

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL MEDIANTE UN BIORREACTOR ANAEROBIO DE MEMBRANA A ESCALA PILOTO

Dulce Merari Cid León ⁽¹⁾

Maestría en Ingeniería, UNAM.

Egresado de la carrera de Ingeniería Bioquímica Industrial, UAM.

Juan Manuel Morgan Sagastume

Doctor en Ingeniería Química por la

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Técnico Académico Titular del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Investigador Nacional Nivel I.

Sarina J. Ergas

Doctora por la Universidad de California. Es profesora asociada del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Massachusetts en Amherst, USA.

Adalberto Noyola Robles

Doctor en Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas, Toulouse, Francia. Investigador Titular en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Investigador Nacional Nivel III.

Dirección (1): Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, Edificio 5, Cubículo 406, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México D.F., México. Tel: +52 55 56233600 ext 8696 Fax +52 55 616-21-64 E-mail: jmms@pumas.ii.unam.mx.

RESUMEN

En esta investigación se condujeron estudios en un reactor anaerobio de membrana a escala piloto. El reactor UASB acoplado a membranas de ultrafiltración se operó en continuo permitiendo aprovechar las ventajas de la vía anaerobia y asociarlas con una retención efectiva de sólidos suspendidos, coloides, microorganismos patógenos y parásitos. Las condiciones de operación en la parte biológica (TRH= 6 h) de este sistema proporcionaron un efluente de tal modo que al combinarse con las condiciones de operación en la parte filtrante ($v= 2.25$ m/s, TMP = 20 psi) se logró minimizar la frecuencia de limpieza química (solución de hipoclorito de sodio a 300 mg/l) y retrasar el ensuciamiento irreversible. El sistema logró una remoción del 87.62 % de DQO total (83% de la DQO soluble), 99.7% de sólidos suspendidos (SS) y 100% de coliformes fecales y de huevos de helmintos. Análisis preliminares efectuados al material acumulado en la membrana permiten corroborar que este está construido principalmente por sustancias orgánicas extracelulares.

Palabras clave: Anaerobio, condiciones de operación, membranas, taponamiento.

INTRODUCCION

Desde su introducción, hace 4 décadas, el tratamiento anaerobio ha llegado a ser un proceso adecuado para el manejo del agua residual industrial. En esos años ha habido un mejor entendimiento de la microbiología de este proceso y una mejoría en la tecnología involucrada en los reactores, lo que ha hecho posible considerar esta opción en el tratamiento de agua residual, incluso con baja carga, tales como los efluentes municipales. La principal dificultad en los procesos de tratamiento anaerobio de agua residual es la retención de una cantidad suficiente de biomasa activa debido a su baja velocidad de crecimiento. Como resultado, los sistemas anaerobios requieren un tiempo de retención celular (TRC) más largo, comparado con el que se aplica en procesos aerobios. Adicionalmente, el tratamiento anaerobio no ha sido un tratamiento completo

debido a su menor eficiencia e inhabilidad para alcanzar las regulaciones de descarga. Sin embargo, su bajo consumo de energía, la limitada producción de lodos y la generación de metano como gas combustible hacen de este proceso una atractiva etapa de desbaste, previo a un proceso de pulimento, normalmente de tipo aerobio.

Las cargas orgánicas en los sistemas anaerobios están controladas principalmente por la retención de biomasa dentro del reactor. Una alta retención de biomasa conduce a un mejor funcionamiento y estabilidad, con menores volúmenes de reactor. En reactores completamente agitados con sedimentador secundario (llamados de contacto anaerobio), la baja sedimentabilidad de la biomasa lleva a tiempos de retención hidráulica (TRH) más altos y por lo tanto a reactores y costos mayores. Estos problemas se podrían minimizar si la biomasa es retenida y su concentración incrementada, en forma independiente al tiempo de retención hidráulica.

En este sentido, uno de los desarrollos más notables en la tecnología del tratamiento con procesos anaerobios es el reactor de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés). La aceptación de esta tecnología para el tratamiento de efluentes industriales es generalizada, no así cuando ésta se aplica en aguas residuales de origen doméstico o municipal. Sin embargo, las ventajas propias de esta tecnología la hacen particularmente adaptada para alcanzar un manejo sustentable del agua residual municipal en países en desarrollo (Foresti et al. 2006).

Como fue señalado, el efluente tratado por vía anaerobia normalmente no cumple con los requerimientos de descarga, particularmente por su aún elevada concentración de materia orgánica, por lo que se aplica un tratamiento de pulimento, con varios posibles arreglos (Chernicharo, 2006).

