

PERSPECTIVAS DEL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE DESTILERÍAS Y PLANTAS DE DERIVADOS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

PERSPECTIVES OF DISTILLERY AND BY-PRODUCTS INDUSTRIES WASTE MANAGEMENT USING MEMBRANES TECHNOLOGIES

Manuel Díaz de los Ríos^{1} y Yaniris Lorenzo Acosta¹*

*¹Instituto Cubano de los Derivados de la caña de azúcar (ICIDCA), Vía Blanca 804, Esq. C.
Central, Ciudad Habana, Cuba.*

Recibido: Febrero 3, 2017; Revisado: Enero 17, 2018; Aceptado: Febrero 12, 2018

RESUMEN

El presente trabajo muestra el estado del arte sobre las posibilidades de las técnicas de microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa como alternativa para el manejo de las vinazas de destilerías, así como otros residuos líquidos provenientes de la agroindustria azucarera. Dichas técnicas han sido ensayadas con resultados promisorios como alternativa para la concentración de vinazas de destilerías y residuos de la producción de etanol a partir de granos, en sustitución de los tradicionales evaporadores. Para el caso de las vinazas se reportan valores de 75-99% de reducción de color, 70-99% de la materia orgánica y entre un 60-99% de remoción de sólidos, en dependencia del tipo de membranas o combinaciones de estas que se empleen. A partir de los resultados reportados por diversos autores se evalúa y simula en Microsoft Excel un sistema para el tratamiento de vinazas de dos etapas y se estima su eficiencia en la eliminación de sólidos totales, materia orgánica, así como sus costos de inversión y operación.

Palabras clave: etanol; membranas; microfiltración; ósmosis inversa; ultrafiltración; vinaza.

ABSTRACT

A review of microfiltration, ultrafiltration and reverse osmosis techniques as alternative for both vinasses and sugar agroindustry wastewater management is showed in this paper. These techniques have been tested satisfactory in vinasse concentration in factories which produce ethanol from grains, in substitution of conventional evaporators systems. The experiences with vinasses showed values of 75-99% for color retention,

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Manuel Díaz, Email: manuel.diaz@icidca.azcuba.cu

70-99% for organic matter retention and between 60-99% of solid retention, depending of both membranes and membranes combination selected. From the results reported by several authors a two stages system for vinasse treatment is simulated in order to estimate its efficiency in total solids and organic matter retention and its investment and operation cost.

Key words: ethanol; membranes; microfiltration; reverse osmosis; ultrafiltration, vinasse.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de separación y purificación de productos mediante tecnologías de membranas han tenido un gran éxito en el campo de la biotecnología, donde están involucrados relativamente bajos volúmenes de productos de alto valor agregado. En un inicio estas técnicas resultaban en extremo costosas, dado el alto valor de las membranas, el limitado tiempo de vida para las mismas y la operación con altas presiones. Sin embargo, el ulterior desarrollo de estas tecnologías y la aparición de las membranas de cerámica, cuya durabilidad puede alcanzar varios años, ha permitido extender estos procesos al tratamiento de efluentes industriales, donde los volúmenes tratados son significativamente superiores.

Internacionalmente hoy se reportan estudios y aplicaciones de las tecnologías de membranas para el tratamiento de una gran diversidad de efluentes industriales, entre los que se destacan el tratamiento de residuales urbanos (Nguyen y col., 2007) y en la industria alimenticia (Muro y col., 2009), entre otros. Sin embargo, este resume las experiencias alcanzadas con estas tecnologías en el tratamiento de residuales provenientes de la industria azucarera, en particular en el tratamiento de vinazas de destilerías; compilar sus resultados y estimar las alternativas más promisorias.

Las tecnologías de membranas han sido evaluadas con resultados alentadores en el manejo de vinazas y otros efluentes resultantes de la producción de etanol a partir de diversas materias primas. Una excelente revisión sobre el estado del arte en la temática ha sido publicada por Shivajirao (2012). El tratamiento de los residuos líquidos resultantes de la producción de etanol a partir de maíz mediante membranas ha sido ampliamente estudiado por (Arora y col., 2011-a). La ultrafiltración (UF) del residuo fino, resultado de la centrifugación de la vinaza generada en los procesos de producción de etanol a partir de maíz ha sido evaluada con membranas de 10 y 100 kDa, logrando retener entre el 22 y 27% de los sólidos y hasta un 60% de cenizas, con lo que se reducen los gastos en concentración mediante evaporación (Arora y col., 2011-b). Otros trabajos de estos autores han sido dirigidos hacia la elaboración de los modelos que caracterizan el sistema, (Arora y col., 2009) y (Arora y col., 2010). Wu en 1988 también investigó la purificación de aguas residuales resultantes de la producción de etanol de maíz mediante la combinación de ultrafiltración y ósmosis inversa (RO) con el propósito de separar fracciones solubles de esta corriente, logrando un permeado final con solo el 0,32-1,3% de nitrógeno y 0,13-0,41% de sólidos totales Wu (1988).

(Lapisova y col., 2006) estudiaron diversas alternativas de tratamiento de residuos de la destilación de etanol producido a partir de papas. En su estudio emplearon combinación

de membranas de microfiltración (MF) y UF en el rango de 1,4 μm a 5 kDa. Los mejores resultados se obtuvieron con métodos combinados de MF de 0,2 μm seguido por membranas de entre 15 y 50 kDa con las que logró hasta un 80% de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y un 59% de los sólidos totales (ST).

Las vinazas resultantes de la fermentación de mieles y jugos de caña de azúcar han sido también objeto de estudio mediante técnicas de separación con membranas para diversos propósitos. (Rennola y col., 2007) efectuaron ensayos de UF con membranas de 0,005 μm para el tratamiento de vinazas con la ayuda de coagulantes, concluyendo que la eficiencia de los coagulantes empleados es baja; no obstante, se reportan resultados de remoción del color de 87-94% y entre un 76-85% de remoción de la turbidez. (Gutiérrez y col., 2009), evaluaron la concentración de vinazas mediante UF con el empleo de membranas de cerámica de 1 y 15 kDa y con variaciones de la presión trans-membrana entre 0,1-0,7 MPa. Los mejores resultados se obtuvieron con la membrana de 1 kDa, la cual permitió remover el 58% de los sólidos totales, el 70% de la materia orgánica (MO), el 92% de la turbidez y el 82% del color.

Las experiencias de (Nataraj y col., 2006) durante el tratamiento de vinazas con etapas combinadas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) con altas presiones (7 MPa) permitieron alcanzar eliminaciones de la DQO, del contenido de potasio y de los sólidos disueltos de hasta un 99,9%. Otras alternativas de procesos combinados han sido ensayadas por (De Moraes, 2011), (Murthy y Chaudhari, 2009). Los primeros seleccionaron combinaciones de MF (0,2 μm) con NF (300, 500 y 1000 Da), siendo esta última (1000 Da) la que reportó los mejores resultados para presiones de 3,5 MPa, dados por un mayor flujo de permeado y retención del 80% de los sólidos totales y entre 60-70% de los sólidos disueltos, las cenizas y el contenido de potasio. (Murthy y Chaudhari, 2009) optaron por evaluar alternativas de UF con RO logrando retener los sólidos disueltos, DQO, DBO, sulfatos y el potasio en 97,9%, 96,8%, 97,9%, 99,7% y 94,65% respectivamente.

El análisis de todos estos ensayos evidencia que el empleo de métodos combinados reporta mejores resultados que los procesos simples, sobre todo, cuando la última etapa se corresponde con un proceso de RO o una NF con un diámetro de membrana de bajo corte.

El pretratamiento (Chang y col., 1994) y post-tratamiento de los efluentes líquidos vinculados a la producción de biogás constituyen otras experiencias de interés para la agroindustria azucarera; la primera con el propósito de eliminar sustancias inhibitoras del proceso de bioconversión, mientras que la segunda alternativa ha estado dirigida a alcanzar los requerimientos normados para el vertimiento de estos residuos.

El presente trabajo considera las experiencias internacionales registradas en el tratamiento de vinazas mediante membranas y, con el auxilio de la simulación, proponer combinaciones de membranas que resulten más promisorias para este propósito desde el punto de vista técnico y económico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de los resultados obtenidos por diversos investigadores se formula un modelo en Microsoft Excel dirigido a determinar la mejor combinación de membranas para

clarificación de vinazas dirigido a minimizar la razón valor de inversión/ flujo de permeado, ya que se desea una inversión mínima con un flujo de permeado máximo, sujeto a las siguientes restricciones:

- Presiones de operación restringidos por los rangos establecidos para cada tipo de membrana.
- La máxima concentración de ST y MO en los flujos concentrados en cada etapa no debe exceder el 65% para facilitar su extracción de forma fluida.

Para determinar el nivel de remoción de ST y MO fueron digitalizadas las curvas reportadas por diversos autores en función de la presión y ajustados modelos de regresión, los que fueron utilizados en el modelo para predecir el comportamiento de la etapa. Los valores de remoción reportados en tablas fueron igualmente ajustados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Valoración de alternativas de tratamiento estudiadas

Los efluentes líquidos de la agroindustria azucarera son considerados como uno de los más agresivos para el medioambiente en nuestro país, dada su alta carga de materia orgánica y elevado contenido de sólidos. Entre estos se destacan los resultantes de la producción de etanol a partir de mieles de caña, conocidos como vinazas, pues en las mieles se concentran todos los componentes que son rechazados durante el proceso de producción de azúcar. En la Tabla 1 se brindan las características más importantes de estos efluentes, donde es posible apreciar la superioridad agresiva de las vinazas de destilerías frente a los resultantes de las producciones de levadura forrajera y biogás, donde la materia orgánica logra ser disminuida en un 50-70% mediante su bio-transformación en productos de significativo valor.

Tabla 1. Características de los efluentes de la agroindustria azucarera (Dpto. CENGMA, ICIDCA)

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Vinaza</i>	<i>Residuales de Biogás</i>	<i>Residuales de Torula</i>
Demanda química de oxígeno (DQO)	g/L	43-70	5-15	11,4-21,5
Demanda biológica de oxígeno (DBO)	g/L	22-35	2,5- 7,5	4,5-11,7
Sólidos totales (ST)	g/L	43,4-50,9	11-27	6,6-18,8
Sólidos totales fijos (STF)	g/L	8,9-13,8	5,9-11	0,86-8,8
Sólidos totales volátiles (STV)	g/L	29,6-39,7	5,8 -8	4,7-10,6
Sólidos disueltos totales (SDT)	g/L	27-45	8-18	6,0-16,8
Sólidos disueltos fijos (SDF)	g/L	3,8-12,1	3,8-11	0,8-8,0
Sólidos disueltos volátiles (SDV)	g/L	23,1-32,8	4,2-7,2	4,5-9,3
Sólidos suspendidos totales (SST)	g/L	5,98-9,7	3,0- 11,1	0,6-2,0
Sólidos suspendidos fijos (SSF)	g/L	1,38-1,5	0,4-5,6	0,02-0,8
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	g/L	1,3-8,2	0,7-5,5	0,3-1,3
Sulfatos	g/L	0,1-2,7	0,014-1,7	NE
pH	-	3,98-4,7	6,7-7,8	4-7
Cloruros	g/L	0,1-2,50	0,01-0,1	NE
Potasio	g/L	2,5-4,3	1,5-2,8	NE

Fósforo	g/L	0,2-0,8	0,1-0,2	0,4-1,0
Nitrógeno	g/L	0,21-1,1	0-0,01	0,14

Aunque el tratamiento de vinazas de destilerías ha sido el objetivo más abordado por investigadores y suministradores de tecnologías de membranas en el contexto de los residuales de la agroindustria azucarera, otros residuos líquidos han sido, y continúan siendo objeto del interés de este sector, ya que las regulaciones nacionales e internacionales para el vertimiento de aguas en ríos y mares son cada día más exigentes, mientras que procesos antes considerados como adecuados, dado los niveles de reducción del DQO logrados, como es el caso de la producción de Biogás, hoy no cumplen los estándares establecidos para el vertimiento (NC: 27: 2012).

De esta forma, las tecnologías de membrana resultan de interés para el manejo de efluentes de las siguientes industrias:

- Vinazas de destilerías que operan con mieles y jugos de caña de azúcar.
- Pre-tratamiento de vinazas para la elevación de su conversión a metano.
- Post-tratamiento de residuales líquidos provenientes de la producción de Biogás.
- Pre-tratamiento de vinazas para la elevación de su conversión en levadura forrajera.
- Tratamiento de residuales líquidos provenientes de la producción de Levadura Forrajera.

La experiencia internacional evidencia que el empleo exitoso de las tecnologías de membranas exige brindar la mejor solución a aquellos factores que inciden en la economía del proceso. En primera instancia se debe destacar la importancia de la reducción de las incrustaciones en la membrana, ya que ello incrementa los costos de operación y reduce la vida útil de las mismas, por lo que muchos autores coinciden en la necesidad de algún tipo de pretratamiento previo a la filtración con membranas; estos pueden considerar etapas de clarificación-sedimentación con o sin la adición de coagulantes, centrifugación y/o filtraciones convencionales. La selección del tipo de membrana y combinaciones de estas constituye un factor determinante en la eficiencia del proceso, el que dada las características de estos residuos depende de una valoración totalmente experimental.

Otro factor de vital importancia consiste en la determinación de las condiciones de operación, por cuanto es deseable lograr el mayor flujo de permeado posible a la par de una mayor retención de sólidos totales, DQO y color. El incremento de la presión transmembrana favorece el aumento del flujo de permeado y la retención de compuestos indeseables, pero a su vez incrementa las demandas de energía por bombeo y eleva los costos de inversión y operación.

Los niveles de remoción de algunos elementos de la composición de las vinazas aparecen resumidos en la Tabla 2. En la misma se muestran los resultados reportados por diversos autores en cuanto a remoción de sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), así como Materia orgánica (DQO), y potasio. Los mejores resultados se reportan para los procesos en dos etapas, particularmente aquellos que cierran con ósmosis inversa.

Tabla 2. Niveles de remoción de ST, SDT, SST, DQO, cloruros y potasio según diversos autores

<i>Referencia</i>	<i>Membrana</i>	<i>Presión (MPa)</i>	<i>ST (%)</i>	<i>SDT (%)</i>	<i>SST (%)</i>	<i>DQO (%)</i>	<i>K (%)</i>
(Gutiérrez y col., 2009)	1 kDa	0,7	58	-	-	70	-
(Gutiérrez y col., 2009)	15 kDa	0,7	52	-	-	60	-
(Nataraj y col., 2006)		7	-	99	-	98,9	99,80
(De Moraes, 2011)	100 kDa	0,34	40	36,8	100	-	13,80
(De Moraes, 2011)	0,2 um	0,34	40	32	100	-	17,80
(De Moraes, 2011)	100 kDa + 300 Da	3,5	81,4	-	100	-	54,31
(De Moraes, 2011)	100 kDa + 500 Da	3,5	85	-	100	-	62,07
(De Moraes, 2011)	100 kDa + 1000 Da	3,5	83,8	-	100	-	65,52
(De Moraes, 2011)	0,2 um + 300 Da	3,5	83,2	-	100	-	81,09
(De Moraes, 2011)	0,2 um + 500 Da	3,5	83,8	-	100	-	73,70
(De Moraes, 2011)	0,2 um + 1000 Da	3,5	80,8	-	100	-	69,59
(Murthy y Chaudhari, 2009)		2,0	-	97,9	95,5	96,8	94,65

3.2 Simulación de un posible esquema para tratamiento de vinazas

De acuerdo con estas experiencias internacionales es posible modelar el comportamiento de estos sistemas frente a algunos de los efluentes de la industria para disponer de una orientación sobre el nivel de descontaminación esperado al aplicar las tecnologías de membranas. Por supuesto, los resultados de la simulación constituyen un indicador orientativo y en ningún caso sus resultados pueden ser tomados como absolutos, pues aun cuando se trate de efluentes con propiedades físicas globales semejantes a las analizadas, las membranas de UF, NF y RO remueven los compuestos sobre la base del tamaño de las moléculas y la naturaleza química de los efluentes puede variar significativamente en función de diversos factores, tales como: tipo de suelos, variedad de caña empleada y particularidades de los procesos productivos de etanol, azúcar y/o levadura.

En principio puede ser considerado un proceso de tres etapas, compuesto por una etapa primaria de clarificación, decantador centrífugo o filtración convencional dirigido a la separación de los sólidos suspendidos para reducir los niveles de obstrucción de membranas y los ciclos de limpieza de estas. Posteriormente se requerirán, al menos, dos etapas de separación por membranas; una primera etapa dirigida a retener el mayor nivel de materia orgánica y compuestos de altos pesos moleculares con una mínima reducción del flujo de permeado, la cual puede consistir en una etapa de MF o UF. La segunda etapa de separación por membranas debe garantizar el mayor flujo de

permeado con el máximo nivel de retención para garantizar un permeado reutilizable en el proceso o que pueda ser vertido sin restricción, por lo que es posible pensar en una etapa de NF o RO. El flujo final de sólidos y materia orgánica retenida puede ser destinado hacia la elaboración de fertilizante orgánico o compost. El tipo de esquema propuesto y evaluado se ilustra en la Figura 1, donde se procesan 33 t/h de vinazas.

En el ejemplo de la Figura 1 se logra remover el 99,1% de la materia orgánica y el 99,4% de los sólidos totales, además de permitir la obtención de un permeado con un 0,04% de ST y un 0,06% de MO.

Las variables respuestas evaluadas fueron porcentaje de retención de ST (%RST), materia orgánica (%RMO), contenidos porcentuales de ST y MO en el permeado respectivamente (%STp y %MOp), áreas de filtración de cada etapa, valor de inversión y costo de operación.

Los resultados de la simulación del proceso para diversas combinaciones de membranas en las etapas 1 y 2 se muestran en la Tabla 3. Como era de esperar, en todos los casos las respuestas indicaron la conveniencia de trabajar a las máximas presiones en cada etapa dentro de los rangos establecidos como permisibles. El porcentaje de recobrado promedio fue del 82,24% del flujo de alimentación.

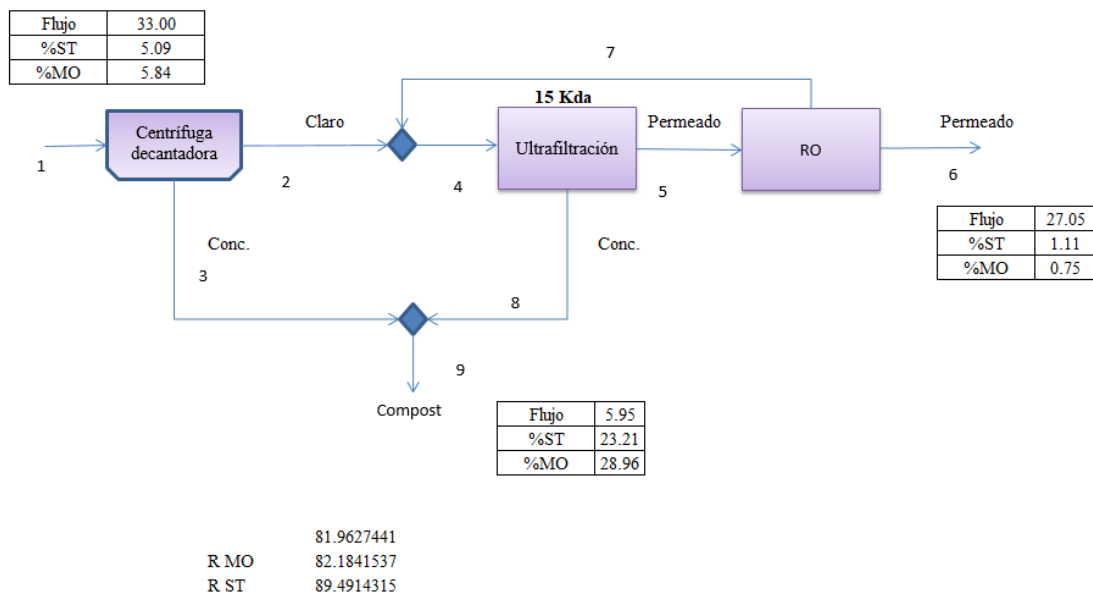


Figura 1. Posible esquema para el tratamiento de vinazas mediante membranas

Los mejores resultados se obtuvieron cuando se trabaja la segunda etapa con las membranas de RO, algunos de los cuales son coincidentes con los menores valores de inversión (menor área) y por consiguiente con menores costos de operación, al depender estos del área filtrante (mayor gasto en bombeo, limpieza y reposición de membranas). La inversión total oscila entre 0,68-1,3 MM de USD, mientras que los costos de operación están en el entorno de los 3-7 \$/t de vinaza.

Tabla 3. Resultados de la simulación en diversos esquemas de dos etapas

<i>Etapa 1</i>	<i>Etapa 2</i>	<i>Flujo de permeado % Aliment</i>	<i>R-ST (%)</i>	<i>R-MO (%)</i>	<i>STp (%)</i>	<i>Mop (%)</i>	<i>Presión etapa 1 (bar)</i>	<i>Área 1 (m2)</i>	<i>Área 2 (m2)</i>	<i>Inversión (MM \$)</i>	<i>Costo (\$/t)</i>
1 Kda	300 Da	81,73	92,56	84,77	0,95	0,53	35,00	1251	316	1,23	6,69
1 Kda	500 Da	81,70	92,56	87,18	0,80	0,53	35,00	1253	398	1,29	7,03
1 Kda	1000 Da	81,69	92,56	86,25	0,86	0,53	35,00	1251	164	1,13	6,10
1 Kda	RO	81,13	98,76	99,39	0,04	0,09	19,93	1269	369	1,28	6,97
15 Kda	300 Da	81,96	89,49	80,38	1,22	0,75	35,00	885	316	1,02	5,28
15 Kda	500 Da	81,96	89,49	83,32	1,04	0,75	35,00	885	399	1,08	5,61
15 Kda	1000 Da	81,96	89,49	82,18	1,11	0,75	35,00	885	164	0,92	4,68
15 Kda	RO	39,36	95,20	89,35	0,10	0,26	19,93	889	179	0,93	4,75
50 Kda	300 Da	81,52	94,47	84,86	0,95	0,40	35,00	514	315	0,81	3,84
50 Kda	500 Da	81,53	94,47	87,25	0,80	0,40	35,00	516	397	0,86	4,17
50 Kda	1000 Da	81,52	94,47	86,33	0,85	0,40	35,00	516	164	0,70	3,25
50 Kda	RO	81,12	99,10	99,39	0,04	0,07	19,93	524	369	0,85	4,08
0,2 um	300 Da	83,15	76,40	72,19	1,70	1,66	35,00	712	321	0,92	4,63
0,2 um	500 Da	83,14	76,40	75,93	1,47	1,66	35,00	712	405	0,98	4,96
0,2 um	1000 Da	83,02	76,40	74,47	1,57	1,66	35,00	712	167	0,82	4,02
0,2 um	RO	81,43	95,41	98,66	0,08	0,33	19,93	734	370	0,97	4,91
100 Kda	300 Da	83,15	76,40	72,86	1,66	1,66	35,00	753	321	0,95	4,78
100 Kda	500 Da	83,16	76,40	76,55	1,44	1,66	35,00	753	405	1,00	5,11
100 Kda	1000 Da	83,02	76,40	75,10	1,53	1,66	35,00	753	167	0,84	4,18
100 Kda	RO	81,46	95,41	98,72	0,08	0,33	19,93	776	370	0,99	5,07
150 Kda	300 Da	83,12	76,01	75,01	1,53	1,68	35,00	476	321	0,79	3,71
150 Kda	500 Da	83,19	76,01	78,51	1,32	1,68	35,00	476	405	0,84	4,04
150 Kda	1000 Da	83,06	76,01	77,15	1,40	1,69	35,00	476	167	0,68	3,11

Kda	Da										
150 Kda	RO	81,46	95,31	98,85	0,07	0,34	19,93	491	370	0,83	3,96
300 Kda	300 Da	83,49	72,66	77,80	1,35	1,91	35,00	470	322	0,78	3,69
300 Kda	500 Da	83,48	72,66	81,03	1,16	1,91	35,00	470	407	0,84	4,02
300 Kda	1000 Da	83,36	72,66	79,77	1,24	1,91	35,00	470	167	0,68	3,08
300 Kda	RO	81,52	94,46	99,02	0,06	0,40	19,93	490	370	0,83	3,96

3.3. Consideraciones económicas

Según informaciones provenientes de diversos suministradores, una instalación de este tipo, para el tratamiento de 30-35 t/h de vinazas puede representar una inversión de entre 0,68 – 1,3 MM de USD. Los elementos más importantes de los costos de operación constituyen los gastos energéticos por bombeo (0,5 kWh/m² de área filtrante) (Arora y col., 2011-b), la reposición de membranas (aproximadamente el 20% del costo de adquisición del sistema) Shivajirao (2012) y los costos de limpieza de estas (Arora y col., 2011-b).

4. CONCLUSIONES

1. El análisis de los resultados obtenidos por diversos autores en el manejo de vinazas con membranas y su extrapolación a las características de los residuales de la agroindustria azucarera cubana, permite inferir la alta atracción de estas técnicas para el tratamiento de efluentes de este sector y la importancia de disponer de informaciones prácticas precisas sobre las aplicaciones internacionales y su evaluación experimental para las condiciones cubanas.
2. Los resultados de la simulación expuestos en este trabajo ratifican la necesidad de operar con las máximas presiones dentro de los rangos permisibles para cada tipo de membrana y cerrar con etapas de NF y RO para lograr altos niveles de remoción de sólidos y DQO. La estimación de los costos de tratamiento indicó que los mismos son moderados y constituyen un incentivo para la recuperación de agua en esta industria.

REFERENCIAS

- Arora, A., Dien, B., Belyea, R., Wang, P., Singh, V., Tumbleson, M., y Rausch, K., Thin stillage fractionation using ultrafiltration: resistances in series model., *Bioprocess Biosyst Eng.*, Vol. 32, No. 2, 2009, pp. 225-233.
- Arora, A., Dien, B., Belyea, R., Singh, V., Tumbleson, M., y Rausch, K., Heat transfer model characteristics of microfiltered thin stillage from the dry grind process., *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 16, 2010, pp. 6521-6527.
- Arora, A., Dien, B., Belyea, R., Wang, P., Singh, V., Tumbleson, M., y Rausch, K., Ultrafiltration of Thin stillage from conventional and E-mill Dry Grind Processes., *Appl. Biochem Biotechnol*, Vol. 164, No. 1, 2011-a, pp. 58-67.
- Arora, A., Set, A., Dien, B., L, Belyea, R., Wang, P., Singh, V., Tumbleson, M., y

- Rausch, K., Microfiltration of thin stillage: Process simulation and economic analysis., *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, No. 1, 2011-b, pp. 113-120.
- Chang, I., Choo, K., Lee, C., Pek, U., Koh, U., Kim, S., y Koh, J., Application of ceramic membranes as pretreatment in anaerobic digestion of alcohol distillery waste., *Journal of membrane Science*, Vol. 90, 1994, pp. 131-139.
- De Moraes, M., Concentração da vinhaça por microfiltração seguida de nanofiltração, Tesis presentada en opción al grado de máster, Campinas, Brasil, 2011.
- Gutiérrez, C., Grosso, J., Bullón, J., Rennola, L., Salazar, F., y Cárdenas, A., Ultrafiltración de vinazas provenientes de destilerías de etanol, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 30, No. 2, 2009, pp. 121-126.
- Lapisova, K., Vlcek, R., Klosova, J., Rychtera, M., y Melzoch, K., Separation Techniques for distillery stillage treatment., *Czech J. Food Sci.*, Vol. 24, No. 6, 2006, pp.261-267.
- Muro, C., Escobar, J., Zavala, R., Esparza, M., Castellanos, J., Gómez, R., y García, M., Evaluación del proceso de microfiltración en un efluente residual de una industria alimenticia para su reúso., *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol. 25, No. 4, 2009, pp. 229-238.
- Murthy, Z., y Chaudhari, L., Treatment of distillery spend washby combined UF and RO processes., *Global Nest Journal*, Vol. 11, No. 2, 2009, pp. 235-240.
- Nataraj, S., Hosamani, K. y Aminabhavi, T., Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes., *Water Research*, Vol. 40, No. 12, 2006, pp. 2349-2356.
- NC: 27:2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Oficina Nacional de Normalización, 2012.
- Nguyen, T., Fan, L., Roddick, F., y Harris, J., A comparative study of microfiltration and ultrafiltration of activated slugged-lagoon effluent., *Desalination*, Vol. 236, No. 01-Mar, 2007, pp. 208-215.
- Rennola, L., Yépez, C., Bullón, J., y Salazar, F., Tratamiento de las aguas residuales de una destilería mediante el uso de coagulantes y membranas., *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, Vol. 30, Edición Especial, 2007, pp. 11-19.
- Shivajirao, P., Treatment of distillery wastewater using membrane technologies., *International Journal of Advanced Eng. Res and Studies*, Vol. I, No. III, 2012, pp. 275-283.
- Wu, Y., Recovery of stillage soluble solids from corn and dry milled corn fractions by high pressure reverse osmosis and ultrafiltration., *Cereal Chem.*, Vol. 65, No. 4, 1988, pp. 345-348.