

Propuesta de diseño de un prototipo de un sistema a pequeña escala de purificación de agua

Design proposal for a prototype of a small-scale water purification system

Fernando Canul Bacab^{1*}, José Antonio Alonzo Pacheco¹,
Pedro Ezequiel May Hoil¹ y Claudia Guadalupe Dzib Pool¹

¹*Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Motul, Carretera Mérida-Motul, Tablaje Catastral Núm. 383, CP 97432, Motul, Yucatán, México.*

**Corresponding author:
fernando.canul@itsmotul.edu.mx*

Resumen. En la actualidad existen diferentes procesos para la purificación de agua y hacerla apto para el consumo de las personas, En este trabajo se describe el diseño de un proceso a pequeña escala de purificación de agua utilizando ósmosis inversa para la eliminación de sales, la capacidad de producción se estima que será de 200 lts por día; sin embargo se puede modificar dependiendo de las necesidades requeridas; para el diseño del proceso, construcción de la estructura y la distribución de los equipos se realizó considerando las distintas etapas de purificación. Para verificar la funcionalidad del prototipo y eliminar fugas se realizaron pruebas de hermeticidad; además, se realizaron análisis de calidad al producto encontrando los siguientes: dureza total 5 mg/L, pH 6.9, sólidos disueltos totales 18 mg/L, conductividad 8 μ s/cm, ozono residual 0.1 mg/L y color 0. En conclusión, el prototipo de purificación de agua demostró que la eficiencia de remoción de sales es superior al 90%; por consiguiente, el producto puede ser utilizado para el consumo de las personas y la capacidad de procesamiento de agua puede ser adaptado dependiendo de la cantidad de personas que le suministraran el producto, las cuales pueden ser de 5 hasta 50 individuos por día.

Palabras clave: ósmosis, pH, purificación, ozono, dureza.

Abstract. At present, there are different processes for water purification to make it suitable for human

consumption. This work describes the design of a small-scale water purification process using reverse osmosis for salt removal, with an estimated production capacity of 200 liters per day; however, it can be modified depending on the required needs. The design of the process, the construction of the structure, and the equipment distribution were carried out considering the different purification stages. To verify the functionality of the prototype and eliminate leaks, leak tests were performed; in addition, quality analyses of the product were conducted, yielding the following results: total hardness 5 mg/L, pH 6.9, total dissolved solids 18 mg/L, conductivity 8 μ s/cm, residual ozone 0.1 mg/L, and color 0. In conclusion, the water purification prototype demonstrated that the salt removal efficiency is over 90%; therefore, the product can be used for human consumption, and the water processing capacity can be adjusted depending on the number of people it will supply, which can range from 5 to 50 individuals per day.

Keywords: osmosis, pH, purification, ozone, hardness.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la creciente escasez de agua apta para el consumo de los habitantes es ocasionado por el crecimiento de la población y la contaminación [1]. En fechas pasadas, el proceso de desalinización en el agua tenía costos altos; por lo tanto, sólo se utilizaba en menor grado [2]. Existen diferentes trabajos en donde se describen metodologías para eliminar sales contenidas en

el agua y han mostrado resultados positivos [3], entre los diferentes métodos de tratamiento para hacerla apto para el consumo de la población se mencionan: intercambio iónico, ablandamiento, adición de productos químicos, utilización de suavizadores y productos químicos tradicionales [4].

Con los avances científicos y tecnológicos cada vez los métodos de tratamiento han cambiado, se han vuelto más rentables y eficientes; además, para la eliminación de sales, en las últimas décadas se ha utilizado la osmosis inversa (OI), la cual ha mostrado ser parte importante de un sistema de purificación de agua.

El proceso de OI invierte el fenómeno de osmosis natural, es uno de los procesos de separación de sales con membranas, en este proceso se aplica presión a la solución que tiene mayor concentración de sales y así se fuerza un caudal inverso a través de la membrana semipermeable; de esta manera, retiene casi todas las sales hasta un 99% menos los compuestos de bajo peso molecular, la cual dependerá de la naturaleza y estructura de la membrana orgánicos pequeños [5].

La OI tiene una alta eficacia en la remoción de sales, separación de sustancias de bajo peso molecular en solución o tratamientos de desecho; además, es utilizado ampliamente para la purificar el agua que consume la población. El sistema cuenta con válvulas al extremo de las portas membranas que regulan las cantidades de producto y rechazo de sales, este proceso es continuo y rápido, ya que al momento de que ingresa el agua a la membrana también sale el producto.

Entre los motivos por lo que se selecciona la osmosis inversa como complemento en un proceso de purificación de agua se encuentran:

- a) Este método elimina en un 99% las sales y no requiere de otro tratamiento adicional
- b) La calidad del agua es mejor que otros métodos.
- c) Es fácil de operar ya que es un proceso continuo.
- d) La operación es automática y sencilla.
- e) El tiempo de tratamiento del agua de alimentación es muy corto (segundos para obtener el producto).
- f) Dependiendo de las características del agua de alimentación, los costos de producción son relativamente bajos

El agua de alimentación para un equipo de osmosis inversa, deberá estar libre de residuos de cloro, olores, sabores extraños, así como trazas de turbidez; por lo tanto, antes de entrar al sistema es necesario someterla a un proceso de filtrado con equipos adicionales como son, filtro de antracita el cual elimina de arena y objetos sólidos, filtro de carbón activado el cual tiene la función de eliminar cloro y malos olores que pudiera traer el agua; como complementos, generador de ozono para oxidar la materia orgánica [6] y luz ultravioleta para la eliminación

de microorganismos; además, se requiere de filtros con cartuchos de una micra que son la seguridad de la membranas y evita la incrustación por sólidos suspendidos. En la actualidad el precio del agua purificada ha incrementado, siendo un proceso sencillo y de bajo costo, las empresas que se dedican al procesamiento y comercialización del agua purificada obtienen buenas ganancias y el consumidor cada día se ve en la necesidad de pagar cada vez más; por lo tanto, en este trabajo se plantea la necesidad de la construcción de un sistema de purificación de agua a pequeña escala para 5 a 50 personas y un costo accesible para la población.

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A. Metodología

Este trabajo se realizó en el Tecnológico Nacional de México, campus Motul. La institución se encuentra en la ciudad de Motul, Yucatán, México; esta actividad se ejecutó como parte de las actividades de innovación, para conocer las condiciones de operación y ensamble de los equipos de un sistema de purificación, se tomó como referencia un proceso de tratamiento de agua purificada con capacidad de 44 metros cúbicos por día; además, se verificaron los sistemas eléctrico e hidráulico, con la información obtenida se determinó las características de los equipos y la estructura de soporte del sistema de la planta piloto de agua purificada

El esquema de diseño planteado representa una configuración compacta, robusta y trasladable de lugar a otro por su tamaño (ver figura 1). Para validar la idoneidad del esquema propuesto se realizó una comparación de los resultados de los parámetros el pH, conductividad, color, dureza de calcio, dureza total, cloruros y ozono residual en el producto final con los de la norma mexicana ver Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de calidad para agua purificada. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Límites permisibles
pH	6.5-8.5
Alcalinidad mg/L (como CaCO ₃)	300 mg/L
Dureza total mg/L (como CaCO ₃)	200 mg/L
Turbiedad UTN	5 Unidades de UTN
Cloro residual	0.1
Sabor	Inodoro
Cloruros como Cl- mg/L	250 mg/L
Ozono al envasar mg/L	0.4 mg/L
Olor	Insípido
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml

Para la construcción de la estructura de soporte se utilizó madera y PTR; además, para el ensamble y distribución de los equipos se consideraron las dimensiones físicas; así como los requerimientos de energía y del sistema hidráulico; a partir de los análisis de los requerimientos,

se procedió a la adquisición de los equipos, cables, conexiones y mangueras.

Después del ensamble de la planta piloto de agua purificada, se realizaron pruebas de operación con los equipos en condiciones normales con la finalidad de verificar el funcionamiento y encontrar posibles fugas de agua en las tuberías y equipos.

Para la toma de la muestra del agua procesada se deberá realizar en la tubería de salida y con la finalidad de eliminar el agua estancada dentro del ducto se dejará fluir el agua. La toma de muestra del agua purificada se realizó en el muestreador de salida del sistema y analizadas al momento con la finalidad de conocer la eficiencia de remoción de sales y corregir cualquier desviación.

B. Análisis físicos y químicos del agua

Para la determinación de la calidad del agua purificada se realizaron los siguientes: para la determinación del pH se utilizó un potenciómetro marca Hach Sesión+PH1, modelo LPV2500.98.0002 con un electrodo Sesión CAT 5050T para PH1, uso general y cuerpo de plástico; además, se realizaron las pruebas tomado como referencia las normas mexicanas, las cuales se enumeran a continuación; para la determinación del color se utilizó la norma NOM-001-STPS-2008 [7], para olor la norma NOM-AA-83-1982 [8] La conductividad fue determinada con un equipo marca Hach Sension+ EC5 y con celda de conductividad se 5060 con sensor de platino y temperatura de acuerdo a la norma NOM-AA-093-SCFI-2000 [9]. Para la determinación de solidos disueltos totales se utilizó un medidor de TDS marca HM digital, con un rango de 0 – 9990 ppm (mg/L) de acuerdo a la norma NOM-AA-034-SCFI-2015 [10]. El ozono fue determinado con un Kit de prueba, modelo OZ-2, con rango de 0 a 22 mg/L. Para la determinación de turbiedad se utilizó la norma NOM-AA-038-SCFI-2001[11]. Para la determinación de dureza se realizó de acuerdo a la norma NOM-AA-072-SCFI-2001 [12].

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La investigación realizada para la construcción de este escrito se basó en análisis de artículos científicos, misma que fueron complementadas con información obtenida de experiencias de personas especializadas en temas de tratamiento de aguas claras y circuitos eléctricos.

A. Ensamble de los equipos

Para la instalación de los equipos se requirió de conocimientos de sistemas hidráulicos y electricidad; por lo tanto, fue necesario el apoyo de docentes que imparte asignaturas involucrados en estos temas en donde desarrollaron y aplicaron sus competencias para la

selección de los equipos de acuerdo a las capacidades requeridas.

Durante el acoplamiento de los equipos se presentaron problemas para conectar el sistema hidráulico y eléctrico ocasionado por el espacio reducido de trabajo y diferencias de voltaje; por lo tanto, se requirió de ajuste en las configuraciones y modificación de las conexiones hidráulicas; por consiguiente, fue necesario realizar pruebas con diferentes disposiciones en la distribución de los equipos (ver figura 1)

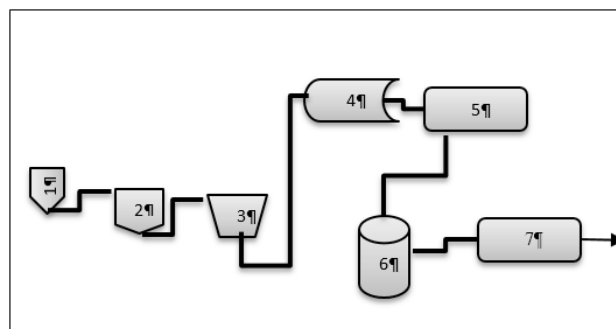


Figura 1. Esquema del proceso de purificación. Fuente: Elaboración propia.

- 1.- Filtro de antracita
- 2.- Filtro de carbón activado
- 3.- filtro pulidor
- 4.- Equipo de osmosis
- 5.- Generador de ozono
- 6.- Agua purificada
- 7.- Luz ultravioleta

La realización de esta actividad permitió profundizar más los conocimientos en sistemas de tratamientos de aguas claras.

B. Agua purificada

A continuación, se muestran los valores de los parámetros analizados del agua ya procesada (agua purificada), ver Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del agua purificada [13] . Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Resultados	NOM-127-SSA1-2017
Color	cero	20 unidades
Olor	Inodoro	Inodoro
Sabor	Insípido	Insípido
Cloruros mg/L	0	250
Dureza Total mg/L	0	500
Turbiedad UNT	0.1	
pH	6.9	65-8.5
Conductividad μ S/cm	8	
Ozono mg/L	0.1	
SDT mg/L	18	100

Los resultados obtenidos en las pruebas realizada muestran que se encuentran dentro de norma (ver tabla

II), en pruebas organolépticas de color, olor y sabor, no se encontraron desviaciones cumplen con lo que indica la norma; además se realizó una comparación con un sistema de purificación de agua de capacidad de tratamiento de 40000 lps/día encontraron resultados similares [14]; inclusive los SDT fueron menor (< 50%) en el prototipo. En las pruebas de dureza total y cloruros se encontraron resultados de 0.0 mg/L, lo que indica una alta eficiencia de remoción. En cuanto a la prueba de turbiedad el cual representa la materia que se encuentra suspendida, el resultado obtenido de 0.1 UNT muestra que el producto se encuentra libre de partículas suspendidas; la conductividad reportada de 8 μ S/cm y los SDT de 18 mg/L, indica la alta eficiencia ($\leq 99\%$) de eliminación de sales por el sistema. Malaeb and Ayoub-[15], en una revisión de trabajos de diferentes autores encontró rechazos de sales superiores al 99,5 y 97,8% utilizando equipo de osmosis inversa; de la misma manera, Tang, et al.-[16], realizaron trabajos utilizando osmosis inversa y mencionan que puede lograr alta eficiencia de eliminación de sales, materia coloidal, sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica del agua de alimentación; además, la alta estabilidad del permeado garantiza una de calidad continua del producto, de la misma manera Zhang, describen que la utilización de OR tiene aceptación para la remoción compuestos orgánicos, inorgánicos y microorganismo [17] .

En cuanto a la concentración de ozono residual en el agua purificada antes de envasarse registro un promedio en un intervalo de 0.1 a 0.15, lo que garantizó la completa oxidación de la materia orgánica; por consiguiente, la eliminación de los microorganismos. [Galvis., et al.-[18]], mencionan que las partículas suspendidas que ocasiona la turbiedad disminuye la efectividad del ozono en el agua ya que sirve como una barrera protectora para los microorganismos; además, la presencia de ciertos metales como el hierro y manganeso disminuye la concentración; por otra parte, Malaeb and Ayoub-[15] describen que las concentraciones de ozono de 0,30 mg/L reducen la turbidez y mejorando la eficiencia de remoción. por consiguiente, su efectividad de destrucción de los microorganismos; además, describe la importancia de realizar desarrollos tecnológicos para ponerlos al servicio de la sociedad, como es el uso del Ozono en la Desinfección de Agua para Consumo Humano”.

IV. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos se determinó que el agua procesada se considera apta para el consumo de las personas. El trabajo realizado para el diseño y distribución de los equipos en el prototipo de planta de agua purificada, trajo resultados positivos a docentes y alumnos que participaron en el proyecto. Los alumnos aplicaron los conocimientos adquiridos en asignaturas como son el manejo de programas de simulación, autocad, metodología de la investigación y de la normatividad mexicana que se aplica para agua de consumo; además,

visualizaron la importancia del trabajo en equipo, el cual es necesario para su desarrollo profesional

La realización de este tipo de proyecto demuestra la competencia de las personas que participaron para desarrollar proyectos creativos en beneficio de los habitantes; además, debido a sus características, puede ser trasladado y utilizado en donde sea requerido por la población. Se recomienda realizar un programa de mantenimiento preventivo; así como, limpieza periódica de los equipos.

REFERENCIAS

- [1] Mastropietro, T. F., Bruno, R., Pardo, E., and Armentano, D. (2021) Reverse Osmosis and Nanofiltration membranes for highly efficient PFASs removal: overview, challenges and future perspectives, Research Gate. 1-13,
- [2] Yusuf, A. *et al.* (2020) A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment, J. Clean. Prod. 1-45, 266
- [3] Basile, A., Cassano, A., and Rastogi, N. K. (2020) Reverse and Forward Osmosis: Principles, Applications, Advances, C. T. a. F. D. o. B.-. Membranes, United Kingdom
- [4] ZELADA, F. F. S. (2015) “Producción de agua de mesa por ósmosis inversa para autoabastecimiento de UDEP. Licenciatura, Universidad de Piura, Piura, Perú.
- [5] Zhang, X. and Liu, Y. (2020) Reverse osmosis concentrate: an essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability, Chemical Engineering Journal. 1-43,
- [6] Vicent, S. C., Clavijo, J. G. B., Cuenca, R. M., and (eds.), J. C. A. (2017) Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua, Universitat Jaume. 1-170,
- [7] Federación, D. O. d. I. (2008.) Norma oficial Mexicana. Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad., DOF.
- [8] Federación, D. O. d. I. (1982) Norma Oficial Mexicana. N. M., "ANÁLISIS DE AGUA.- DETERMINACION DE OLOR," DOF.
- [9] Federación, D. O. d. I. (2010) Norma Oficial Mexicana . NMX-AA-093-SCFI-2000, "Análisis de agua -determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba, DOF.
- [10] Federación, D. O. d. I. (2015) Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-034-SCFI-2015, "Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba, DOF.
- [11] Federación, D. O. d. I. (2001) Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-038-SCFI-2001, "Análisis

- de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba, DOF.
- [12] Federación, D. O. d. I. (2001) Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-072-SCFI-2001, "Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba, DOF.
- [13] Federación, D. O. d. I. (1995) NORMA OFICIAL MEXICANA BIENES Y SERVICIOS. AGUA PURIFICADA ENVASADA. ESPECIFICACIONES SANITARIAS., DOF.
- [14] Bacab, F. C., Pacheco, J. A. A., and Dzib-Pool, C. G. (2021) Análisis de la factibilidad de uso del agua tratada en la planta purificadora del Instituto Tecnológico Superior de Motul y su aplicación como herramienta de aprendizaje, CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO. 49-57, 1, Número 7
- [15] Malaeb, L. and Ayoub, G. M. (2011) Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review, *Desalination*. 1-8, 267
- [16] Tang, F., Hu, H.-Y., Sun, L.-J., Sun, Y.-X., Shi, N., and Crittenden, J. C. (2011) Fouling characteristics of reverse osmosis membranes at different positions of a fullscale plant for municipal wastewater reclamation, *Water Research*. 1-30,
- [17] Zhang, X. and Liu, Y. (2021) Reverse osmosis concentrate: an essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability, *Chemical Engineering Journal*. 1-43, 421
- [18] Galvis., A., Aponte, G., Echeverry, D. F., González, M. I., and Cardona, D. A. (2005) Evaluación del funcionamiento de un Generador de Ozono a escala piloto en la desinfección de agua para consumo humano, *Ingeniería y Competitividad*. 65-72, 7