

Diseño de un prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de Cúcuta *

Design of a reverse osmosis prototype for wastewater treatment in the textile industry of Cucuta

Recibido: junio 2 de 2019 - Evaluado: Julio 7 de 2019 - Aceptado: septiembre 15 de 2019

Richard Omar Ruiz-Velásquez**

Para citar este artículo / To cite this Article

R. O. Ruiz-Velásquez, "Diseño de un prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de Cúcuta" Revista Interfaces, vol. 2, no. 2, pp. 39-57, 2019.

Resumen

La industria textil cada día toma más relevancia en las economías mundiales, generando que cada día se consuma mayor cantidad de agua para los procesos. Por tal motivo el desarrollo no puede realizarse sin que se produzcan efectos secundarios al medio ambiente. Por eso es indispensable tomar medidas para mejorar la calidad del agua que se utiliza y que podría reutilizarse, así como el agua que se dispone a los alcantarillados. La implementación de los equipos de ósmosis inversa ha sido de gran aporte para el mejoramiento de los procesos donde el recurso principal es el agua, por tal motivo para la industria textil de la ciudad de Cúcuta será innovador y a su vez amigable con el medio ambiente, gracias a los efectos positivos que tiene la implementación de los equipos de ósmosis, permitiéndole a las empresas reciclar el agua utilizada y disponer a los alcantarillados agua que no afecte ni altere la preservación de los demás seres vivos. Para realizar el diseño de planta de ósmosis se tuvo en cuenta las empresas más representativas del sector textil en la ciudad, seleccionando a través de la muestra de poblaciones finitas, aquellas empresas que utilizaran mayor cantidad de agua para la manufacturación textil. Actualmente no se cuenta con un análisis fisicoquímico del agua que llega a vertimiento, por tal motivo para el cálculo de membranas semipermeables,

*Artículo inédito. Diseño de un prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de Cúcuta.

** Correo electrónico: rioruve.7@gmail.com

tubos de presión y condiciones operativas requeridos para que se dé la correcta separación de los iones presentes en el agua, fue necesario tomar como referencia según la literatura una composición fisicoquímica de referencia y así obtener el cálculo de las concentraciones.

Palabras clave: contaminación, DBO, membranas, Ósmosis inversa, ph , presión osmótica, textiles, recuperación.

Abstract

The textile industry every day takes more relevance in the world economies, generating that every day companies consumes greater quantity of water for the process. For this reason, the development can't be done without environmental side effects. Therefore, it is essential to take controls to improve the quality of the water that is used and that could be reused, as well as the water that is empty to the sewerage system. The implementation of reverse osmosis equipment has been a great contribution to improve processes where the main resource is water, for this reason for the textile industry of Cúcuta, it will be innovative and at the same time friendly to the environment, due to the positive effects that the implementation of osmosis equipment has, allowing companies recycle the water used and dispose of sewage water that does not affect or alter the preservation of other living beings. To carry out the design of the osmosis plant, the most representative companies of the textile sector in the city were taken into account, selecting through the sample of finite populations, those companies that used the greatest amount of water for textile manufacturing. Currently there is no physical-chemical analysis of the water that arrives to sewage system, for this reason for the calculation of semipermeable membranes, pressure tubes and operating conditions required for the correct separation of the ions present in the water, it was necessary to take as a reference according to the literature a physicochemical reference composition and thus obtain the calculation of the concentrations..

Keywords: Contamination, BOD, membranes, reverse osmosis, pH, osmotic pressure, textiles, recovery.

1. Introducción

El agua es un componente vital e indispensable para los seres vivos, por lo tanto, se requiere que todos le demos el uso más adecuado, ya sea de suministro doméstico o industrial. Las aguas industriales producto de las

actividades de lavado y tinturado de la industria textil contiene gran cantidad de microorganismos patógenos, sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados y otros elementos que al ser liberados sin un previo tratamiento conducen a un deterioro del medio ambiente. Generalmente estas aguas residuales son descargadas directamente en las corrientes y cuerpos superficiales de agua, alterando su calidad y generando problemas ambientales a tal grado en que el agua quede inutilizable. Se estima que el 20% de la contaminación del agua industrial en todo el mundo está asociada con la fabricación de la ropa y 85% del mismo está relacionado con el proceso de tintura de telas [1].

