midió la temperatura del efluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue 28.0 °C, con un mínimo de 24.2 °C y un máximo de 31.7 °C.

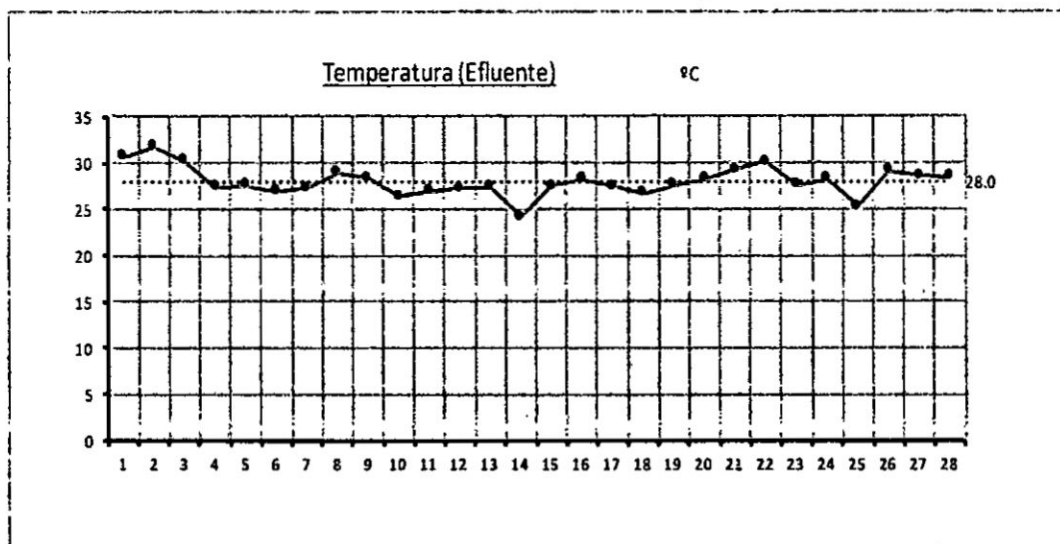


Figura 26 Temperatura del efluente

4.3.6. Potencial de Hidrógeno pH_{Efluente}

El promedio de los resultados fue 7.85, con un mínimo de 7.58 y un máximo de 8.5.

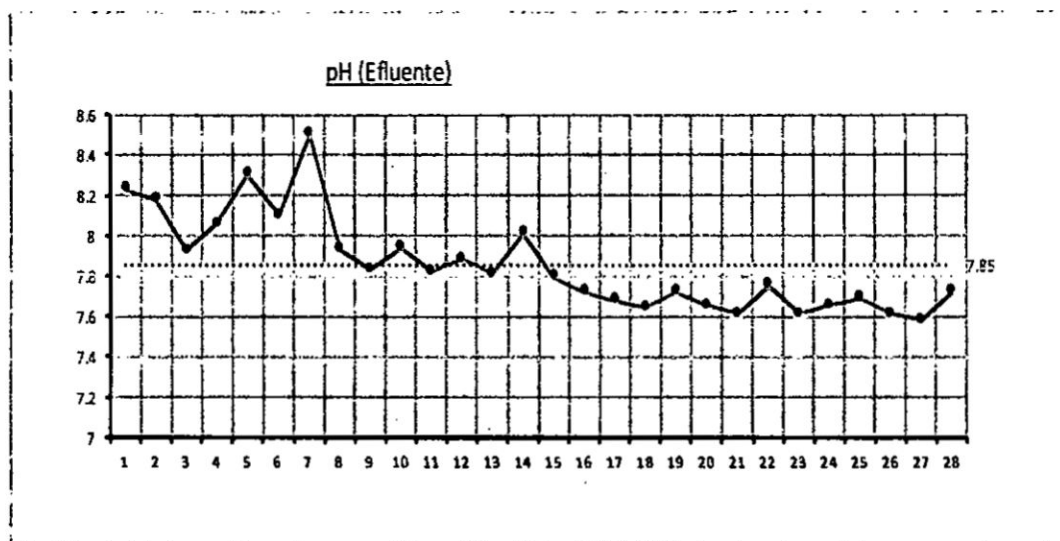


Figura 27 Potencial de Hidrógeno en el efluente.

4.3.7. Nitrógeno Total NT_{Efluente}

Se midió la cantidad de Nitrógeno total en el efluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue 12 mg/L, con un mínimo de 6 mg/L y un máximo de 25 mg/L.

