



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EMPLEO DE MEMBRANAS DE ULTRA Y NANOFILTRACIÓN PARA
RECUPERACIÓN DE SODA CÁUSTICA EN ENKA DE COLOMBIA S.A.**

Autor(es)
María José Páez Grecco

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2020



**EMPLEO DE MEMBRANAS DE ULTRA Y NANOFILTRACIÓN PARA
RECUPERACIÓN DE SODA CÁUSTICA EN ENKA DE COLOMBIA S.A.**

María José Páez Grecco

**Informe de práctica presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Química**

Asesores

**I.Q. Diego Alejandro Trujillo Vera
Ph.D. Henry Nelson Zúñiga Benítez**

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2020**

EMPLEO DE MEMBRANAS DE ULTRA Y NANOFILTRACIÓN PARA RECUPERACIÓN DE SODA CÁUSTICA EN ENKA DE COLOMBIA S.A.

RESUMEN

Se evaluó la recuperación de soda cáustica en aguas residuales del lavado de botellas en el proceso de reciclaje de PET para botellas (B2B) en la compañía Enka de Colombia S.A. utilizando tecnología de membranas. Para este propósito, se consideraron los procesos de ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF). En la primera etapa, en un intento por controlar el posible ensuciamiento de la membrana de UF, se evaluaron alternativas de pretratamiento con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de sólidos por lo que se optó por una filtración de 50µm. En la segunda etapa, en la evaluación de los procesos de UF y NF fue posible enviar para ser tratada una muestra del agua de prelavado a New Logic Research donde se obtuvieron resultados favorables, también se recibió propuesta por parte de la compañía Koch y se realizó una búsqueda bibliográfica de las membranas de NF implementadas para el proceso de recuperación de soda. Teniendo en cuenta características como amplio rango de temperatura y pH, material resistente al alto contenido de sólidos, entre otros; se seleccionaron las membranas de NF NP030, Microdyn Nadir ya que estas presentan un mejor rendimiento en términos de flux de permeado y disminución de la DQO, logrando una recuperación cáustica del 80-85% con un tratamiento de UF previo. Para la selección de estas membranas se buscaron unas que cumplieran con las mismas características antes mencionadas y se seleccionaron las membranas cerámicas CeraQ™ de QUA (QUA 2020). Se realizó un análisis de inversión y de ahorro neto total obteniendo valores de \$771.945.882 y \$431.282.744 respectivamente. Finalmente, se evaluó la viabilidad del proyecto conocida como retorno que corresponde a la cantidad de años en que se pagará la inversión del proyecto dando como resultado 1.8.

INTRODUCCIÓN

Enka de Colombia S.A. fue establecida el 8 de septiembre de 1964 por el grupo AKZO NOBEL de Holanda y otros socios de la región como Hilanderías de Medellín, Fabricato, Tejicondor, y Pantex. La empresa fue proyectada para producir y comercializar polímeros y fibras químicas de poliéster y Nylon en forma de gránulos, fibras, filamentos textiles e industriales, y lona para llantas. Actualmente, la compañía se ha convertido en el mayor fabricante de fibras sintéticas del Grupo Andino, atendiendo también a la industria química y del plástico (Enka S.A., 2020).

Desde el momento de inicio de operación, la empresa ha ampliado algunos de sus procesos, así, en 2009 se establece la operación de la planta de reciclaje PET (tereftalato de propileno) para la producción de fibras cortas (B2F), encontrando en el reciclaje de este material un desafío y una oportunidad para una nueva línea de negocio perfectamente adaptada a su estrategia de sustentabilidad. Así, Enka comenzó a operar una moderna planta para transformar alrededor de 11000 toneladas de botellas al año para luego procesar fibras que son usadas para la fabricación de hilos que posteriormente son utilizados en la producción de pantalones, camisetas y ropa de hogar. En 2013 inicia la operación de la planta de reciclaje PET para botellas (B2B) y en 2014 inicia la operación de la planta de autogeneración de energía eléctrica (14 MW), siendo estos algunos de los proyectos más representativos.

El proceso de reciclaje de PET para botellas (B2B) implica varias etapas de pre-lavado y lavado en las cuales es necesario emplear grandes cantidades de agua, detergente y soda cáustica (Hidróxido de sodio, NaOH), generando una cantidad considerable de desechos líquidos altamente alcalinos que deben ser tratados posteriormente antes de su disposición final (vertimiento en fuente hídrica), lo que implica el uso de cantidades importantes de agentes neutralizantes como CO₂, entre otros.