En Colombia, de acuerdo con un Estudio Nacional de Aguas adelantado por IDEAM,[2], es claro que de no modificar las tendencias y hábitos de crecimiento continuo del consumo de agua en todos los sectores (mediante el fomento del uso racional, reducción de consumos, entre otras estrategias), Colombia en un escenario de 15 años , estará enfrentando condiciones deficitarias de agua afectando especialmente el normal abastecimiento de los sistemas de acueducto que abastecen de agua potable a la población. En virtud de lo anterior es importante estar pensando en alguna alternativa que combata el problema citado, por lo que se hace importante la adopción de sistemas de recuperación y recirculación del agua a nivel industrial urbano que es un paso estratégico y conlleva a beneficios ambientales como la reducción en el vertimiento de efluentes industriales a los cursos de agua, posibilitando la mejora en la calidad de las aguas, reducción en la captación de aguas superficiales y subterráneas, ayudando a una situación ecológica más equilibrada y el aumento de disponibilidad de agua para usos más exigentes, como el abastecimiento público, hospitalario, etc.

En el sector textil, uno de los principales procesos para la obtención de bienes es el lavado y el tinturado de las telas, los cuales generan gran impacto en el consumo de agua y el vertimiento a las aguas residuales. Por tal motivo se requiere que en Colombia se cuente con mayor seguimiento por parte de las entidades ambientales con la implementación de normas más exigentes para el vertimiento de sustancias químicas.

Actualmente las compañías del sector textil invierten poco dinero en la implementación de nuevas tecnologías que permitan reducir el consumo de agua, así como políticas de reciclaje de los productos que se producen.

Esto genera el no cumplimiento de estándares internacionales que permitan competir en nuevos mercados y los productos nacionales no tengan mayor prestigio por su falta de eco eficiencia.

De acuerdo a lo anterior, estas peligrosas descargas con altos contenidos de cloruros, a los sistemas de alcantarillado de las ciudades pueden afectar negativamente la salud humana, la fauna, ocasionando alto impacto ambiental de los ecosistemas. Así mismo este alto consumo de agua si no es controlado a nivel mundial generará una disminución de los afluentes hídricos indispensables para la supervivencia de los seres vivos.

El adecuado vertimiento de las aguas producto de las actividades de lavado y tinturado de las empresas textiles es de gran importancia para salvaguardar las condiciones bióticas de los afluentes donde llegan todos estos residuos, y teniendo en cuenta que en la ciudad de Cúcuta se cuenta con aproximadamente 12 empresas que se dedican a la producción textil, es de gran importancia llevar un control de este vertimiento del agua y todas las sustancias químicas utilizadas en el proceso y de esta forma evitar alteraciones a los ecosistemas y afluentes cercanos.

Por tal motivo este estudio impactará positivamente al medio ambiente y beneficiará la imagen corporativa a las empresas que decidan implementar el prototipo dando evidencia de ser una compañía textil comprometida con el desarrollo sostenible ante el resultado de un buen manejo del agua, a través de la implementación de un prototipo de planta para la reutilización del agua producto de las dos operaciones indispensables, el lavado y tinturado a través de ósmosis inversa.

Con la implementación de la planta de tratamiento, la empresa cumplirá con los límites máximos permisibles en los vertimientos de agua residual a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con la fabricación y manufactura de bienes. Los parámetros fisicoquímicos exigidos por la resolución 631 de Marzo de 2015 contempla que el límite permitido para el agua vertida es ph entre 6-9, Demanda química de oxígeno (DQO) 400 mg/l O₂, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) 200 mg/l O₂, sólidos suspendidos totales (SST) 50 mg/l, sólidos sedimentables (SSED) 2 ml/L, hidrocarburos totales (HTP) 10 mg/l, cadmio 0,02 mg/L, cobre 1 mg/L [3].

El método convencional de tratamiento físico químico del agua residual realizado por las empresas de la industria textil se basa en llevar el agua hacia un tanque de homogenización los cuales permiten que los sólidos queden en suspensión, y luego es llevada hacia tratamiento físico químico o clarificación del agua y posteriormente a vertimiento. De acuerdo a lo anterior a través de la implementación de la planta de osmosis inversa luego del proceso de clarificación, permitirá recuperar entre el 80% del agua que podrá ingresar nuevamente al proceso industrial y al agua de rechazo remover entre 85%-90% las sales disueltas, remoción de 100 % la turbiedad, 95% el color, 100% las grasas y aceites y una remoción del 93% de DQO y luego si llevada a vertimiento.

El diseño del prototipo basará su implementación de acuerdo al fenómeno de la ósmosis inversa, donde el solvente pasa de una zona de alta concentración a otra zona de menor concentración a través de una membrana semipermeable, ejerciendo una presión mayor a la osmótica (consumiendo energía). El solvente es obligado a pasar por la membrana en la dirección de menor concentración, separando el soluto (sustancia indeseable en el agua). Para realizar el prototipo se definirán las variables y parámetros necesarios requeridos en la construcción de la planta de ósmosis inversa permitiendo la construcción a escala piloto en diseño en planos y que su construcción permita cumplir con los requerimientos y normatividad ambiental vigente en Colombia.