La tecnología de biorreactores de membrana (BRM) combina el proceso físico de separación con el tratamiento biológico. Estos sistemas utilizan membranas de micro y/o ultrafiltración que permiten la retención de sólidos coloidales y suspendidos además de que ha demostrado su utilidad en la remoción de microorganismos patógenos, huevos de helminto y de algunas macromoléculas solubles (Barker y Stuckley, 1999). Los biorreactores de membrana tienen el potencial para subsanar las limitaciones que presentan los reactores biológicos convencionales en el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas ya que a) permiten tiempos largos de residencia de sólidos, b) poseen una alta capacidad para remover microorganismos patógenos, c) permiten separar a la biomasa del licor mezclado sin intervención de la gravedad, d) se obtiene un efluente con muy poca materia orgánica en suspensión y, e) las moléculas solubles de alto peso molecular son retenidas en la membrana.

Existen ya plantas que trabajan a escala real operando exitosamente en varias partes del mundo con esta tecnología, en su modalidad aerobia principalmente. Entre las aplicaciones industriales más frecuentes se encuentran, el reciclaje en edificios de oficinas (Yokomizo et al, 1994), el tratamiento de efluentes municipales de pequeñas poblaciones (Buisson et al, 1998), el tratamiento de efluentes industriales (Berube y Hall 2001), y la depuración de lixiviados de rellenos sanitarios (Manem et al, 1996).

Entre las limitaciones asociadas a esta tecnología se encuentran los altos costos de instalación y operación así como el aún reducido número de aplicaciones en aguas residuales, lo que resulta en escasa experiencia. No obstante, la tendencia actual en el mercado de membranas es la de incrementar el volumen de producción y por lo tanto abatir el costo en virtud de la creciente aceptación de estas tecnologías alrededor del mundo. Otra desventaja importante es el taponamiento de la membrana, lo que aumenta los requerimientos de limpieza, dificulta las condiciones de operación, afecta su desempeño y eleva los costos.

Las aplicaciones de los BRM en sistemas anaerobios son más escasas, y se limitan a efluentes industriales de alta carga (Nagano et al. 1992; Anderson et al. 1996; Choo y Lee 1998; Fakhrulrazi y Noor 1999; Ince et al. 2000; Hu y Stuckey 2001; Lee et al. 2001). Aún así, se ha visto la posibilidad de utilizarlos en efluentes municipales aprovechando las ventajas de la vía anaerobia y mediante la membrana proporcionar una barrera absoluta a sólidos coloidales y suspendidos además de remover patógenos, parásitos y compuestos orgánicos de alto peso molecular.

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y de patógenos, así como el taponamiento de la membrana, de un biorreactor anaerobio de membrana para el tratamiento de agua residual municipal con fines de reutilización.

METODOLOGIA

El reactor se ubicó en la planta de tratamiento de agua residual en Ciudad Universitaria, México D.F. Se construyó un reactor tipo UASB de acrílico cubierto externamente con hojas de acero con un diámetro interno de 0.53 m y 4 m de altura; el nivel de agua se ubicó a 3.85 m, dando un volumen útil de 0.849m^3 . Se acopló al reactor una unidad externa de membrana tubular de ultrafiltración (UF) fabricada por la empresa Koch Membrane Systems (EEUU). El arreglo constó de 6 módulos tubulares de membrana de 3 m de longitud, dando el área necesaria para el filtrado requerido (5.027m^2). El material de la membrana es fluoruro de polivinildieno (PVDF) con tamaño de poro para partículas con peso molecular de 100 000 Da. Su precio de venta fue de US\$225.00 por módulo, sin accesorios.

Parte del agua residual municipal que llega a la planta era conducida hacia el reactor UASB mediante una bomba peristáltica a razón de $0.141\text{ m}^3/\text{h}$. El influente pasaba a través del lecho de lodos granular que ocupaba aproximadamente 20% del volumen del reactor con una velocidad ascendente igual a 0.640 m/h . El lodo utilizado en la inoculación del reactor fue un lodo anaerobio proveniente de un reactor UASB de una planta de tratamiento de agua residual de una industria recicladora de papel. El efluente se colectó en un tanque intermedio de donde era bombeado hacia la unidad externa de membrana de ultrafiltración, mediante una bomba centrífuga horizontal de etapas múltiples marca Goulds, modelo 3AB2/GB, 2 h.p, que impulsa el flujo a $7.05\text{ m}^3/\text{h}$ (31 gal/min), a una presión de 12.5 psi. El permeado fue colectado para su análisis y el rechazo fue recirculado al tanque intermedio (figura 1). El TRH para la etapa biológica fue de 6 horas.