Lo anterior presenta una atractiva posibilidad para evaluar la recuperación de la soda cáustica utilizada. De esta manera, la filtración vía membranas se considera una buena alternativa tanto para la reutilización de aguas residuales como para la recuperación de cáusticos. Sin embargo, la información disponible en la literatura en el campo de la recuperación de NaOH de los efluentes provenientes de plantas de reciclaje de PET es aún muy

limitada. Las aguas residuales en procesos de reciclaje son un reto porque tienen altas cargas de sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno (DQO), color, pH, entre otras. Adicionalmente, también se producen típicamente entre 80 y 90 °C, un parámetro operativo que es vital considerar.

Para la recuperación de soda cáustica, se ha reportado que es necesario un tratamiento por nanofiltración (NF) u ósmosis inversa (RO) (Varol et al. 2015). Por esta razón se ha propuesto el uso de membranas de nanofiltración de polietersulfona sulfonada (SPES), las cuales constan de una capa de separación de 0.3 µm y un soporte de polisulfona recubierto con un material de tela resistente que les confiere una tolerancia química mucho mayor que las membranas estándar. Además, este tipo de tecnologías puede soportar soluciones con pH en el rango 2.0 a 13.0 a temperaturas elevadas. Este tipo de membranas han sido empleadas en diferentes procesos, tales como:

- Recuperación de aguas residuales de la mercerización de telas de algodón.
- Tratamiento de aguas residuales industriales cloradas.
- Eliminación de oxalato y otros contaminantes orgánicos del aluminato de sodio y el hidróxido de sodio en las corrientes del proceso Bayer.
- Recuperación de soda cáustica en industria láctea.
- Recuperación de hidróxido de sodio de los efluentes de lavado de botellas en industrias de bebidas.

El uso de membranas de NF requiere como pretratamiento una filtración para reducir la carga de sólidos suspendidos. Entre los procesos de filtración por membrana, la UF generalmente se considera satisfactoria para la eliminación de partículas y macromoléculas de los efluentes, aunque no de especies iónicas (Varol et al. 2015). Al igual que para la NF, la UF requiere disminuir la cantidad de sólidos suspendidos grandes, para lo cual es adecuado el uso de una prefiltración entre 50 y 150 micras. Por lo anterior, se propone utilizar un filtro de 50 micras y UF como pretratamiento del agua antes de la NF.

Teniendo en cuenta lo expuesto, el objetivo principal de este proyecto fue evaluar la recuperación de soda cáustica en aguas residuales de reciclaje de PET mediante procesos de membrana en pro de generar una corriente de permeado cáustico que pueda reutilizarse. Durante el desarrollo de la propuesta, se evaluó la posible eliminación de sólidos suspendidos por filtración y UF antes de NF. En función de los resultados de las pruebas de pretratamiento, se estudió la potencial implementación del proceso de NF. El rendimiento de la membrana se evaluó en términos del flux de permeado.

1. OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar la viabilidad del uso de membranas de ultra y nanofiltración en la recuperación de soda cáustica empleada en el proceso de reciclaje de PET (B2B) de la empresa Enka de Colombia S.A.

Objetivos Específicos:

- Evaluar desde el punto de vista económico la viabilidad de emplear membranas en la recuperación de soda cáustica en el proceso de reciclaje de PET B2B de la empresa Enka de Colombia S.A.
- Determinar parámetros de calidad de agua tales como concentración de NaOH, pH, turbiedad, sólidos suspendidos totales, conductividad, entre otros, de diferentes corrientes de agua dentro del proceso de reciclaje de PET y definir la probable ubicación del sistema de recuperación de soda.
- Proponer un arreglo para un proceso de recuperación de soda, incluyendo la configuración de membranas que permita obtener porcentajes significativos de recuperación de soda cáustica.

2. MARCO TEÓRICO

❖ Proceso de reciclaje de PET para botellas en Enka S.A.