2. Materiales y métodos

Se establecieron los parámetros requeridos para el tratamiento de agua para el diseño del prototipo de osmosis inversa que permita realizar la remoción de los elementos contaminantes que se encuentran en los vertimientos de las textilerías y que reincorporen el agua tratada al proceso para reutilización del agua.

Por lo tanto, para la implementación del prototipo de planta de tratamiento de agua a través de la osmosis inversa se tuvo en cuenta las empresas del sector textil de producción de bienes que se encuentran en la ciudad de Cúcuta segmentadas según la clasificación uniforme de las actividades económicas por procesos productivos CIIU C1410 Confección de prendas de vestir excepto prendas de piel.

Para el diseño del prototipo se tuvo en cuenta una población de 12 empresas, correspondientes a las más representativas del sector textil que contaban con alta producción y utilización del recurso hídrico. La muestra fue de 12 empresas de acuerdo a la fórmula para el cálculo de la muestra de poblaciones finitas [4].

Fase I Recopilación de información:

A continuación, se relacionan las 8 empresas más representativas de Cúcuta del sector textil que se clasifican según el código CIIU C1410 como Confección de prendas de vestir excepto prendas de piel que requieren del uso de agua en su proceso productivo (Tabla I).

Tabla I. Empresas del sector textil en Cúcuta

Razon Social	Consumo de Agua utilizada en el proceso industrial en promedio M ³ /d	Caudal nominal M ³ /d
Organización BLESS S.A.S.	480	31
Passion Jeans S.A.S.	250	28
Lavarapid Jeans S.A.S.	145	-
SEXY JEANS S.A.S	-	-
Industrias Cyy Mart Sociedad Anonima Simplificada	-	-
Distribuciones y Representaciones UNO S.A.S.	-	-
Arias Uribe Elbert Naun	-	-
Mega Wash Jeans S.A.S.	-	-

Fuente: Cámara de comercio de Cúcuta

Para la implementación del prototipo es importante tener claro el funcionamiento de la ósmosis, el cual es un proceso que tiene lugar cuando una membrana con permeabilidad selectiva al agua, que separa dos soluciones de diferente concentración y que se encuentran a la misma presión y temperatura. El agua, de forma natural pasa de la zona más diluida a la más concentrada.

El fenómeno finaliza cuando el aumento de presión hidrostática, en el lado de la membrana de la solución más concentrada, supone una resistencia suficiente para impedir el paso del agua proveniente de la solución diluida. La diferencia de presión entre las dos soluciones cuando se alcanza

este estado de equilibrio se denomina diferencia de presión osmótica transmembrana ($\Delta\pi$).

El proceso de ósmosis inversa se genera cuando se aplica en el lado de la solución más concentrada, una presión que origina una diferencia de presión transmembrana (Δp) superior a la presión osmótica. De esta forma se logra que el flujo de agua sea en el sentido de la solución concentrada a la solución diluida, obteniéndose agua desalada, a partir de soluciones acuosas salinas (Figura 1).

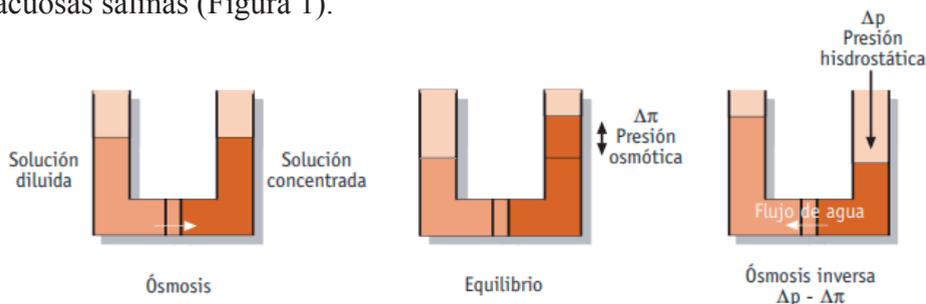


Figura 1. Ósmosis inversa.

Fuente: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales [5].

Fase II Determinación de variables y parámetros para diseño de prototipo

1. Caudal de alimentación: $\left(\frac{m^3}{día}\right)\left(\frac{m^3}{día}\right)$.

Corresponde a cierta cantidad de agua más los aditivos producto de las operaciones de lavado y tinturado de las empresas productivas de la industria textil que se desea sean ingresados al equipo de ósmosis inversa para mejorar la calidad del agua.