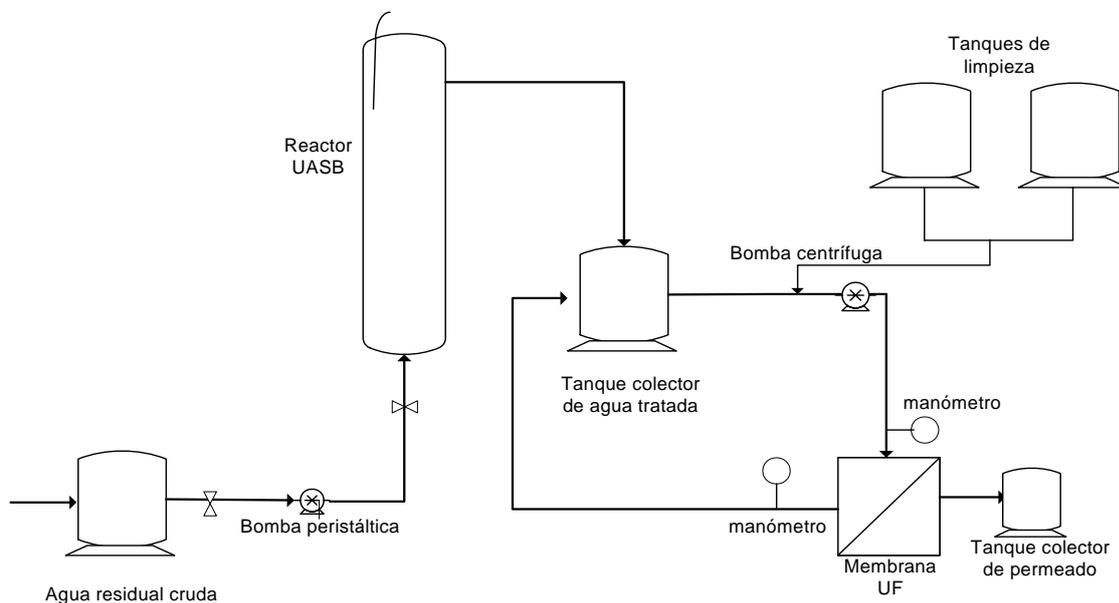




Figura 1. Esquema y fotografía del sistema Biorreactor Anaerobio de Membrana

La evolución del reactor UASB piloto se siguió diariamente mediante la medición de parámetros como temperatura, pH, alcalinidad, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble como se describe en los Métodos Estándar (APHA, AWWA, WPCF ,1999). La relación de alcalinidades se calculó con la alcalinidad medida a un pH de 5.75, dividida entre la alcalinidad total (pH 4.3).

Para la selección de las condiciones de operación el sistema se probó en un arreglo de membranas en serie y fue sometido a distintas presiones transmembrana, TMP (10, 20, 30, 40, 50, 60 psi) y velocidades de flujo (1, 1.5 y 2 m/s). Para cada caso se midió el flux (J_p caudal permeado por unidad de área de membrana) en intervalos de 1 hora.

El reactor se operó en continuo durante 3 meses bajo las condiciones de operación seleccionadas. Se probaron estrategias de limpieza usando distintas concentraciones de Hipoclorito de Sodio (NaClO) para recuperar el flux permeado. Se evaluó el desempeño del MBR en la remoción de DQO, Sólidos totales, huevos de helmintos y coliformes fecales.

RESULTADOS

Evaluación del desempeño del reactor UASB - membrana

La evolución del arranque del piloto se siguió mediante la medición de parámetros como temperatura, pH, alcalinidad, SST, SSV, DQO total y soluble. La temperatura del reactor se mantuvo entre 19 y 22° C. El influente presentó pequeñas variaciones en el pH manteniéndose dentro del intervalo óptimo (6.8– 7.2) para llevar a cabo el proceso anaerobio. La relación de alcalinidades que presentó el sistema se encontró entre un intervalo adecuado de 0.6 a 0.7.

Las concentración de SST en los tres puntos de muestra del sistema (entrada UASB, salida UASB correspondiente a la entrada del módulo de membranas, y salida de este) se presenta en la figura 2. Se identifica una tendencia hacia la estabilización del efluente del UASB en alrededor de 40 mg/l y una concentración de salida (permeado) de prácticamente cero. La remoción de sólidos suspendidos en el punto intermedio fue de 84% y del 99.7% a la salida final.