El proceso de reciclaje de PET para botellas (B2B) se puede dividir en dos fases generales, el proceso en húmedo y el seco. En el proceso en húmedo se tiene la recepción y almacenamiento de la materia prima que viene prensada, luego está la alimentación a la planta de reciclaje, apertura de pacas y pre-lavado, Seguidamente se tiene una fase de selección de materiales aptos para ser reciclados, con sistemas automáticos y manuales que separan las etiquetas, componentes metálicos, piezas de PVC o de colores, entre otros; posteriormente se lleva a cabo el proceso de molienda en húmedo y lavado de la escama (botella picada), para lo cual es requerido el uso de grandes cantidades de agua, detergente y soda cáustica. Después, viene un proceso de enjuague y se elimina el material de las tapas por un proceso de flotación. En este punto el material pasa un proceso de centrifugación y de secado con aire caliente, para luego eliminar las impurezas sólidas remanentes por elutriación. Una vez pasó por triturado, lavado y secado, la escama de PET se almacena en un gran silo, donde será mezclado hasta conseguir un material homogéneo en color, textura y comportamiento. La última fase del reciclado, el proceso en seco, incluye la extrusión, granulación y post-condensación del PET, donde se logra una descontaminación profunda del material para que llegue al grado de limpieza requerido. La Figura 1 esquematiza el diagrama de flujo asociado a la primera parte del proceso en húmedo.

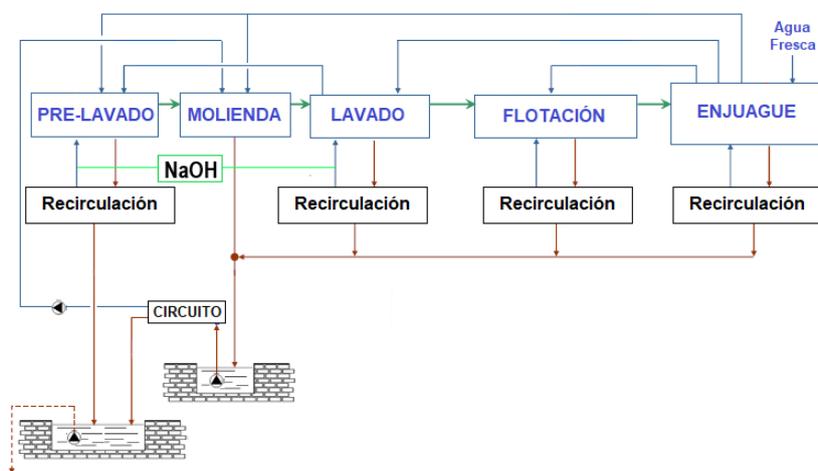


Figura 1. Diagrama de flujo de la primera parte del proceso en húmedo del reciclaje de PET.

❖ Filtración

La filtración es un proceso de separación que usa como medio filtrante una tela no tejida, con un flujo cruzado de baja presión empleada para separar partículas suspendidas con un tamaño mayor a 50 micras. Generalmente, se utiliza con fines de aclaración de corrientes líquidas.

❖ Ultrafiltración

La ultrafiltración (UF) se emplea para separar partículas de menor tamaño e incluso moléculas disueltas de alto peso molecular con un tamaño de poro de membrana de 0.001-0.5 μm . Las membranas de UF tienen una forma asimétrica y una estructura con una capa superior mucho más densa, lo cual les brinda una mayor resistencia hidrodinámica (Cihangir Varol, 2008).

❖ Nanofiltración

La nanofiltración (NF) permite que solutos orgánicos e inorgánicos de bajo peso molecular se separen de solventes y de iones. Se utilizan membranas mucho más densas e hidrológicamente resistentes que en los casos de la microfiltración y UF (Cihangir Varol, 2008).

En general, la escogencia del tipo de membrana a emplear en cualquier proceso de separación está ligada al tipo de material a remover, tal como se presenta en la Figura 2.

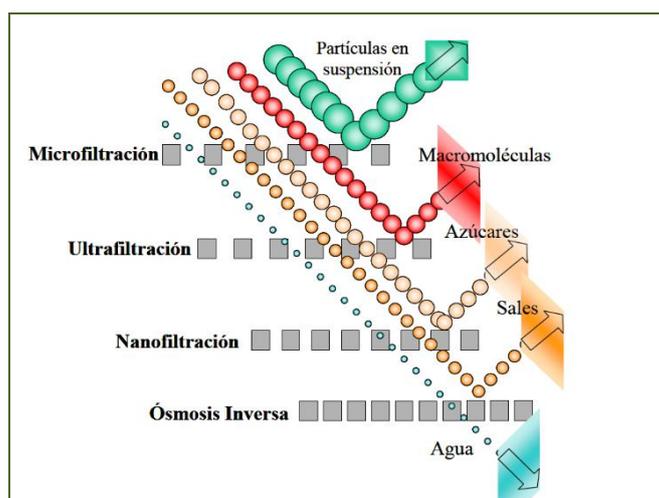


Figura 2. Separación a través de membranas
(Fuente: Depuración y tratamiento de aguas residuales. Soluciones Medioambientales, 2020)