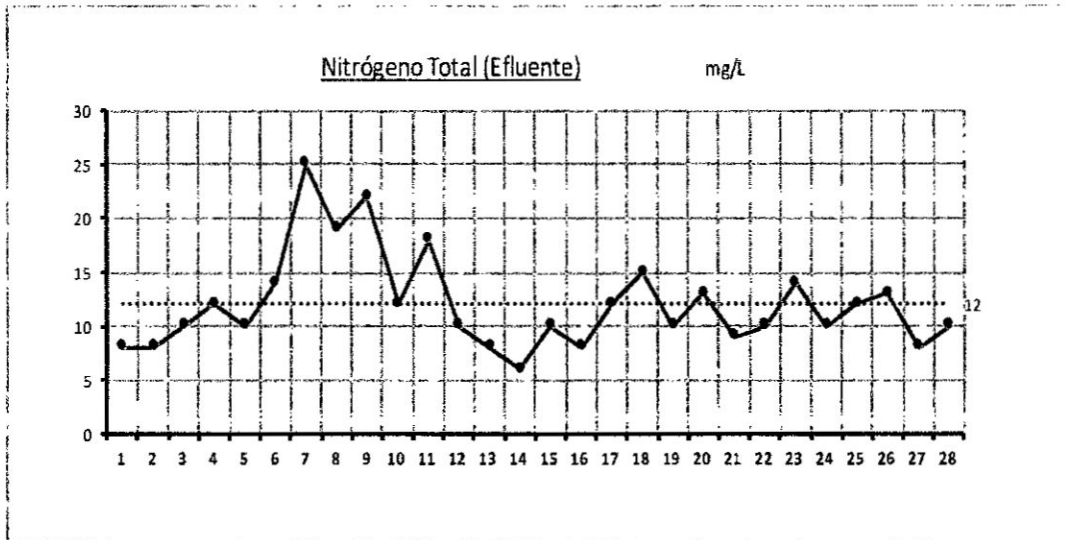


Figura 28 Nitrógeno total en el efluente

4.3.8. Fósforo total FT_{Efluente}

Se midió la cantidad de Fósforo total en el efluente y la toma de muestras se realizó diariamente. El promedio de los resultados fue CERO mg/L.

4.4. Eficiencia de la planta piloto

Para la evaluación de la eficiencia de remoción de carga de la planta piloto tomamos en consideración los resultados obtenidos posterior a la fase de estabilización.

La eficiencia de remoción de carga orgánica la obtenemos mediante la diferencia entre la entrada y la salida de los resultados de los análisis de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y turbidez.

Parametro	Entrada Pretest	Salida Postest	Eficiencia
DBO ₅ , mg/L O ₂	2117	26	98.8%
DQO, mg/L O ₂	3897	145	96.3%
SST, mg/L	90	0.7	99.2%
Turbidez, NTU	246	0.47	99.8%

Tabla 3 Eficiencia de remoción obtenido

CAPÍTULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de los resultados con los objetivos planteados

a) Caracterización del afluente.

De los resultados obtenidos, se alcanza a tener un completo perfil del afluente a la entrada del sistema MBR. Con estos resultados, se determina que existe una alta variación de la DBO₅, DQO y turbidez en el afluente a lo largo de todo el estudio. Sin embargo, tanto los sólidos suspendidos, la temperatura y el potencial de Hidrogeno mantienen una baja variación. En el caso de la DBO₅, el promedio fue 2117 ± 539 mg/L O₂. El promedio de la DQO y la turbidez fue 3897 ± 581 mg/L O₂ y 246 ± 69 NTU, respectivamente. El promedio de sólidos suspendidos, temperatura y pH resultante fue 90 ± 9 mg/L, $38.6 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ y 7.0 ± 0.15 , respectivamente.

En cuanto a la presencia de nutrientes en el afluente, necesarios para el desarrollo del proceso biológico, los resultados nos indican que solo existe Nitrógeno en cantidades adecuadas. Por lo tanto, se hace necesaria la dosificación de polifosfato (Fósforo).

b) Control del sistema MBR

El control realizado sobre los sólidos suspendidos en el licor de mezcla, la presión transmembrana y aireación del sistema, permitió asegurar las condiciones de operación planteadas en el presente estudio. Los sólidos suspendidos en el licor de mezcla se

mantuvieron en $7,9 \pm 0.5$ mg/L, la presión transmembrana llegó a tan solo 0.18 bar y la cantidad de oxígeno disuelto en el reactor tuvo un promedio de 1.2 ± 0.2 mg/L.

c) Caracterización del efluente

Se aprecia estabilidad en los resultados de la caracterización del efluente. La variación de la DBO₅, DQO, turbidez, sólidos suspendidos, temperatura y pH fue mínima en todos los casos.