2. Caudal de permeado: $\left(\frac{m^3}{día}\right)\left(\frac{m^3}{día}\right)$.

Se refiere a la cierta cantidad de agua que atraviesa la membrana quedando libre de sólidos disueltos (minerales, materia orgánica, etc. y de microorganismos (virus, bacterias, etc.).

3. Caudal de rechazo: $\left(\frac{m^3}{día}\right)\left(\frac{m^3}{día}\right)$.

Corresponde al agua de la alimentación que no atraviesa por la membrana, pero que se dirige en otra dirección del equipo, limpiando el agua continuamente y extrayendo los sólidos inorgánicos y orgánicos para drenarlos.

4. Temperatura del agua que ingresa al sistema (°C)
Parámetro físico que permite medir las sensaciones de calor y frío.
5. PH Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.
6. Tubos de presión: Recipientes cilíndricos de alta presión que permiten la incorporación de las membranas de ósmosis inversa, donde sucede el proceso de separación de las concentraciones.
7. Membranas: Fibras microporosas que rechazan las impurezas y que impide el paso del agua. Las membranas rechazan las bacterias y 85%-95% de sólidos inorgánicos. En los procesos de ósmosis inversa se utilizan membranas densas, anisótropas, en configuraciones del tipo módulos enrollados en espiral, de 20 cm - 30 cm de diámetro y 100 - 150 cm de largo; que se disponen en número de 5 - 7 en el interior de carcasas de plástico reforzadas con fibra de vidrio. También se utilizan membranas del tipo fibra hueca, de 100 mm de diámetro, dispuestas en módulos que contienen 1000 unidades (Tabla II).

Tabla II. Materiales y el tipo de membranas utilizadas en los procesos de ósmosis inversa.

Material	Tipo membrana	Coefficiente de rechazo (%)	Presiones de trabajo (bar)
CA Acetato de celulosa (40 % de acetato)	Loeb-Sourirajan	95 -98	50 - 90
Poliamidas aromáticas	Loeb-Sourirajan	>99.5	
NTR (nanofiltración) Polisulfonas/alcohol polivinílico	Loeb-Sourirajan	20 - 80	3.5 - 14
NS100 Polietilenamina/tolueno	composite	>99	100
FT-30/SW-30	composite	99.3 -99.5	55
Fenilendiamina/cloruro de trimesolil		>99	15

Fuente: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales [5].

La selección de las membranas dependerá del tipo de agua que se quiere tratar, la composición química y la cantidad de permeado que se desea obtener al pasar el agua concentrada por el proceso de ósmosis inversa.

$$(1) \quad \# \text{ Membranas } (N) = \frac{\text{Caudal de permeado } (Q_p)}{\text{Variación del Flujo } (J) * \text{Área } (A)}$$

$$(2) \quad \text{Variación del Flujo } (J) = \frac{\text{Caudal nominal } (Q)}{\text{Área } (A)}$$

En la Figura 2, se puede apreciar una membrana enrollada en espiral.

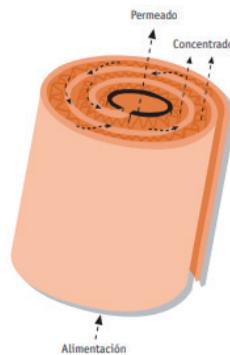


Figura 2. Membrana enrollada en espiral.

Fuente: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales [5].

8. Presión osmótica: Fenómeno que se presenta cuando se aplica una presión hidrostática necesaria para detener el flujo neto de agua a través de una membrana semipermeable que separa soluciones de composición diferente (Figura 3).

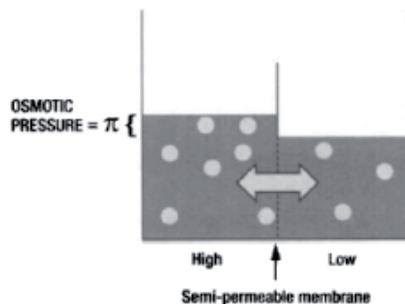


Figura 3. Reverse Osmosis.

Fuente: Industrial applications and processes [6].

$$\pi = 0,08308 * \phi * (t + 273,16) * \sum m_i$$

$$(1) \text{ Molalidad (m)} = \frac{C_i}{1000 * M * \frac{10^6 - \text{STD}}{10^6}}$$

Peso molecular (M) de los iones = Según Tabla periódica

STB (Sólidos disueltos totales)