3. METODOLOGÍA

En pro de dar cumplimiento a los objetivos del proyecto se plantearon las siguientes etapas para su ejecución:

1. **Búsqueda bibliográfica:** Durante el desarrollo del proyecto se realizó búsqueda de información concerniente al tratamiento de efluentes, recuperación de soda cáustica y similares en procesos industriales; además de tipos de membranas y su aplicación en la remoción de contaminantes..
2. **Caracterización efluentes del proceso de reciclaje de PET:** Previo a la evaluación del potencial uso de membranas en la recuperación de soda cáustica se realizaron ensayos a nivel de laboratorio para determinar pH, turbiedad, conductividad, concentración de NaOH, demanda química de oxígeno (DQO), entre otros.
3. **Evaluación de membranas de UF y NF en la recuperación de soda cáustica:** Basado en la teoría y en la información suministrada por proveedores de membranas, se evaluó el desempeño de separación del sistema de recuperación de soda en el proceso de lavado de botellas. El objetivo fue retener la mayor cantidad de contaminantes orgánicos y maximizar la concentración de NaOH, con el propósito de reutilizar la solución.
4. **Propuesta para el empleo de membranas en la recuperación de soda cáustica:** Considerando los resultados obtenidos referente a la variación de los niveles de los parámetros fisicoquímicos del agua evaluados se propuso un sistema o arreglo para la recuperación y reutilización de la solución de NaOH.
5. **Preparación de informes y socialización de los resultados:** Durante el desarrollo de esta propuesta se realizaron informes de avance y de resultados parciales y finales, así como la respectiva socialización durante la jornada académica programada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización y comparación de las muestras:

La figura 3 presenta el aspecto visual de las muestras tomadas del proceso de reciclaje de PET donde se realiza adición de soda cáustica.



Figura 3. Apariencia inicial de cada uno de los puntos de muestreo cáustico

El proceso de reciclaje de PET para botellas (B2B) cuenta con tres puntos clave donde se podría tomar la corriente de entrada al proceso de recuperación de soda cáustica: el prelavado, el lavado y el enjuague. Es importante determinar los parámetros físico-químicos de estas corrientes, con el fin de realizar una comparación con respecto a los efluentes reportados en la literatura, donde se realiza recuperación de soda cáustica a través de tecnología de membranas. Lo cual a su vez permitirá determinar cuál es el punto de entrada óptimo al proceso de recuperación. Para esto se realizaron ensayos a nivel de laboratorio que permitieran determinar variables como el pH, la turbidez, la conductividad, la concentración de NaOH, la demanda química de oxígeno (DQO), entre otros. La Tabla 1 presenta los resultados de caracterización obtenidos en cada punto de muestreo,

Tabla 1. Caracterización físico-química promedio de los puntos de muestreo en los meses de abril y mayo

Parámetros	Prelavado	Lavado	Enjuague
Temperatura (°C)	82.7	84.0	62.9
Conductividad (μS/cm)	12887	15799	1290
Conductividad después de filtrar a 0,45μm (μS/cm)	15207	23507	1432
pH	12.8	12.9	10.3
Turbidez (NTU)	5201	1636	1169
Color (Pt-Co)	218	232	229
Concentración de NaOH (%)	0.95	0.87	0.03
DQO (ppm O ₂)	10469	5984	5669
SST (ppm)	4934	1860	2897

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica a la entrada de la NF, reportada en la literatura.

Referencia	Sójka-Ledakowicz et al. 1998	Choe et al. 2005	Varol et al. 2015	Zhao and Xia 2009	Yang et al. 2020	New Logic Research 2020
Aplicación	Efluentes textiles de mercerización	Efluentes textiles de mercerización	Efluentes textiles de mercerización	Agua residual alcalina en el procesamiento de quitina	Efluentes textiles de mercerización	Lavado de botellas PET
Pretratamiento	Filtración 100 μm	Filtro 5-10 μm	UF (DSS GR95PP)	UF L400-6 (Hydrochem Co)	MF/UF doble membrana	Filtro 150 μm
SST (ppm)	-	-	1632	950	140	2310
DQO (ppm)	710	68000	8500	2560	-	12200

pH	-	-	12.3	-	>13.0	12.6
Color (Pt-Co)	369	-	10113	-	170	-
Conductividad (μS)	-	-	6000	-	184000	58600
Concentración de soda NaOH (%)	4.8	3.3	6.7	3.4	4.6	1.2

Como se puede observar en la Tabla 1, la concentración de soda cáustica de las aguas residuales disminuye considerablemente desde el primer punto de muestreo hasta el último. Teniendo en cuenta que la tasa de flujo de aguas residuales de cada etapa es casi la misma, se puede decir que más del 85% de NaOH se descarga en las etapas correspondientes al prelavado y al lavado, sin embargo, en el prelavado la concentración de soda sigue siendo mayor. Con base a este último dato y con el objetivo de recuperar la mayor cantidad posible de soda cáustica, se selecciona el prelavado como el punto para tomar la corriente de agua a la cual se le realizará el tratamiento para recuperación de soda. Teniendo en cuenta que la mayor dosificación de soda ocurre en el tanque de lavado como se puede observar en la figura 1 será en este punto donde será llevada la soda cáustica recuperada.

Selección de membranas y prefiltración:

De acuerdo con los resultados correspondientes a sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO) y color en el prelavado, es importante considerar un pretratamiento con el objetivo de eliminar casi todos los SST, además de disminuir considerablemente la DQO, para garantizar la correcta operación de la NF y evitar el ensuciamiento severo o el daño físico de la membrana. Se considera entonces un filtro de 50μm en el pretratamiento seguido de una membrana de UF, con lo cual, mejorará la calidad del agua del prelavado, llegando a niveles comparables con los reportados en la literatura para aplicaciones similares.

Tabla 3. Características de membranas de NF reportadas en la literatura para recuperación de soda

Marca	KOCH	Microdyn-Nadir			Hydraulics	Nitto-Denki	New Logic		
Referencia	Sójka-Ledakowicz et al. 1998 - Choe et al. 2005	Varol et al. 2015		Yang et al. 2020	Zhao and Xia 2009	Varol et al. 2015	New Logic Research 2020		
Modelo	SelRo MPT-34	NP010	NP030	N30F	HDS-A4-2549-B1F	NTR-7470	NF-300	NF-500	NTR-7450
Tipo	Tubular	Espiral	Espiral	Espiral	Espiral	Espiral	VSEP	VSEP	VSEP
Peso Molecular (Daltons)	200-300	-	500-600	500		200-250	300	500	220
Material	3	2	4	1	1	1	5	6	7
Área (m ²)	5	5.7	25	-	1.4	-	-	-	-
Flux (L/m ² h)	60	-	38	-	27.65	-	35	45	101
Rechazo de NaCl (%)	75	35-70	80-90	-		30	-	-	-
Presión máxima (bar)	40	40	40	40	31	35	-		
Rango de pH	0-14	0-14	0-14	0-14	0-14	-	1-14	1-14	1-14
Temperatura máxima (°C)	70	90	80	95	60	60	80	80	80

Tolerancia al cloro	Moderada	Moderada	Moderada	-	-	100 ppm	-	-	-
Rango de NaOH (%)	3-4	-	-	-	-		-	-	-

1. Polisulfina; 2. Polisulfona hidrolizada; 3. Polisulfona orgánica; 4. Polietersulfona; 5. Película delgada de sulfona; 6. Película delgada no poliamida; 7. Sulfona sulfonada.

En la tabla 3 se presentan las características correspondientes a las membranas reportadas en la literatura para la recuperación de soda cáustica. Como se mencionó anteriormente, para seleccionar la membrana adecuada se deben tener en cuenta algunos parámetros como la temperatura, ya que este sistema opera a 80°C. El material, se prefiere PES debido a su tolerancia química y a su uso recomendado para filtraciones en aguas residuales y el amplio rango de pH. Teniendo en cuenta estos criterios se puede decir que son viables las membranas de Microdyn-Nadir y de New Logic.

Para la selección adecuada de la membrana se realizó una comparación de los valores del prelavado reportados en la Tabla 1, con los reportados en la Tabla 2 correspondientes a la literatura. Se observan semejanzas en cuando a conductividad, pH, SST, DQO y concentración de soda cáustica con la membrana NF-300 de New Logic Research. Sin embargo, dicha membrana cuenta con un sistema integrado vibratorio, sistema que aumentaría notablemente los costos del proyecto. Por lo tanto, se propuso seleccionar una membrana de nanofiltración con características similares pero sin este sistema, la membrana NP030 de Microdyn-Nadir (Nadir 2020.).

Tabla 4. Características de la membrana de NF propuesta por New Logic vs la seleccionada

Marca	New Logic	Microdyn-Nadir
Modelo	NF-300	NP030
Tipo	VSEP	Espiral
Peso Molecular (Daltons)	300	500-600
Material	Película delgada de sulfona	Polietersulfona
Área (m²)	-	25
Flux (L/m²h)	35	38
Rechazo de NaCl (%)	-	80-90
Presión máxima (bar)	-	40
Rango de pH	1-14	0-14
Temperatura máxima (°C)	80	80
Tolerancia al cloro	-	Moderada

Para escoger la membrana de ultrafiltración, se tuvieron en cuenta los mismos parámetros considerados para la selección de la membrana de NF, temperatura máxima de operación, pH y material de la membrana. Se selecciona las membranas cerámicas CeraQ™ de QUA; según el proveedor estas membranas son ideales para aplicaciones desafiantes donde las condiciones no son adecuadas para las membranas poliméricas, como las aguas residuales con altos sólidos suspendidos, alto pH y alta temperatura de proceso.

Tabla 4. Características de la membrana de UF seleccionada

Marca	QUA
Modelo	CeraQ™
Tipo	Tubular
Material	Cerámica
Área (m²)	5.5
Flux (L/m²h)	250
Presión máxima (bar)	5
Rango de pH	2 – 14
Temperatura máxima (°C)	90

Durante la toma de muestras se pudo evidenciar que en muchas ocasiones trozos grandes de etiquetas quedaban en el tanque de prelavado, estos contaminantes provocarían un taponamiento en la membrana de ultrafiltración. Con el objetivo de retener los contaminantes de mayor tamaño, se propone un arreglo antes de ingresar a la UF que involucre de un filtro de 50 μm , el cual corresponde a una filtración de banda, es un tipo de filtración por gravedad que tiene lugar a través de una tela filtrante de tela no tejida (nonwovens) colocada en la parte inferior de la máquina. El agua para tratar ingresa en la máquina y se distribuye a través de un difusor en la superficie del material filtrante, donde los sólidos suspendidos son atrapados por la tela no tejida y eliminados a través del movimiento periódico de la banda de soporte. El avance de la banda se controla automáticamente mediante un sensor de nivel dentro de la máquina.

Sistema para la recuperación y reutilización de la solución de NaOH:

Con el objetivo de recuperar la soda cáustica de las aguas residuales provenientes del lavado de botellas en la planta de reciclaje de botellas B2B en la empresa Enka de Colombia S.A, se propone el uso de membranas de nanofiltración. Como se mencionó anteriormente la recuperación cáustica iniciará tomado una corriente de agua del tanque de prelavado, un flujo de alrededor de 4 m^3/h ; el cual será almacenarlo en el tanque de alimentación. Desde allí, el agua será bombeada a través un filtro de 50 μm donde inicia su pretratamiento con el fin de eliminar contaminantes y partículas que puedan provocar el ensuciamiento severo de la membrana de ultrafiltración. Luego, pasa por membranas de ultrafiltración CeraQTM de QUA, las cuales producirán una corriente de permeado cáustico que se llevará al tanque de permeado UF, y una corriente de concentrado que será llevada de vuelta al tanque de alimentación para repetir el ciclo hasta que se haya recuperado la mayor cantidad de soda posible. El permeado de la ultrafiltración será bombeado desde el tanque hasta las membranas de nanofiltración NF NP030 de Microndyn-Nadir (NADIR 2020.), donde ocurrirá el mismo ciclo, la corriente del concentrado será devuelto al tanque de permeado UF y la corriente de permeado cáustico será almacenada en un tanque de producto que corresponde a una mezcla se soda cáustica y agua que será reutilizada en el proceso de lavado de botellas. En la figura 4 se presenta un diagrama de bloques del proceso propuesto y el Anexo 1 corresponde al diagrama básico del proceso (P&ID) para esta recuperación de soda.

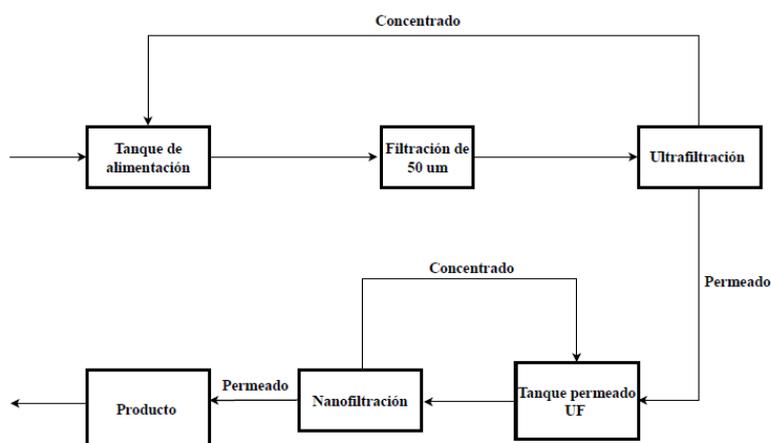


Figura 4. Diagrama de bloque del sistema para la recuperación y reutilización de la solución de soda.

Costos de inversión del proyecto

De acuerdo con el diagrama básico del proceso (P&ID) para la recuperación de soda, se realiza una cotización los equipos, elementos de control, accesorios, tubería, diseño y montaje para estimar los costos de inversión que se requieren para llevar a cabo el proyecto. Estos costos se encuentran detallados en la Tabla 5.

Tabla 5. Costos de inversión para la recuperación de soda

	Valor (USD)	Valor COP
Equipos	\$ 151.703	\$ 561.300.701
Elementos de control	\$ 21.647	\$ 80.095.181

Accesorios	\$ 4.743	\$ 17.550.000
Tuberías, soportaría	\$ 2.703	\$ 10.000.000
Diseño-planos	\$ 811	\$ 3.000.000
Montaje	\$ 17.568	\$ 65.000.000
Otros	\$ 9.459	\$ 35.000.000
TOTAL	\$ 208.634	\$ 771.945.882

Adicionalmente se deben tener en cuenta los costos operativos del sistema, como lo son la energía a utilizar, los químicos que se utilizaría en cada limpieza, entre otros. En la Tabla 6 se encuentran los valores estimados para dichos costos.

Tabla 6. Costos operativos del sistema

Operación	Unidad	Valor
Químicos (soda, detergente)	\$/mes	\$ 3.000.000
	\$/año	\$ 36.000.000
Energía Precio energía	kW/h	7,52
	kWh/mes	5415,75
	\$/kWh	220
	\$/mes	\$ 1.191.465
	\$/año	\$ 14.297.582
Agua para limpiezas	m ³ /mes	48
	\$/mes	\$ 21.600
	\$/año	\$ 259.200
TOTAL	\$/año	\$ 50.556.782

Ahorros que se tendrían con la implantación del proyecto

Si se recuperara y reutiliza una buena cantidad de agua y soda cáustica (Hidróxido de sodio, NaOH), se estarían reduciendo una cantidad considerable de desechos líquidos altamente alcalinos que deben ser tratados posteriormente antes de su disposición final, lo que implica el ahorro de cantidades importantes de agentes neutralizantes como CO₂. A su vez es importante mencionar que la temperatura del proceso se mantendrá entre los 75-85°C lo que reduciría la cantidad de vapor que es utilizado actualmente para el calentamiento de la mezcla Agua-Soda antes de ingresar al tanque de lavado. Según la información obtenida en la literatura y de acuerdo con la suministrada por el proveedor de la membrana de NF, se obtendría una recuperación del 85% de soda, sin embargo, como durante del proceso se realizarán descargas para evitar una alta concentración de sólidos en los tanques de alimentación y permeado de UF, además de contar con 2 pretratamientos (Filtración y UF), se estima una recuperación de soda del 75%. En la tabla 7 se encuentran tabulados los ahorros de soda, agua, CO₂ y vapor los cuales fueron calculados de la siguiente manera:

$$Ahorro_i \left(\frac{Ton}{mes} \right) = Consumo_i \left(\frac{Ton}{mes} \right) * 0.75 \quad Ec. 1$$

$$Ahorro_i (USD/Año) = Precio_i * Ahorro_i \left(\frac{Ton}{mes} \right) * 12 \quad Ec. 2$$

Para calcular el flujo de vapor requerido en el proceso de realizaron los siguientes cálculos

$$Flujo \ de \ Vapor \left(\frac{Kg}{h} \right) = \frac{Energia \ Requerida \ \left(\frac{Kj}{h} \right)}{\Delta h_{Tfinal} \ \left(\frac{Kj}{Kg} \right)} \quad Ec. 3$$

$$Energia\ Requerida\ \left(\frac{Kj}{h}\right) = Energia\ Requerida\ \left(\frac{Kj}{Kg}\right) * Q_{Agua\ fria}\ \left(\frac{Kg}{h}\right) \quad Ec. 4$$

$$Energia\ Requerida\ \left(\frac{Kj}{Kg}\right) = h_{T\ final}\ \left(\frac{Kj}{Kg}\right) - h_{T\ inicial}\ \left(\frac{Kj}{Kg}\right) \quad Ec. 5$$

$$Q_{Agua\ fria}\ \left(\frac{Kg}{h}\right) = \rho_{agua}\ \left(\frac{Kg}{m^3}\right) * Flujo\ del\ Agua\ \left(\frac{m^3}{h}\right) \quad Ec. 6$$

Tabla 7. Ahorros anuales con la implementación del proyecto

	Soda Cáustica		CO ₂		Agua		Vapor	
Precio	1225000	\$/ton	923000	\$/ton	450	\$/m ³	25000	\$/ton
Consumo	30	ton/mes	13	ton/mes	2880	m ³ /mes	191	ton/mes
Ahorro	22.5	ton/mes	9.75	ton/mes	2160	m ³ /mes	143.3	ton/mes
Ahorro (\$/año)	\$ 330.750.000		\$ 107.991.000		\$ 103.680		\$ 42.994.845	
	Ahorro total (\$/año)						\$ 481.839.525	

Se debe tener en cuenta que a los ahorros totales del proyecto se le debe restar los costos operativos del sistema, ya que esto será un gasto adicional del proyecto dando como resultado un **ahorro neto total de \$ 431.282.744**. Finalmente, para obtener la viabilidad del proyecto conocida como retorno que corresponde a la cantidad de años en que se pagara la inversión del proyecto y se calcula de acuerdo con la ecuación 7. Es importante mencionar que dicho valor debe ser < 2 años.

$$Retorno = \frac{\left(\frac{\$}{Año}\right)}{Ahorro\ neto\ total\ \left(\frac{\$}{año}\right)} \quad Ec\ 7$$

$$Retorno = \frac{\$ 771.945.882}{\$ 431.282.744} = 1.8$$

6. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica promedio de los puntos de muestreo permitió determinar el punto óptimo donde tomar la corriente de alimentación al proceso de recuperación de soda que corresponde a la corriente del prelavado, teniendo en cuenta que más del 90% de NaOH corresponde esta la etapa. De igual forma, se pudo determinar que más del 85% de NaOH corresponde a la etapa a la del lavado, se determinó esta etapa como el punto de la entrada para la reutilización de la corriente con la mezcla soda y agua recuperada.

En el momento de utilizar tecnología de membrana para llevar a cabo un proceso es importante considerar un pretratamiento debido al alto contenido de sólidos en la muestra y la alta DQO, con el fin evitar el ensuciamiento severo y el daño físico de la membrana. Por esta razón se considera una filtración de 50µm antes de iniciar el paso por las membranas. Entre las alternativas de membranas UF y NF, Las membranas NP030 NF fueron las mejores, pues cumple con las características necesarias para el proceso como los son rango temperatura, pH y material de la membrana, también de acuerdo a la literatura proporciona un flux de permeado. Se tuvieron en cuenta las mismas características para la selección de UF membranas cerámicas CeraQTM de QUA.

Desde el punto de vista económico el proyecto de recuperación de soda cáustica en el proceso de reciclaje de PET B2B de la empresa Enka de Colombia S.A. empleando un sistema de membranas de UF Y NF es viable pues el

retorno dio como resultado 1.8. es decir, en menos de 2 años se pagará la inversión realizada para implementar el proyecto y a partir de ese momento solo se tendrán ahorros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cihangir Varol (2008). Caustic Recovery From Highly Alkaline Denim Mercerizing Wastewaters Using Membrane Technology. Tesis de grado programa Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica del Medio Oriente (Turquía).

Cihangir Varol, Nigmet Uzal, Filiz B. Dilek, Mehmet Kitis & Ulku Yetis (2015). Recovery of caustic from mercerizing wastewaters of a denim textile mill, *Desalination and Water Treatment*, 53:12, 3418-3426.

Depuración y tratamiento de aguas residuales SM. Soluciones Medioambientales. Sitio web: <http://www.solucionesmedioambientales.com/>. Consultada en febrero de 2020.

ENKA de Colombia S.A. Sitio web: www.enka.com.co/enka. Consultada en febrero de 2020.

Microdyb-Nadir. Sitio web: <https://www.microdyn-nadir.com/>. Consultada en julio de 2020.

QUA Group. Sitio web: <https://quagroup.com/es/>. Consultada en julio de 2020.

ANEXO 1

