

# Diseño a nivel laboratorio de un proceso de ósmosis inversa para disminuir bario de las aguas de producción y captación del campo Cantagallo

pags 31-45

Grupo de investigación: Ambiente y Hábitat  
Eliana Mesa• Lesly Medina•• Nelson Rodríguez••

Recibido: 14 de octubre de 2013    Aceptado: 30 de mayo de 2014

## RESUMEN

En este trabajo se diseñó un prototipo de ósmosis inversa a escala laboratorio, con el fin de disminuir la concentración de bario presente en el agua de producción y captación del Campo Cantagallo. Se realizó una matriz de decisión que permitió elegir el medio filtrante que presentara algunas características similares a las de una ósmosis inversa. El prototipo se bocetó en el programa Sketch Up, se modeló en el software SolidWorks y se simuló el proceso con la herramienta Flow simulation. La pre-experimentación se realizó con un montaje sencillo usando agua de dos y tres puntos diferentes de la planta de tratamiento, este proceso se desarrolló en dos etapas, la primera para identificar la eficiencia de la membrana y variables de proceso, y la segunda para aplicar las variables seleccionadas e identificar el porcentaje de remoción. En la construcción del prototipo se utilizan tres membranas configuradas en serie con válvulas de compuerta para cerrar el proceso y válvulas de muestreo después de cada una de ellas; asimismo se utilizan reducciones y ampliaciones de diámetro que

conectan con la entrada y salida de los filtros. Se realizó un diseño de experimentos factorial 2k que generó combinaciones de variables para la experimentación. En la puesta en marcha del prototipo se realizan 4 pruebas con réplica para 3 puntos de la planta de tratamiento de agua, usando configuraciones de dos y tres membranas y dos caudales diferentes. El prototipo de ósmosis inversa como tratamiento de agua de producción y captación presentó un porcentaje de remoción de bario de 76% con una configuración de tres membranas y el mayor caudal.

**Palabras Clave:** Ósmosis inversa, Concentración bario, Membranas, Agua de producción, Agua de captación.

## ABSTRACT

In this work we designed a prototype laboratory scale reverse osmosis in order to decrease the concentration of barium in the water production and groundwater Cantagallo field. We performed a decision matrix allowed to choose the filter media to present some features sim-

• Docente investigadora, Universidad de América, Química, M.Sc. eliana.mesa@investigadores.uamerica.edu.co  
•• Estudiantes investigadores, programa de ingeniería Química.

ilar to a reverse osmosis. The prototype is sketched in SketchUp program was modeled in SolidWorks software and the process was simulated with the Flow simulation tool. The pre-experiment was conducted with using water easy mounting two and three different points of the treatment plant, in two stages, first to identify the membrane efficiency and process variables, the second to apply the selected variables, and identify the proportion of removal. In the construction of the prototype using three membrane configured in series with gate valves to close the process and sampling valves after each are used in diameter reductions and enlargements that connect to the input and output filters. We performed a 2k factorial design experiments that generated combinations of variables for experimentation. In the prototype implementation of the four tests are performed replica to 3 points of water treatment plant, configurations using two and three membrane and two different flow rates. The prototype of reverse osmosis as water treatment of production and groundwater showed a barium removal percentage of 76% with a configuration of three membranes and higher throughput.

**Key Words:** Reverse osmosis, Barium concentration, Membranes, Production water, Groundwater.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la perspectiva sostenible ha ido creciendo de forma significativa, el gobierno ha tenido que darle la importancia que se merece a la parte ambiental, modificando y generando nuevas normas que involucren la disminución de contaminantes en aire, tierra y agua, especialmente para la industria petrolera; de modo que se ha ido desarrollando una mayor investigación y creación de nuevas alternativas que solucionen dicha situación.

Para dar cumplimiento a la normativa ambiental legal vigente en cuanto a vertimientos y reinyección a suelos y efluentes, la industria petrolera utiliza plantas de tratamiento de agua que permiten la descontaminación del agua. La planta de tratamiento Isla VI utiliza procesos primarios, secundarios y terciarios para la limpieza del agua; sin embargo, en cuanto a bario, la planta no está cumpliendo su función de remo-