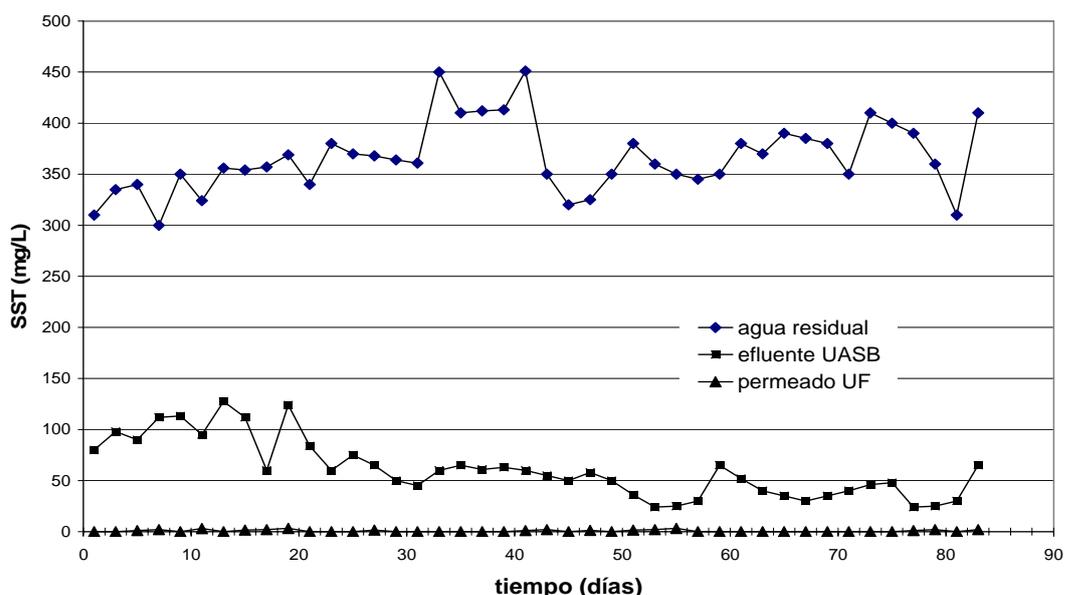


Figura 2. Concentración de sólidos suspendidos totales en tres puntos del arreglo UASB – membrana.

Por su parte, el registro de la DQO soluble en los tres puntos de muestreo se presenta en la figura 3. Este parámetro se mostró relativamente estable en la salida del sistema, con valores de 38 mg/l en promedio. La eficiencia de remoción del reactor UASB fue de 50% y de 83% para el sistema completo.

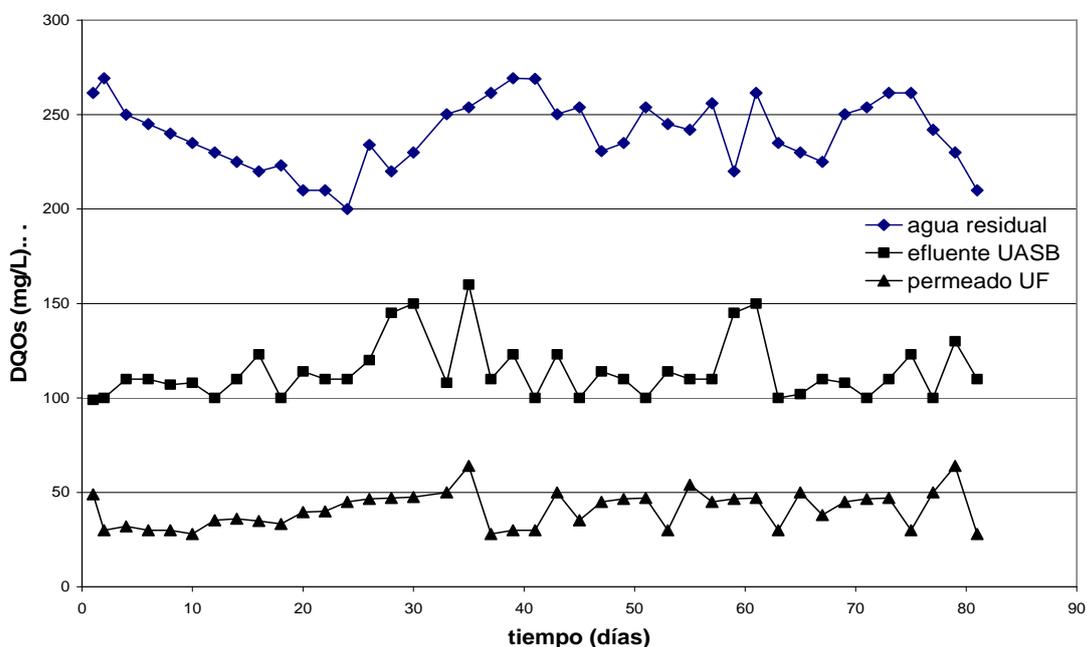


Figura 3. Concentración de DQO soluble en tres puntos del arreglo UASB – membrana.