Balance de Materia

$$C_{p_i} * Q_{p_i} = C_a * Q_{a_i} - C_r * Q_r, C_{p_i} * Q_{p_i} = C_a * Q_{a_i} - C_r * Q_r$$

$$(2) C_p = \frac{C_a * Q_a - C_r * Q_r}{Q_p}$$

$$(3) C_r = \frac{\% \text{Rechazo de sales} * C_a}{1 - \text{Eficiencia}}$$

Coefficiente Osmótico

$$(4) \phi = 1 - \frac{S}{3,375 * I} * \left(A - 2 * \ln(A) - \frac{1}{A} \right) + B * I' + C * (I')^2$$

$$(5) I = \frac{1}{2} * \sum m * Z^2$$

Z Valencia de los iones

$$I' = \frac{1}{2} * \sum m$$

$$(6) S = 1,12202 * \left(\frac{\sum m * (Z)^2}{\sum m} \right) * \left(\frac{23375,556}{D * (T + 273,16)} \right)^{\frac{3}{2}} * (\rho)^{\frac{1}{2}}$$

$$(7) \text{ Densidad } (\rho) = 1,00157 - 1,5609610^{-4} - 2,6949110^{-6} * T^2$$

$$A = 1 + 1,5 * (I)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 6,72817 - \frac{348,662}{T + 273,16} - 0,971307 * \ln(T + 273,16)$$

$$C = \frac{40,5016}{T + 273,16} - 0,721404 + 0,103915 * \ln(T + 273,16)$$

$$D = 273,76 + \frac{5321}{T + 273,16} - 0,9297 * (T + 273,16) + 0,001417 * (T + 273,16)^2 - 8,292 * 10^{-7} * (T + 273,16)$$

Actualmente en los procesos industriales de confección textil en Cúcuta cuenta con un sistema tradicional de consumo y rechazo de agua luego de finalizado el lavado y tinturado de las prendas, el cual se compone de tanques de almacenamiento de agua fresca que ingresa a los recipientes de tinturado y lavadoras industriales hasta llegar a disposición final, como lo podemos apreciar en el siguiente esquema (Figura 4):

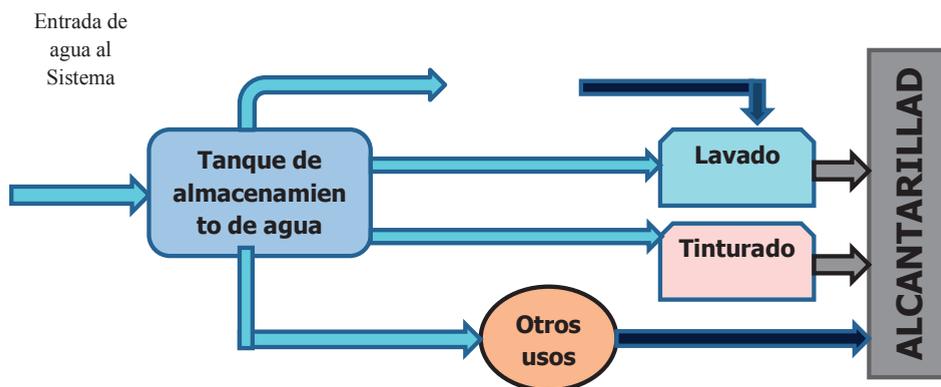


Figura 4. Etapa de tinturado y lavadoras industriales

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que a nivel nacional e internacional la implementación de los equipos de ósmosis inversa ha tomado gran importancia en las industrias de alimentos, abastecimiento de aguas para usos industriales y consumo de población y especialmente para el tratamiento de los efluentes para el control de la contaminación debido a la gran retención de la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua, así como la remoción de los materiales suspendidos por el efecto de la ósmosis a través de la membrana se planteó un prototipo que permitirá en primera medida

recuperar gran parte del agua utilizada en los procesos industriales de las empresas textiles en Cúcuta y que el rechazo de las aguas tratadas cumpla con los requerimientos ambientales exigidos por las normas Colombianas de vertimiento a los afluentes luego de procesos industriales.

El diseño que se planteó implementará un tanque de homogenización y acondicionamiento de ph del agua luego del proceso industrial, el cual ingresará por el equipo de ósmosis inversa (compuesto por una bomba de alta presión, la cual permitirá alcanzar la presión osmótica, membranas semipermeables y tubos de presión) el cuál generará dos flujos de salida (permeado, que se puede reincorporar a los procesos y el rechazo que terminará en el alcantarillado). El prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de Cúcuta que se planteó es el siguiente (Figura 5):