En cuanto a la presencia de nutrientes en el efluente, se aprecia que hay una adecuada reducción del Nitrógeno Total y del Fósforo Total.

d) Eficiencia de remoción del sistema

De la tabla 3, se aprecia que el porcentaje de remoción de carga orgánica expresada como DBO₅, DQO, SST y Turbidez, es 98.8%, 96,3%, 99,2% y 99,8% respectivamente.

Por lo tanto, contrastando los resultados de nuestro estudio podemos decir que, la planta piloto MBR logró una eficiencia de remoción superior al 98% con el acondicionamiento de operación dado.

6.2. Contratación de resultados con otros estudios similares

De acuerdo a Dhagamudi & Yan (2012), en su estudio de tratamiento de efluentes papeleros con una planta piloto MBR, el efluente alcanzó una reducción de DBO₅ del 98%, una reducción de DQO del 90% y una remoción del 99% del SS.

Los resultados de remoción alcanzada en nuestro estudio fueron 98,8% en DBO₅, 96,3% en DQO y 99,2% en SS.

Contrastando los resultados, los valores de remoción alcanzados en nuestro estudio fueron superiores.

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES

a) Caracterización del afluente.

Los resultados obtenidos mediante la caracterización del afluente muestran que hay una gran variación en cuanto a DBO₅, DQO y turbidez y una alta carga de sólidos suspendidos. Además, no se cuenta con la presencia de Fósforo, el cual deberá ser añadido en la proporción adecuada.

Sin embargo, a pesar de la variación de la calidad del afluente y la ausencia de nutrientes, podemos concluir que el sistema MBR es capaz de amortizar estas variaciones sin que estas representen un problema en el proceso.

Cabe precisar que las variaciones de concentración en el afluente se deben a los cambios de producción en el proceso papelerero, los cuales pueden incrementar o disminuir la cantidad de compuestos orgánicos – tales como lignina y celulosa, así como también restos químicos procedentes del proceso de blanqueamiento – en el efluente.

b) Control del sistema MBR

Respecto al arranque del reactor, se concluye que es posible iniciar con un lodo de media – baja concentración e incrementarla en un corto período.

Del control del sistema MBR mediante parámetros establecidos, se concluye que es posible llevar un adecuado control del sistema

manteniendo el valor de los sólidos suspendidos en el licor de mezcla en un promedio de 8,0 mg/L. A esta condición, y manteniendo la cantidad de Oxígeno disuelto adecuada, es posible mantener la presión transmembrana estable. Si bien es cierto que las membranas son la parte más susceptible de los sistemas MBR debido al taponamiento al que están expuestas y/o al deterioro por presencia de material sólido, en nuestro estudio no hubo la necesidad de hacer ningún lavado de membranas.

c) Caracterización del efluente

De la caracterización del efluente se concluye el sistema MBR permite mantener estable los resultados del efluente.

En cuanto a la presencia de nutrientes remanentes en el efluente, la cantidad de Fósforo dosificado se consumió en su totalidad.

d) Eficiencia de remoción del sistema

De los resultados de la tabla 3, se concluye que la planta piloto MBR es capaz de alcanzar una eficiencia de remoción superior al 98% con el acondicionamiento de operación dado.

CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES

a) Caracterización del afluente.

Se recomienda realizar la caracterización del afluente en un periodo de tiempo considerable; esto es posible incluso haciendo uso de datos históricos. De esta manera se podrá conocer el rango de fluctuación de cada variable crítica y de acuerdo a esto, realizar un adecuado diseño.

Es importante también tener en cuenta un adecuado control del pre-tratamiento del afluente – o tratamiento primario – previo al arribo del sistema MBR.

b) Control del sistema MBR

Se recomienda llevar un adecuado control del lodo biológico en el reactor y realizar la purga de lodos en exceso de acuerdo a los parámetros planteados.

Para evitar el ensuciamiento de las membranas, es recomendable asegurar la correcta dosificación de aire en el módulo de membranas. Ante una caída en el flujo de aire, se apreciará el incremento de la presión transmembrana.

c) Caracterización del efluente

Se recomienda estudiar el impacto de las variaciones en el mediano y largo plazo de los afluentes sobre las variables críticas en el reactor biológico y en el efluente a la salida del sistema MBR.

d) Eficiencia de remoción del sistema

A fin de mejorar la eficiencia de remoción del sistema, se recomienda también realizar el pilotaje a diferentes edades de lodo. Previamente a la implementación de un sistema MBR para el tratamiento de cualquier efluente, procedente de cualquier proceso industrial, se sugiere realizar el estudio piloto correspondiente. Esto permitirá establecer adecuadamente los parámetros de diseño y operación.

CAPÍTULO IX REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANA. (2013). *Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos*. Autoridad Nacional del Agua, Lima. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.
- Arbaiza Fermi, L. (2014). *Cómo elaborar una tesis de grado*. Lima, Perú: ESAN Ediciones.
- Bailey, J., Bemberis, I., & Presti, J. (1971). *Phase I Final Report*. Shipboard sewage treatment system, General Dynamics Electric Boat Division. EEUU: NTIS.
- Bemberis, J., Hubbard, P., & Leonard, F. (1971). Membrane sewage treatment systems - potencial for complete wastewater treatment. *American Society of Agricultural Engineers Winter Meeting* (págs. 71-878,1-28). ASABE.
- Cicek, N., Franco, J., Suidan, M., & Urbain, V. (1998). Using a membrane bioreactor to reclaim wastewater. *AWWA*, 105-113.
- Dhagumudi, V., & Yan, D. (2012). *Wastewater Treatment with MBR & RO for Pulp & Paper Mills*. EEUU: AWWA.
- INEI. (2013). *Producción Nacional: 2012*. Lima: PCM.
- Judd, S. (2006). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Oxford, UK: Elsevier.
- Mendoza, M. (2009). Una mirada a las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (eps). *Debates en Sociología*, 34, 108-113.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill.
- Muñoz Lazo, C. (2015). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. México, DF: Pearson.
- MVCS. (10 de Enero de 2015). N° 001-2015-VIVIENDA. *Diario El Peruano*, 544502-544510.

Orozco Jaramillo, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales, Teoría y Diseño*. Bogotá:
Acodal.

Ramalho, R. (1983). *Introduction to Wastewater Treatment Processes, Second Edition*.
London: Academic Press, Inc.

Trapote, A. (2013). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*. Alicante:
Universidad de Alicante.

Urbain, V., Benoit, R., & Manem, J. (1996). Membrane Bioreactor: A New Treatment
Tool. *AWWA*, 75-86.

Anexos

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
<p>Problema general ¿Cuál es la eficiencia de remoción de materia orgánica de un sistema MBR con los efluentes procedentes de un proceso papelerero?</p> <p>Problemas específicos ¿cuáles son las características de los afluentes en la entrada de la planta piloto MBR? ¿cuáles son los parámetros de las variables de control para la operación de la planta piloto MBR? ¿cuáles son las características de los efluentes en la salida de la planta piloto MBR?</p>	<p>Objetivo general Investigar la remoción de carga orgánica de los efluentes de un proceso papelerero mediante un sistema MBR.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Evaluar las características del afluente, tales como DBO₅, DQO, SST, Turbidez, Temperatura, pH, Nitrógeno total y Fósforo total b) Evaluar las variables de control del sistema, tales como sólidos suspendidos en el licor de mezcla, presión transmembrana y aireación. c) Evaluar las características del efluente, tales como DBO₅, DQO, SST, Turbidez, Temperatura, pH, Nitrógeno total y Fósforo total d) Evaluar la eficiencia de remoción de DBO₅, DQO, SST y Turbidez 	<p>Hipótesis general Acondicionando un sistema MBR en el tratamiento de efluentes papeleros, se alcanza 98% de remoción de carga orgánica</p>	<p>Tipo Cuasi-Experimental</p> <p>Método Pre-test – Post-Test</p> <p style="text-align: center;">G O₁ X O₂</p> <p>G: Efluentes del proceso papelerero X: Sistema de tratamiento MER O₁: Materia orgánica inicial (Pre-test) O₂: Materia orgánica final (Post-test)</p>	<p>Población El caudal de operación de la planta de tratamiento primario es de 3.5 m³/min los 365 días del año.</p> <p>Muestra Para la investigación, trabajaremos con un caudal de ingreso a la planta piloto de 450 L/h durante 28 días.</p>