Los resultados obtenidos hasta la fecha sobre la remoción de coliformes fecales y helmintos se muestran en la tabla 1. La eliminación de ambos contaminantes biológicos es del 100% para el sistema, y de 60% y 19% para helmintos y coniformes fecales, respectivamente, en el caso del reactor UASB únicamente.

Tabla 1. Eficiencias de remoción del Biorreactor Anaerobio de Membrana

Prueba analítica	Influente	Efluente UASB	Permeado	% remoción
DQOt mg O ₂ / L	650	198	80.5	87.62
DQOs mg O ₂ / L	230	115	38	83
STT mg/ L	962.36	495.18	330.09	65.7
SST mg/ L	370	60	1	99.7
HH HH / L	25	10	0	100
CF (NMP/100ml)	4.26 x 10 ⁶	3.46 x 10 ⁶	0	100
Turbiedad (FAU)		68	1	-
N-NH ₄ (mg/L)	18	14	14	0

Operación del módulo de membranas

El efecto de la velocidad de flujo sobre el flux perneado (Jp) se muestra en la figura 4. Se corrieron pruebas empezando con la velocidad de flujo mayor y la menor presión transmembrana (TMP). Se midió el flux obtenido para cada presión en intervalos de 1 hora. Como era de esperar, el flux perneado obtenido en cada TMP incrementa al incrementar la velocidad de flujo. Con base en los resultados anteriores, se fijó la velocidad de flujo en 2.25 m/s para operar el sistema.

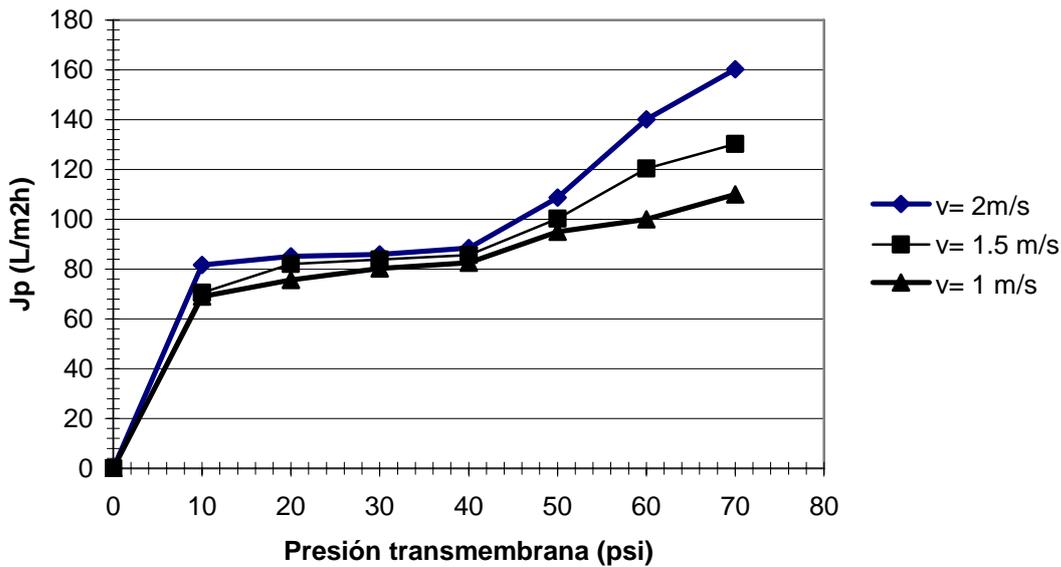


Figura 4. Variación del flux perneado (Jp) en función de la presión transmembrana a diferentes velocidades de flujo dentro de la membrana.

La evaluación del flux obtenido a distintas TMP mostró en todos los casos un comportamiento típico del taponamiento de la membrana. Este ocurre rápidamente en los primeros minutos de operación, para después disminuir gradualmente hasta permanecer casi constante. La Figura 5 presenta la evolución típica de este fenómeno.