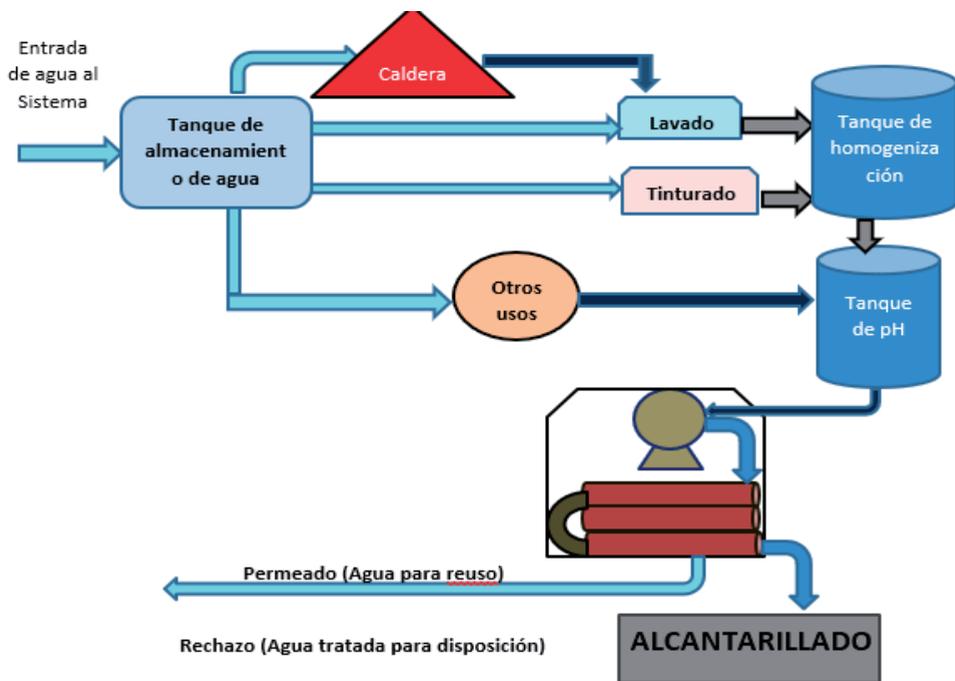


Figura 5. Prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Autor

3. Resultados y discusión

Para realizar el diseño del prototipo de ósmosis inversa fue necesario desarrollarlo a través de información recolectada de la literatura. Teniendo en cuenta que para los procesos industriales de confección textil en la ciudad de Cúcuta no se cuenta con análisis detallado del tipo de agua que se genera luego del proceso de lavado y tinturado, se tomó como referencia una caracterización fisicoquímica del agua industrial tomada de [7] (Tabla II).

Tabla II. Caracterización Agua bruta

Caracterización Agua Bruta		
Parámetros	Valores (Concentración Alimentación)	Unidad
pH	8	Unidad de pH
T	21	°C
NH ₄ + NH ₃	0	mg/L
K	364,34	mg/L
Na	8696,99	mg/L
Mg	1156,61	mg/L
Ca	358,4	mg/L
Sr	0	mg/L
Ba	0	ppb
CO ₃	21,26	mg/L
HCO ₃	195,73	mg/L
NO ₃	11,83	mg/L
Cl	16142,17	mg/L
F	0	mg/L
SO ₄	1976,29	mg/L
SiO ₂	6,22	mg/L
B	4,52	mg/L
CO ₂	0,97	mg/L
Total Sumatoria (Solidos totales disueltos STD)	28935,33	

Fuente: Nemerrow [7].

El equipo seleccionado de ósmosis inversa como ejemplo operacional fue el de la empresa DOBER OSMOTECH de Colombia el cual brinda la siguiente información (Tabla III).

Tabla III. Ficha técnica equipo Osmosis Inversa

Información operativa del equipo	
Operación	
Presión aplicada a la membrana (Pm)	43,5 atm
Diferencial de presión osmótica (DP)	18,4163 atm
Capacidad de membranas/tubo	7
% Rechazo de Sales	95-98
% Rechazo de Boro	92
Máxima presión de operación	83 atm
Eficiencia	45%

Fuente: Tomado y modificado de información operativa de Dober Osmotech [8].

Para temas operativos se tomó como referencia los caudales producidos por día y el caudal nominal suministrado por las empresas que brindaron información operacional. En la siguiente Tabla IV se muestran todas las variables e información requerida para el diseño del prototipo de ósmosis inversa.

Tabla IV. Variables para el diseño del prototipo.

Variables	Unidades
Caudal de entrada al equipo (Qa)	m ³ /d
Caudal de rechazo (Qr)	m ³ /d
Caudal de permeado (Qp)	m ³ /d
Caudal Nominal (Qn)	m ³ /d
# Membranas requeridas	und
# Tubos de presión	und
Presión osmótica	bar

(QF) Caudal de entrada, (QR) Caudal de rechazo, (QP) Caudal de permeado, (Qn) Caudal Nominal

Fuente: Tomado y modificado de información operativa de Dober Osmotech [8].