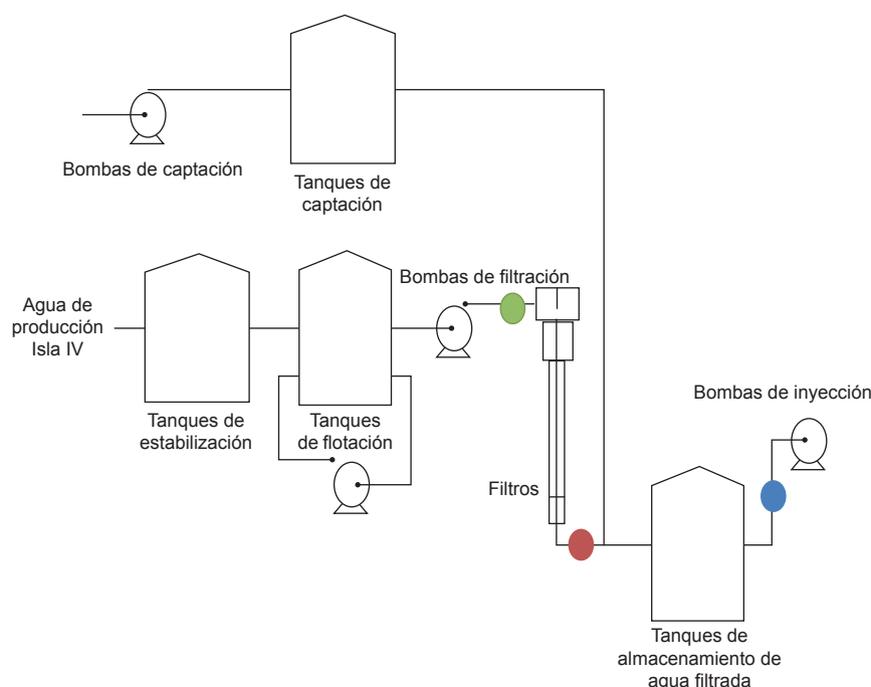
ción, ya que el agua está saliendo con 35 ppm, por lo que está por encima de los parámetros establecidos por el decreto 1594 de 1984 - artículo 74, que indica que la concentración máxima permisible de bario es de 5 ppm.

Es por esto que ECOPETROL S.A. busca contar con procesos eficientes en el manejo de recursos hídricos, que le permitan ser amigable con el medio ambiente. Una de estas tecnologías innovadoras es la ósmosis inversa, proceso que se usa para la desalación y potabilización de agua de mar, con porcentajes de remoción de metales pesados y sales del 98%.

La ósmosis inversa consiste en una membrana semipermeable de acetato de celulosa o poliamida aromática, donde se ejerce una presión mayor a la presión osmótica, permitiendo el paso del solvente y reteniendo el soluto. Para el desarrollo de esta tecnología, se realizaron pre-experimentaciones que permitieron definir las variables de mayor incidencia en el diseño de equipos como: el caudal, la presión, el pH, la temperatura, y el número de membranas. Una vez conocidos estos factores, se realizó el diseño y la construcción del prototipo a nivel laboratorio, con el fin de hacer una experimentación que permitiera determinar el porcentaje de remoción de las membranas y el punto adecuado para la implementación de éste proceso en la planta de tratamiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el diseño del prototipo se seleccionaron tres puntos diferentes de la planta de tratamiento Isla VI del Campo Cantagallo: el primero antes de los filtros donde se encuentra agua de producción, el segundo después de los filtros pero antes de la unión con el agua de captación, y el tercero a la salida del tanque de agua filtrada, que es la mezcla de las aguas de producción y captación. En la Figura 1 se observan los puntos seleccionados para las pruebas.

**Figura1. Puntos de muestreo**

A las aguas recolectadas se les realizó la caracterización de bario para compararlo con el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo territorial, y para saber el porcentaje de remoción después de pasar por los filtros. Con respecto al bario, se determinó que es un parámetro a tener en cuenta, ya que es considerado tóxico y contaminante y, desde la entrada y durante la trayectoria de cada proceso preliminar de la planta de tratamiento de agua Isla VI, se presenta en valores de concentración que están por encima del valor establecido, lo que permite identificar que los procesos no son lo suficientemente eficientes para su remoción.

Debido a que las membranas de ósmosis inversa tienen un costo elevado, se decide realizar una matriz de selección de un medio filtrante de otro proceso de tratamiento de agua con membranas, utilizando criterios que permitan hacer la evaluación cualitativa y cuantitativa de niveles alto medio y bajo (10, 5, y 1) respectivamente, donde el 10 es el criterio que cumple con las especificaciones de una membrana de ósmosis inversa. El mayor total generado de las tres

alternativas, indicó el filtro que se utilizó en el prototipo.