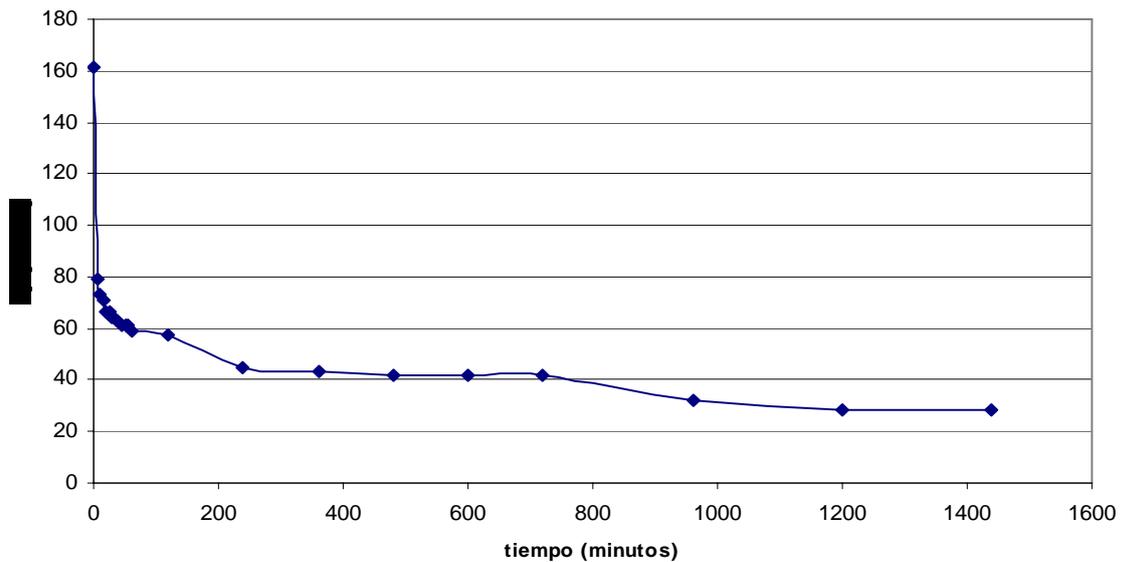


Figura 5. Evolución del flux en el tiempo a condiciones de presión y caudal fijos (20 psi, 2 l/s) y velocidad de 2.2 m/s).

Por otro lado, a presiones mayores, el J_p resultó menor, como lo muestra la Figura 6, en donde se grafican los datos correspondientes a la pendiente máxima para cada TMP aplicada (velocidad de taponamiento).

Se observa que a una presión transmembrana entre 10 y 30 psi se obtiene la menor velocidad de taponamiento, por lo que se eligió este intervalo para trabajar el sistema.

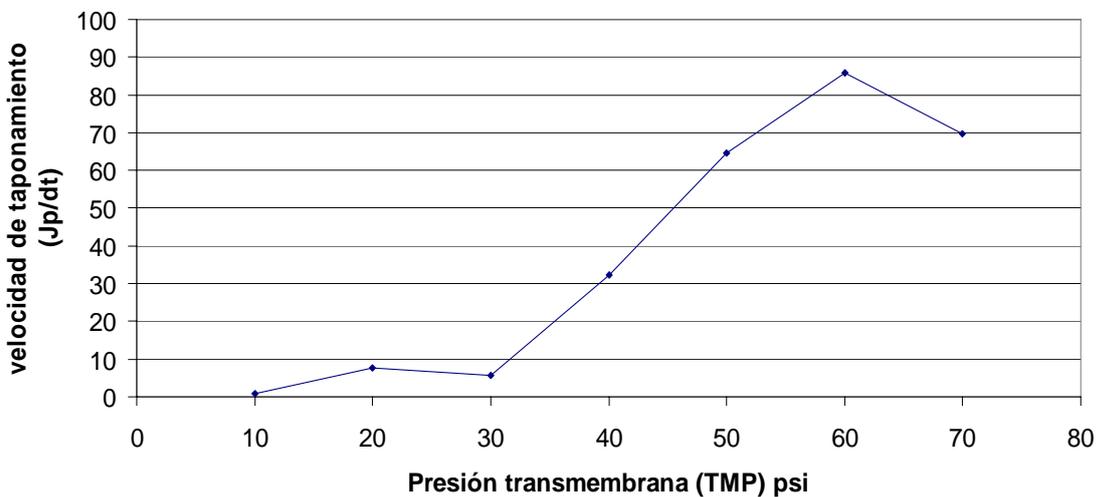


Figura 6. Relación entre velocidad de taponamiento y presión aplicada

Se operó en continuo bajo las condiciones de operación seleccionadas evaluando el J_p obtenido cada hora hasta presentar una disminución considerable en este parámetro. Acto seguido se efectuaba la limpieza de la membrana, primero con agua y después con una solución de hipoclorito de sodio. Para definir la concentración de la solución de limpieza se realizó un experimento a tres diferentes concentraciones (100, 200 y 300 mg/l). La figura 7 muestra que la concentración mayor recupera en menor tiempo el flux inicial, dos horas para este caso.

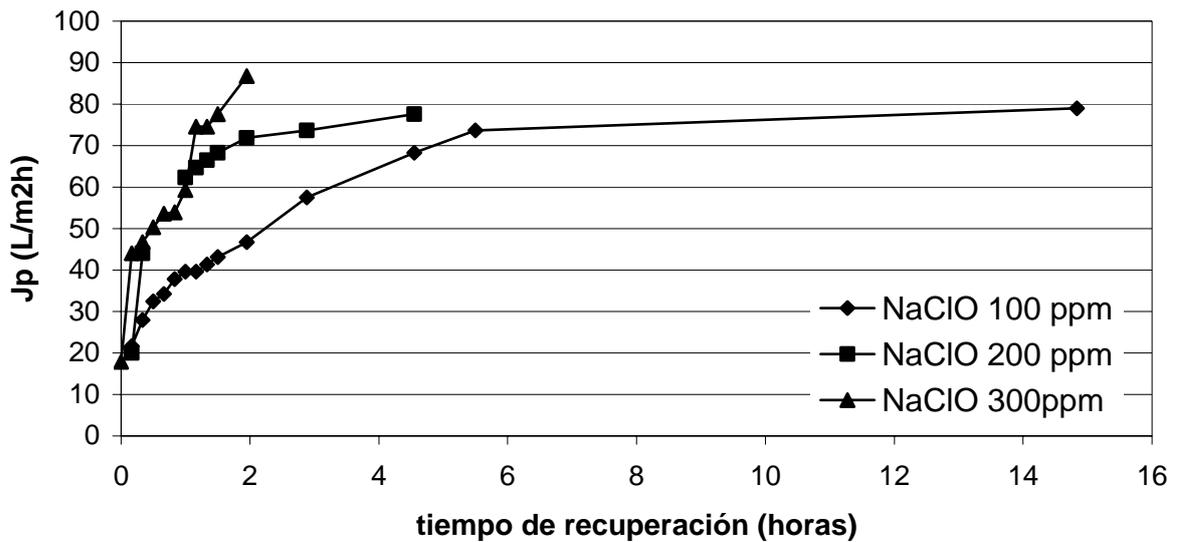


Figura 7. Recuperación del flujo durante la limpieza de las membranas con diferentes concentraciones de hipoclorito.

La operación siguió por 3 meses y la limpieza se efectuó una vez cada día. En los primeros 30 días se recuperó el permeado disminuyendo gradualmente en los siguientes meses de operación. El flujo permeado disminuyó sin que la limpieza química recuperara el filtrado inicial.

La figura 8 presenta un resultado de la evolución del flux y las operaciones de limpieza obtenido durante la experimentación.

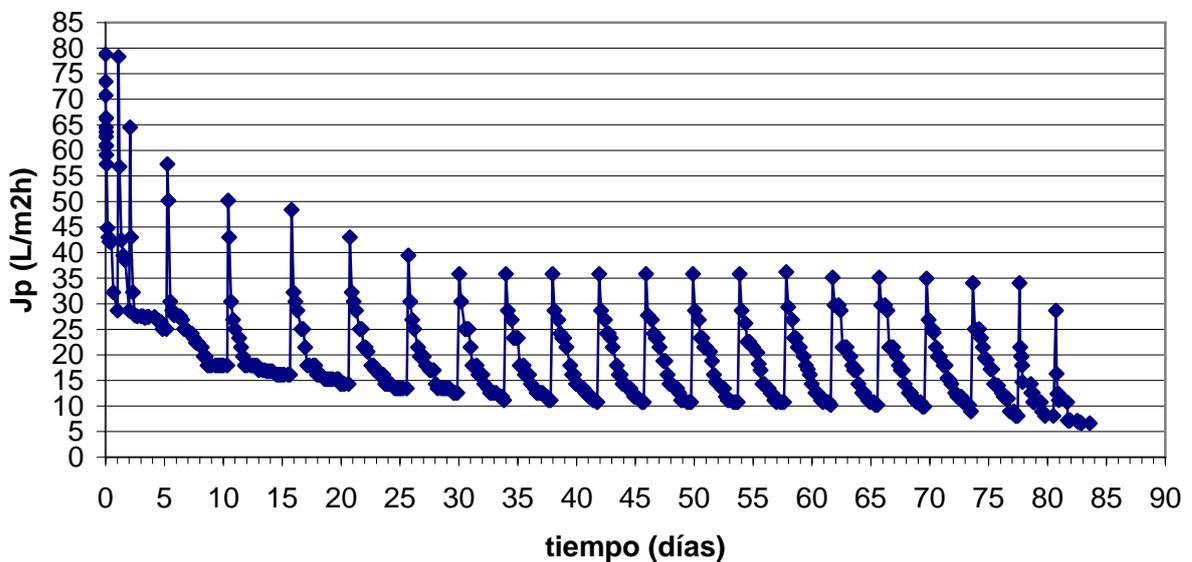


Figura 8. Evolución del flux y efecto de la limpieza con hipoclorito a 300 mg/l

En su etapa "estable" el sistema BRM produjo 0.053 m³/h de permeado, lo que representa el 36 % del flujo alimentado al reactor UASB, en este arreglo particular.

CONCLUSIONES

El reactor tuvo un desempeño satisfactorio, demostrando que el sistema es factible técnicamente si las condiciones de operación son adecuadas. Las condiciones de operación en la parte biológica (TRH= 6 h) de este sistema proporcionaron un efluente de tal modo que al combinarse con las condiciones de operación en la parte filtrante ($v= 2$ m/s, TMP = 12.5 psi) se logró minimizar la frecuencia de limpieza química y retrasar el ensuciamiento irreversible. El permeado cumple ampliamente con los estándares fijados por la normatividad mexicana para reutilización del agua.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México, dentro del marco del convenio con la National Science Foundation (NSF) de los Estados Unidos, proyecto 2003-CO3-42441.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF (1999) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 20th Edition, American Public Health Association, Washington, DC.
2. Anderson, G. K., Kasapgil, B., and Ince, O. (1996). Microbial kinetics of a membrane anaerobic reactor system. *Environmental Technology*, 17:449-464.
3. Barker, D.J., and Stuckey, D.C. (1999) A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems, *Water Research*, 33(14):3063-3082.
4. Berube, P.R. and E.R. Hall. 2001. Fate and removal kinetics of contaminants contained in evaporator condensate during treatment for reuse using a high-temperature membrane bioreactor. *Journal of Pulp and Paper Science* 27(2): 41-45.
5. Buisson, H., P. Cote, M. Praderie and H. Paillard. 1998. The use of immersed membranes for upgrading wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 37(9): 89-95.
6. Choo, K. H., and Lee, C. H. (1998). Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Water Research*, 32:3387-3397.
7. Chernicharo, C.A.L. (2006) Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5:73-92
8. Fakhurulrazi, A., and Noor, M. J. M. M. (1999) Treatment of palm oil mill effluent with the membrane anaerobic system. *Water Science Technology*, 39:159-163.
9. Foresti, E., Zaiat, M. y Vallero, M. (2006) Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives and challenges, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5:3-19
10. Hu, A. Y., and Stuckey, D. C. (2001). In tank anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment. *Proc., MBR3 Conference*, Cranfield, 56-64.
11. Ince, B. K., Ince, O., Salls, P. J., and Anderson, G. K. (2000). Inert COD production in a membrane anaerobic reactor treating brewery wastewater. *Water research*, 34:3943-3948.
12. Lee, S. M., Jung, J. Y., and Chung, Y. C. (2001). Novel method for enhancing permeate flux of gas sparged ultrafiltration with tubular membranes. *Chemical Engineering Journal*, 67:71-75.
13. Manem, J.A.S. 1996. Membrane bioreactor, in *Water Treatment Membrane Processes*, ed. J. Mallevialle, P.E. Odendaal and M.R. Wiesner, 17.1-17.31. New York, NY: McGraw Hill.
14. Nagano, A., Arikawa, E., and Kobayashi, H. (1992). The treatment of liquor wastewater containing high strength suspended solids by membrane bioreactor system. *Water Science Technology*, 26:887-895.
15. Yokomizo, T. 1994. Ultrafiltration membrane technology for regeneration of building wastewater for reuse. *Desalination* 98: 319-326.