Teniendo en cuenta un balance de masa en el equipo de ósmosis, podemos determinar la cantidad de producto, rechazo y alimentación que interactúan en el equipo:

$$Q_a = Q_p + Q_r$$

De acuerdo a la ecuación obtenemos la siguiente información de caudales:

Tabla V. Caudales

	m^3/d	L / d
Caudal de entrada (Q_F)	1066,66667	1066666,667
Caudal de rechazo (Q_R)	586,66667	586666,6667
Caudal de permeado (Q_P)	480	480000
Caudal Nominal (Q_n)	31	31000

Fuente: Autor

La separación de los compuestos presentes en el agua se da gracias al efecto de la difusión que, según la ley de Fick, se presenta en las membranas semipermeables al interactuar con la solución acuosa.

$$(1) \quad \text{Membranas (N)} = \frac{\text{Caudal de permeado (} Q_p \text{)}}{\text{Variación del Flujo (J) * Área (A)}}$$

$$\text{Variación del Flujo (J)} = \frac{\text{Caudal nominal (Q)}}{\text{Área (A)}}$$

$$\text{\#Tubos de Presión} = \frac{\text{\# Membranas}}{\text{Membranas por tubo (dada por Osmotech)}}$$

El principio de ósmosis inversa se da en el equipo sólo si se alcanza la presión requerida para la separación de los compuestos presentes en el agua, y se determina el coeficiente osmótico, el cual es un valor que mide la desviación del comportamiento de un disolvente respecto de su comportamiento en condiciones ideales, según la ley de Raoult. Por lo tanto, es importante determinar a que presión se necesita llegar para que el fenómeno se pueda presentar (Tabla VI, VII, VIII).

Tabla VI. Ósmosis inversa

Ión	Concentración rechazo (mg/L)	Concentración permeada (mg/L)	Masa molar (g/mol)	Molalidad m_a	Molalidad m_R	Molalidad m_p
NH4 + NH3	0	0	35,07	0,00000	0,00000	0,000000000
K	661,11	1,619	39,09	0,00960	0,01742	0,000042659
Na	15781,08	38,653	22,99	0,38958	0,70692	0,001731483
Mg	2098,72	5,140	24,31	0,04900	0,08890	0,000217757
Ca	650,33	1,593	40,08	0,00921	0,01671	0,000040929
Sr	0,00	0,000	87,62	0,00000	0,00000	0,000000000
Ba	0,00	0,000	137,33	0,00000	0,00000	0,000000000
CO ₃	38,58	0,094	60,01	0,00036	0,00066	0,000001622
HCO ₃	355,16	0,870	61,02	0,00330	0,00599	0,000014682
NO ₃	21,47	0,053	62,00	0,00020	0,00036	0,000000873
Cl	29290,70	71,743	35,45	0,46892	0,85087	0,002084083
F	0,00	0,000	18,99	0,00000	0,00000	0,000000000
SO ₄	3586,07	8,784	96,06	0,02119	0,03844	0,000094162
SiO ₂	11,29	0,028	60,08	0,00011	0,00019	0,000000474
Br	8,20	0,020	10,81	0,00043	0,00078	0,000001914
CO ₂	1,76	0,004	44,01	0,00002	0,00004	0,000000101
Total				0,95189	1,72725	0,00423
Sumatoria						

Tabla VII. Ósmosis inversa

Ión	Valencias (Zi) ²	$m_a^*(Z_i)^2$	$m_R^*(Z_i)^2$	$m_p^*(Z_i)^2$
NH4 + NH3	0	0	0	0
K	1	0,00959827	0,0174165	4,266E-05
Na	1	0,38958366	0,7069173	0,0017315
Mg	4	0,19598093	0,3556163	0,000871
Ca	4	0,03683611	0,0668408	0,0001637
Sr	0	0	0	0
Ba	0	0	0	0
CO ₃	4	0,00145937	0,0026481	6,486E-06
HCO ₃	1	0,00330343	0,0059942	1,468E-05
NO ₃	1	0,00019648	0,0003565	8,732E-07
Cl	1	0,46891867	0,8508742	0,0020841
F	0	0	0	0
SO ₄	4	0,08474614	0,1537757	0,0003766
SiO ₂	0	0	0	0
Br	9	0,00387496	0,0070313	1,722E-05
CO ₂	0	0	0	0
Total		1,19449803	2,167471	0,0053089
Sumatoria				

$$\text{Coeficiente Osmótico } \phi = 1 - \frac{S}{3,375 * I} * \left(A - 2 * \text{Ln}(A) - \frac{1}{A} \right) + B * I' + C * (I')^2$$

$$\text{Presión osmótica } \pi = 0,08308 * \phi * (t + 273,16) * \sum m_i$$

$$\pi = 0,08308 * \phi * (t + 273,16) * \sum m_i$$

Tabla VIII. Ósmosis inversa

I'	0,475958009
I	0,475958009
D	79,8752
r	0,9971
S	1,4573
A	2,1592
B	0,0219
C	0,006947342
Coeficiente Osmótico ϕ	0,898764903
Presión osmótica π	20,9086 bar