En la construcción del prototipo se tuvieron en cuenta las normas ASME B31 (ENGINEERING STANDARDS MANUAL, 2012.) que recopila la información en el *pipinclass*, de forma que, según la industria y el fluido de estudio, se seleccionó el tipo de tubería, los diámetros, los accesorios, las máximas presiones de operación, las temperaturas y demás criterios de diseño.

Para la experimentación se realizó un diseño de experimentos  $2^k$ , que generó combinaciones de pruebas con las variables obtenidas en la pre-experimentación y respondiendo a la hipótesis de si hay efecto significativo en las variables.

### Parámetros de diseño del prototipo a nivel laboratorio

Para el diseño del prototipo de ósmosis inversa se tuvieron en cuenta inicialmente los criterios del ASME B31, que es la norma que define presión, temperatura, clase, dimensiones, materia-

les y demás especificaciones que deben tener las tuberías y accesorios según el servicio prestado, toda esta información se recopila en el documento titulado "Pipingclass". Posteriormente, para una mejor precisión del diseño, se realizó un modelado en 3D y una simulación del prototipo, usando las dimensiones estipuladas en el Pipingclass y teniendo en cuenta las especificaciones físicas y de materiales para cada elemento. Este trabajo se realizó en el programa SolidWorks 2010 (software con licencia), donde se diseña detalladamente en el software cada una de las piezas del prototipo, para finalmente hacer un ensamblaje total.

A continuación se seleccionó en el modelado del proceso de ósmosis inversa una configuración en serie, con el fin de que, para una conversión total determinada, cada membrana trabaje con una conversión menor que si se trabajase en una configuración en paralelo, lo que significa que el caudal de salida de membrana (rechazo) y la velocidad superficial sobre la membrana sean mayores, y de esta manera se cuenten con varias etapas consecutivas de filtración.

También se tuvo en cuenta en el diseño del prototipo de ósmosis inversa ciertos parámetros como la selección de la membrana, el número

de membranas, el caudal a trabajar, la presión del proceso y la temperatura.

### Selección de membrana

Debido a que las membranas para ósmosis inversa tienen un costo elevado, se realizó una investigación para saber que otro tipo de material podría servir, teniendo en cuenta la máxima temperatura y presión, la función, el material y el tamaño de poro de las fibras; de modo que hubiera una retención de partículas igual o parecida a la de una ósmosis inversa. Por lo tanto, se realizó una matriz de selección en la que se tuvieron en cuenta criterios como aplicación, tamaño de poro, tipo de separación, material de la membrana, resistencia al calor, presión de trabajo, solvente, tipo de membrana y eficiencia; y finalmente se decidió seleccionar la membrana correspondiente al proceso de diálisis (filtro dializador de hemodiálisis), ya que obtuvo el mayor valor de calificación en la matriz, indicando mejores características en los criterios descritos y una mayor afinidad con el proceso a sustituir. En la Figura 2 se muestra un filtro de hemodiálisis.

A continuación en la Tabla 1 se muestra la comparación de las especificaciones de una membrana dializadora y una de ósmosis inversa.

**Figura 2. Dializador de hemodiálisis**



**Tabla 1. Comparación de especificaciones entre membranas**

Criterio	Ósmosis inversa <sup>1</sup>	Dializador de hemodiálisis <sup>2</sup>
Tamaño de poro de la membrana	0.0005 a 0.002 <i>micrones</i>	0.2 micras
Máxima temperatura	45°C	200 °C
Máxima presión	80 bares	60 mmHg
Material	Acetato de celulosa, o poliamida	Polietersulfona POLYNEPHRON
Función	Eliminar mediante una membrana semipermeable los pirogénicos, microorganismos, virus y bacterias del agua.	Purifica la sangre mediante una membrana semipermeable; eliminando los excesos de sustancias tóxicas.

1. La información fue extraída de: FARIÑAS IGLESIAS, Manuel. Ósmosis Inversa - Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones. España: McGraw-Hill, 1999. Capítulo 1, p. 17

2. La información fue extraída de: BAXTER. Introducing Xenium XPH High-Flux Synthetic Dialyzers. [En línea]. Disponible en internet: <[http://www.baxter.com/downloads/healthcare\\_professionals/products/xeniumsheetsrevisedfinal.pdf](http://www.baxter.com/downloads/healthcare_professionals/products/xeniumsheetsrevisedfinal.pdf)>

Las funciones de ambas membranas es la purificación de un solvente, en cuanto a los materiales de fabricación en los dos casos son membranas poliméricas, que “constituyen el campo más amplio y desarrollado de las membranas, debido a la gran versatilidad que aportan los polímeros. Pueden estar compuestas por diferentes tipos de materiales, entre ellos los polímeros sintéticos como acetato de celulosa, polisulfona, poliamida y polietersulfona” (Díaz, 2008).

### Número de membranas

La eficiencia de proceso y la disminución de solutos en la solución, se ven directamente afectado por el número de membranas existentes en el proceso, debido a que a mayor área de contacto del agua con el medio filtrante, mayor será el porcentaje de rechazo del proceso en general.

### Caudal

El caudal de proceso es importante debido a que debe estar directamente relacionado con la presión de trabajo y ser el suficiente para atravesar cada membrana. Para efectos del prototipo a escala laboratorio, se decidió seleccionar caudales de trabajo para las pruebas experimentales de 30 L/min y 35 L/min (ASTM INTERNATIONAL.ASTM, 2012).

### Presión

La presión a la que funciona la membrana debe ser la necesaria para vencer la presión osmótica diferencial. Dependiendo del tipo de membrana con la que se trabaje, existe una presión máxima de operación que no puede rebasarse, debido a que se puede generar un descenso en la permeabilidad de la membrana por compactación o, incluso, generar su ruptura o destrucción.

### Temperatura

La temperatura es aquella a la que se realiza el proceso, la cual es variable en función del lugar geográfico o la época del año en la que se realiza el tratamiento. Las membranas de ósmosis inversa pueden soportar temperaturas de hasta 45°C.

### Modelo analítico

La experimentación del prototipo está dividida en cuatro etapas.

Etapa 1, diseño y simulación: en esta etapa se bocetó y modeló el prototipo de ósmosis inversa a nivel laboratorio utilizando como guía el Pipingclass, el cual permite la identificación de los materiales y las dimensiones que deben tener los accesorios y tuberías a utilizar en la

construcción del prototipo, además de ayudar a la realización de una simulación de flujo, que permitió comparar la eficiencia hidráulica y modificar diferentes variables de proceso como velocidad, presión, temperatura y densidad.

Etapa 2, caracterización del afluente: tuvo como objetivo reconocer las características de la carga contaminante presente en el agua de los tres puntos de muestreo de la planta de tratamiento que entra como afluente al prototipo. Esta muestra fue de tipo compuesta, que consiste en muestras tomadas en el mismo punto pero en diferentes momentos de tiempo, de modo que se tomó una muestra en la mañana (9:00 am), en la tarde (2:00 pm) y en la noche (8:00 pm), generando así una homogenización de las tres muestras del día, para así obtener una muestra representativa.

Etapa 3, pre-experimentación: se realizaron pruebas con una bomba electro sumergible, para dos y tres puntos de la planta de tratamiento, variando sólo el número de membranas.

Etapa 4, puesta en marcha del prototipo: en esta etapa se realizaron las pruebas experimentales de acuerdo con las combinaciones de variables arrojadas por el diseño de experimentos, donde se tuvieron en cuenta dos caudales de 30 L/min y 35 L/min, y una configuración en serie de dos y tres membranas. Se realizaron 4 prue-

bas por punto junto con su réplica, obteniendo 8 pruebas por punto de muestreo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos obtenidos en la experimentación del prototipo de ósmosis inversa y con el agua de tres puntos diferentes de la planta de tratamiento Isla VI del Campo Cantagallo, se hizo un análisis y se obtuvieron los siguientes resultados correspondientes a cada etapa del proceso.

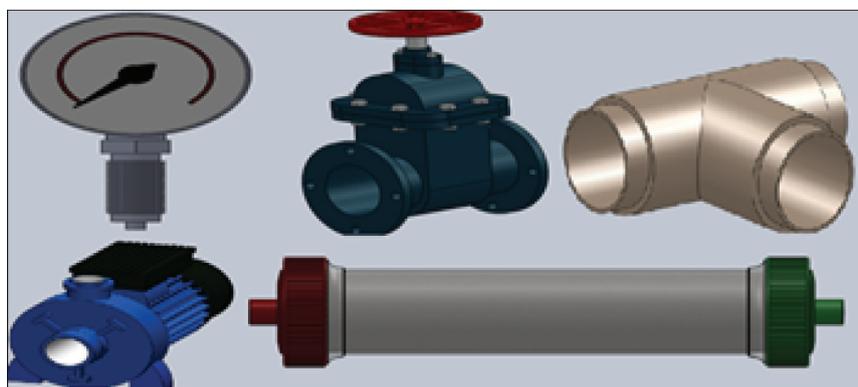
### Etapa 1. Diseño y simulación

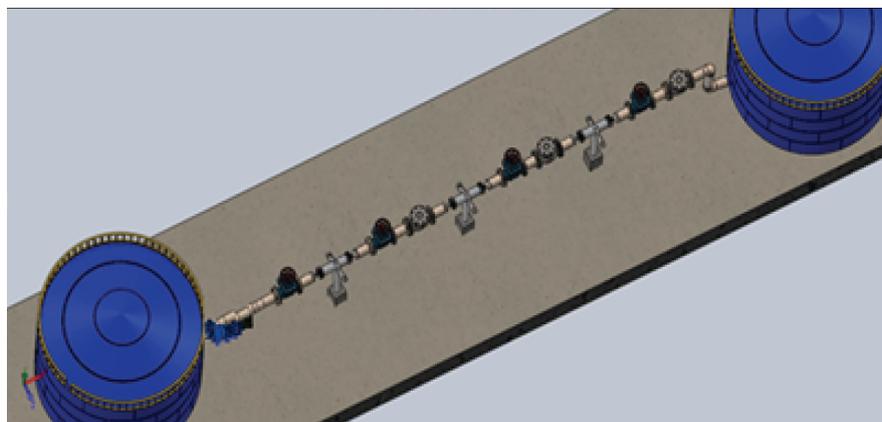
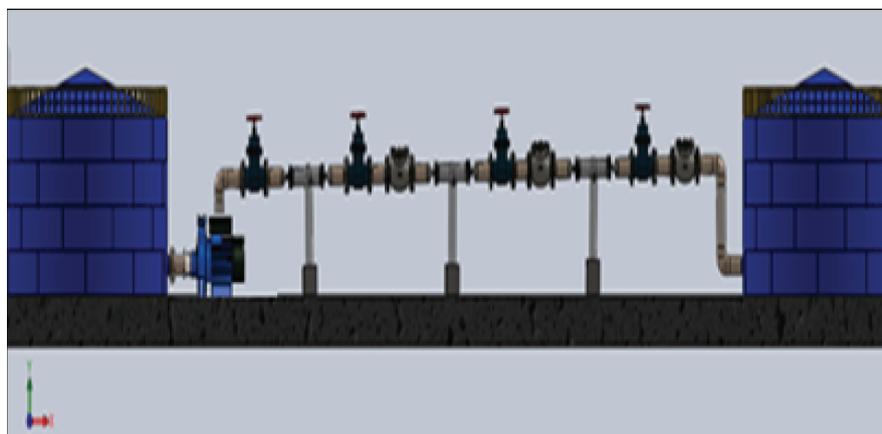
Se realizó el bosquejo inicial del prototipo de ósmosis inversa a nivel laboratorio en el programa SketchUp, obteniendo como resultado 4 bocetos. Luego se procedió a modelar cada una de las partes y accesorios en el programa SolidWorks, ofrecido por Tecnoparque nodo Bogotá. En la Figura 3 se muestra una válvula de compuerta modelada en el software.

Posteriormente, se ensambló cada una de las piezas para dejar armado el prototipo a nivel laboratorio. En la Figura 4 y 5 se observa el ensamblaje final.

Para la simulación se evaluaron las pérdidas hidráulicas, dando como resultado los valores de la Tabla 2:

Figura 3. Válvula de compuerta

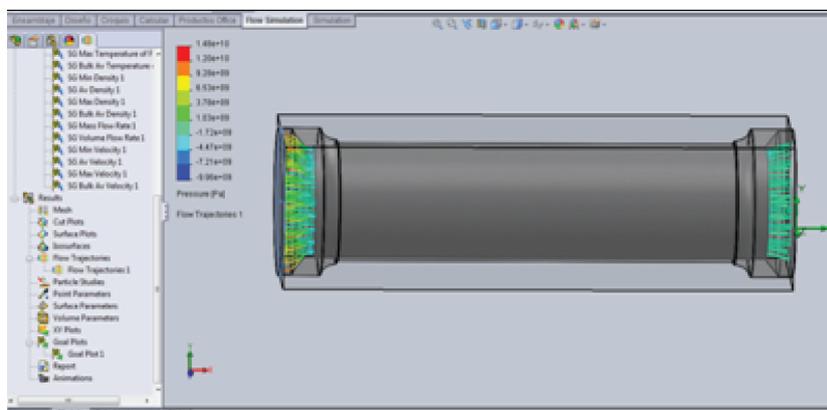


**Figura 4. Ensamblaje final****Figura 5. Ensamble prototipo****Tabla 2. Pérdidas de energía**

Tipo de pérdida	Resultado
Por fricción	1,824793
Por dilatación gradual	0,03399309
Por contracción gradual	0,003468683
Por accesorios	0,76311021
Total	2,62536457

En la figura 6 se muestra la simulación de una sección del prototipo.

Figura 6. Simulación



**Etapa 2. Caracterización del afluente**

De acuerdo a los resultados, se evidenció que los valores de concentración de bario varían diariamente; por lo tanto se determina que el agua de producción y captación no siempre presentará las mismas características, siendo un factor al cual se enfrentó el prototipo durante la experimentación. La concentración de bario en

cada punto de muestreo arrojó concentraciones por encima de lo señalado en el Decreto 1594 de 1984 y se ven representados en la Tabla 3.

**Etapa 3: Pre-experimentación**

En la primera pre-experimentación se realizó el siguiente montaje de proceso expuesto en la Figura 7.

Tabla 3. Caracterización agua de entrada

Punto de muestreo	Resultado de concentración de Bario (ppm)
Salida de los tanques de flotación y antes de los filtros	46,9
Salida de los filtros y antes del tanque de agua filtrada	60,7
A la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas booster	17,7

Figura 7. Montaje pre-experimental del prototipo de ósmosis inversa



## LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: AMBIENTE Y HÁBITAT

Para observar la eficiencia del montaje de ósmosis inversa con una sola membrana, se seleccionó la muestra de agua correspondiente a la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas booster, debido a que es el punto donde el agua presenta menores agentes contaminantes en general. El resultado obtenido de concentración de bario se muestra en la Tabla 4.

En los resultados se observa que la concentración de bario removido por la membrana es muy baja. Con base al material bibliográfico, es recomendable que el proceso de ósmosis inversa esté disponible con más de una membrana, con el fin de hacer pasar el agua por varias etapas de limpieza, lo cual aumentaría en cierto grado el desempeño del proceso.

Según José Antonio Medina (2000), para un proceso de ósmosis inversa es recomendable tener en cuenta el pH del agua, debido a que, dependiendo del material de la membrana, el material semipermeable se podría hidrolizar y perder eventualmente su características filtrantes. La pre-experimentación posiblemente puede verse afectada por la disminución del pH en el momento de conservar las muestras con ácido nítrico.

Teniendo en cuenta los resultados de la primera pre-experimentación, se decidió en esta segunda pre-experimentación aumentar el número de membranas, además de incluir más puntos de muestreo de la planta de tratamiento de agua, con el fin de observar de manera más específica el comportamiento del proceso. En la Figura 8 y 9 se muestra montaje de proceso.

**Tabla 4. Caracterización de bario salida del tanque de agua filtrada**

Punto de muestreo	Prueba	Resultado de concentración de Bario (ppm)
A la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas booster	Entrada de la membrana	20,78 ppm
	Salida de la membrana	20,27 ppm

**Figura 8. Montaje pre-experimental con dos membranas**



Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas se muestran en la Tabla 5.

En los resultados se observa que la concentración de bario removido por la membrana es significativamente alta a la salida de los filtros y antes del tanque de agua filtrada; sin embargo, el valor más bajo de concentración de bario se observa a la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas Booster, lo cual confirma la afirmación de que el aumento del número de membranas tiene una consecuencia positiva en un proceso de ósmosis inversa. No obstante es importante tener en cuenta que, debido a la instalación de una bomba electro-sumergible, al hacer bombear el muestreo compuesto a través de la membrana, es indispensable que

el nivel del agua dentro del recipiente supere la altura de la bomba para que de esta manera no se vea afectada por posible cavitación. Lo anterior teniendo en cuenta que, al ser una bomba electro-sumergible, se puede generar cierta contaminación en la siguiente muestra compuesta de las futuras pruebas, puesto que la bomba sumergida en la primera prueba puede contaminar en cierto porcentaje el volumen del agua en la segunda prueba, debido a que la bomba siempre mantendrá contacto directo con el agua a bombear hacia la membrana; razón por la cual es conveniente, para el desarrollo de la experimentación, utilizar una bomba externa al proceso, que no afecte las propiedades del agua a la entrada del tratamiento con la membrana.

**Figura 9. Montaje pre-experimental con tres membranas**



#### **Etap 4: puesta en marcha del prototipo**

El diseño de experimentos 2<sup>2</sup> presenta la combinación de tratamientos entre caudal y número de membranas, como lo muestra la Tabla 6.

Es importante tener en cuenta que se realizaron estas combinaciones de pruebas por

punto de muestreo de la planta de tratamiento de agua.

Para llevar a cabo la experimentación fue necesario construir y ensamblar el prototipo final de ósmosis inversa, como se ve en las Figuras 10, 11, 12, 13, 14 y 15.

**Tabla 5. Resultados de la caracterización de bario para la segunda pre-experimentación.**

Punto de muestreo	Prueba	Número de membranas	Resultado de concentración de Bario (ppm)
Salida de los tanques de flotación y antes de los filtros			
Entrada de la membrana			46,9
Salida de la membrana	2		45,8
	3		45,2
Salida de los filtros y antes del tanque de agua filtrada			
Entrada de la membrana			60,7
Salida de la membrana	2		40,7
	3		26,8
A la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas booster			
Entrada de la membrana			17,7
Salida de la membrana	2		14,1
	3		12,5

**Tabla 6. Matriz experimental reordenada.**

#	Combinación de tratamientos	Matriz de signos		Factores de diseño	
		A	B	"A" Caudal (L/min)	"B" N° de membranas
1	1	-	-	30	2
2	A	+	-	35	2
3	B	-	+	30	3
4	AB	+	+	35	3

**Figura 10. Prototipo final de ósmosis inversa**

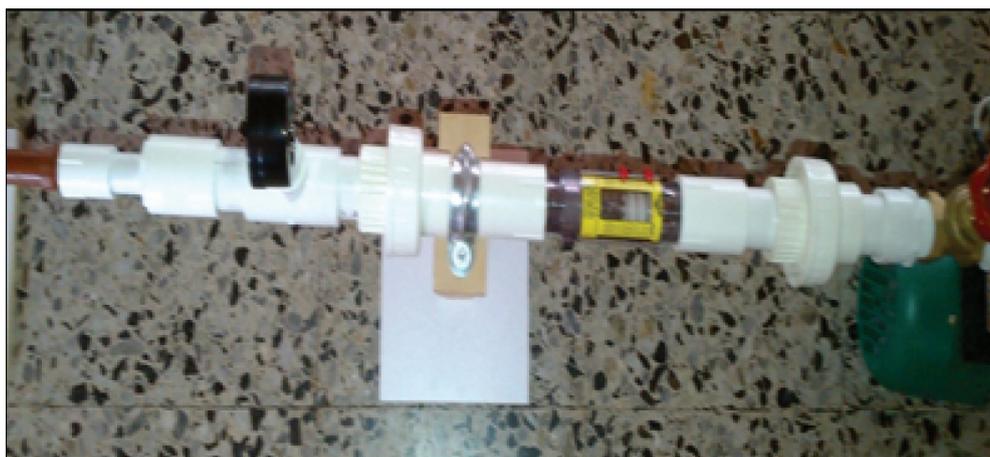
Figura 11. Bomba y válvula de compuerta



Figura 12. Manómetro y membrana



Figura 13. Regulador de flujo



**Figura 14. Válvulas toma muestras****Figura 15. Tanque de permeado**

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas experimentales se muestran en la Tabla 7.

Para cada tabla de hipótesis, correspondiente a cada punto de muestreo de aguas de la planta de tratamiento, se observa que el factor combinado de factores (mayor caudal y mayor número de membranas), tiene un efecto significativamente positivo sobre el porcentaje de remoción de bario, de modo que la combinación de estos factores contribuye al aumento del por-

centaje de remoción de bario, en donde el agua a mayor caudal y atravesando un gran número de membranas, genera una mayor área de contacto del agua a tratar con el medio filtrante.

Es así que, teniendo en cuenta lo anterior y que el mayor porcentaje de remoción de concentración de bario observado ocurre a la salida de los filtros y antes del tanque de agua filtrada, es recomendable implementar en este punto un proceso de ósmosis inversa.

**Tabla 7. Porcentaje de remoción de bario para cada una de las pruebas**

Punto de muestreo	Prueba	Combinación de factores de diseño		Concentración de bario (ppm)	Remoción de bario (%)
		Caudal (L/min)	N° de membranas		
Salida de los tanques de flotación y antes de los filtros					
Entrada de la membrana				46,90	
Salida de la membrana	30	2	43,20	7,89	
	35	2	41,75	10,98	
	30	3	40,30	14,07	
	35	3	37,30	20,47	
Salida de los filtros y antes del tanque de agua filtrada					
Entrada de la membrana				60,70	
Salida de la membrana	30	2	38,20	37,07	
	35	2	36,40	40,03	
	30	3	23,15	61,86	
	35	3	14,95	75,37	
A la salida del tanque de agua filtrada y antes de las bombas booster					
Entrada de la membrana				17,7	
Salida de la membrana	30	2	13,40	24,29	
	35	2	10,90	38,42	
	30	3	11,60	34,46	
	35	3	9,20	48,02	

## CONCLUSIONES

El prototipo de ósmosis inversa a escala laboratorio presentó una eficiencia en la remoción de bario del 76% con un caudal de 35 L/min y una configuración de 3 membranas.

Las variables con mayor incidencia de niveles altos en caudal y la configuración de 3 membranas, indican que el porcentaje de remoción será mayor a 80% con valores crecientes.

Es factible implementar el proceso de ósmosis inversa en la planta de tratamiento Isla VI, ya que removería más del 75% quedando por debajo de la norma legal vigente de 5 ppm.

## RECOMENDACIONES

Realizar pruebas de laboratorio con membranas propias de ósmosis inversa, de tal manera que se puedan comparar los resultados con los filtros utilizados para este prototipo.

En la experimentación, realizar la caracterización de otros componentes del agua diferentes del bario, con el fin de observar su comportamiento al ser tratada con membranas de ósmosis inversa.

Diseñar el proceso con diversas combinaciones de configuración.

Realizar el diseño de prototipo de ósmosis inversa a escala piloto.

## REFERENCIAS

Arpel. (2000) "Disposición y tratamiento del agua producida" En línea. Recuperado en febrero 11 de 2012. Disponible en: <<http://www.ingenieroambiental.com/4000/guia%2001%20-%20ok.pdf>>

ASTM International. (2012) En línea. Recuperado enero 2 de 2013]. Disponible en: <<http://www.astm.org/standards/a53.htm>>

Chemicool (2011) "Barium element facts" En línea. Recuperado agosto 1 de 2012]. Disponible en: <<http://www.chemicool.com/elements/barium.html>>

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Decreto 1594 (26, junio, 1984). "Por el cual se reglamenta parcialmente el título 1 de la ley 9 de 1979, así como el capítulo 2 del título 4 -parte 3- libro 2 y el título 3 de la parte 3 -libro 1- del decreto. ley 2811 de 1974 en cu-

anto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá, D. C: 1984. 45 p.

Engineering Standards Manual (2012) "Process Piping Guide. En línea. Recuperado en enero 2 de 2013. Disponible en: <[http://engstandards.Lanl.gov/esm/pressure\\_safety/process\\_piping\\_guide\\_r2.pdf](http://engstandards.Lanl.gov/esm/pressure_safety/process_piping_guide_r2.pdf)>

Fariñas, Manuel. (1999) "Ósmosis inversa – fundamentos, tecnología y aplicaciones". McGraw-hill, P. 182. España.

Giraldo. (2007) "Ingeniería básica para el sistema de tratamiento del agua de producción del campo petrolero abanico- 1 de El Espinal Tolima." Trabajo de grado ingeniero químico. Bogotá dc: universidad de américa. Facultad de ingenierías. Programa de ingeniería química, 145 p. Colombia.

INCHEM. (2001) "Barium and barium compounds" En línea. Geneva, [citado julio 29 de 2012]. Disponible en: <[http://](http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad33.htm)

[www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad33.htm](http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad33.htm)>

INGENIERÍA DE TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS. (2011) "Procesos de membrana en tratamiento de aguas." En línea. Recuperado abril 4 de 2013. Disponible en: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/membranas9.pdf> México.

Sotto, A. (2008) "Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos". Universidad Rey Juan Carlos. Facultad de ciencias experimentales y tecnología. Departamento de tecnología química y ambiental, P. 22. España

Textos Científicos. (2007) "Ósmosis inversa". En línea. Recuperado abril 4 de 2013. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/quimica/osmosis/inversa> México.