La industria textil en la ciudad de Cúcuta en los últimos años se ha empezado a fortalecer, debido a la unión de varias empresas conformando clusters del sector textil, el cual ha permitido que diferentes empresas lleguen a producir y comercializar sus prendas en otras ciudades de Colombia. El proceso de manufactura de los textiles requiere gran cantidad de agua para sus procesos principales, el lavado y tinturado, por lo tanto, es de vital importancia tener la cuantificación del consumo y caracterización del agua que se vierte al alcantarillado.

Para el mejoramiento de la calidad del agua de los procesos industriales podría implementarse los reactores biológicos de membrana, pero las desventajas que posee es que los costos de operación son altos, por tal motivo las membranas en la ósmosis inversa es una tecnología que ya cuenta con amplia aplicación debido a la facilidad de tratar altos caudales de producto. Es importante resaltar que para realizar el diseño del equipo de ósmosis inversa no se contaba con información real del tipo y composición fisicoquímica del agua producto del proceso de tinturado de las empresas de Cúcuta, por tal motivo en esta investigación se eligió de acuerdo a la literatura las composiciones de un agua muestra común en procesos industriales del sector textil.

Para el mejoramiento de la calidad del agua, ya sea para vertimiento o para reutilización en el proceso industrial, el equipo de ósmosis inversa debe contar con la cantidad de membranas y tubos de presión necesarios para que la separación de los iones presentes en la solución sea separada.

Como recomendación para un correcto diseño de los equipos de ósmosis inversa en los procesos industriales, es la implementación de toma de muestras antes del ingreso al sistema y previo al vertimiento al alcantarillado, de esta forma se verificará si el agua vertida cumple los parámetros ambientales requeridos o si el equipo incluyendo las membranas están realizando de forma óptima la retención de los materiales pesados o por efecto del ensuciamiento su función no sea la adecuada.

Conclusiones

La implementación del equipo de ósmosis en empresas textiles en la ciudad de Cúcuta permitirá recuperar hasta el 45% del agua utilizada en los procesos industriales, brindando una imagen positiva con el medio ambiente por el reúso del recurso hídrico.

Para el diseño del prototipo de ósmosis inversa se tuvo restricción en contar con una prueba de jarras que permitiera analizar la caracterización fisicoquímica del agua que se utiliza en el proceso de lavado y tinturado, por tal motivo fue indispensable tomar como referencia un agua residual utilizada en un proceso industrial para producción textil y poder determinar las variables operativas que debe contar el equipo para que permita la separación de los componentes pesados y así mismo se recupere agua para reingresar al proceso.

Debido a que en Cúcuta no se cuenta con un proceso industrial para el mejoramiento de la calidad de las aguas que se disponen en el alcantarillado por procesos de lavado y tinturado de textiles, sería innovador para la industria Norte Sansandereana la incorporación a los procesos, las membranas semipermeables que permitirán reducir los componentes pesados de las aguas industriales y de esta forma cumplir con los requerimientos ambientales.

La correcta selección de las membranas semipermeables a utilizar en el equipo de ósmosis dependerá del tipo de agua que se genere del proceso industrial, por lo tanto, se recomienda realizar un seguimiento de las aguas que se producen, para verificar que el equipo funcione correctamente o si requiere de cambios debido al ensuciamiento por iones pesados.

Referencias

- [1] Fluence, La Huella Hídrica del Jean Azul, 2018.
- [2] IDEAM, Avance del Estudio Nacional del Agua (ENA), 2018.
- [3] Ministerio de Medio ambiente y desarrollo sostenible (marzo 17 de 2015). Norma de vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. [En línea]. Disponible en: <https://www.leyex.info/leyes/Resolucionmads631de2015.pdf>
- [4] A. Morillas. Muestreo en Poblaciones Finitas. Obtenido de Muestreo en Poblaciones Finitas 20017.
- [5] A. Rodríguez, y P. Rosal, Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, 2006.
- [6] J. Kucera, Reverse Osmosis. Industrial applications and processes. 1 ed. New Jersey: WILEY, 2010.
- [7] Nemerow, L. Tratamiento de vertidos industriales y peligroso: Ediciones Díaz de Santos, 1998. p.435.
- [8] Dober Osmotech. Ósmosis inversa, agua, plantas, tratamiento de aguas, 2019.
- [9] T. A. Hernández. Microfiltración, Ultrafiltración y Osmosis Inversa. Madrid: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia.