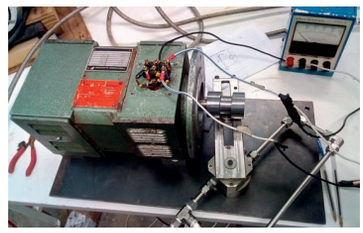
Diseño y fabricación de válvula pulsante para generación de flujos variables en módulos de desalinización por ósmosis inversa



Design and manufacturing of a pulsatile valve for generating variable flows in reverse osmosis desalination modules

Ismael Murillo-Verduzco[1], Manuel Herrera-Sarellano[1], Rafael Alfonso Figueroa-Díaz[1], Gustavo Adolfo Fimbres-Weihs[2] y Roel Antonio Castro-Quintero[1]
Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). [1] Dpto. Ingeniería Mecánica y [2] Dpto. Ciencias el Agua y Medio Ambiente. Antonio Caso #2266 - 85132 Villa ITSON, Cd. Obregón, Sonora (México).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9486 | Recibido: 07/11/2019 • Inicio Evaluación: 22/07/2019 • Aceptado: 07/01/2020

ABSTRACT

- It has been reported that pulsatile flow promotes greater permeate in reverse osmosis (RO) operations through the generation and shedding of vortices, increasing mass transfer and hindering the onset of fouling through the effect of higher shear rate. In this project, a valve has been manufactured that generates pressure variations in water flow as determined by simulation studies at pressures between 4826 and 6205 kPa, flow rates in the range of 0.6 to 1.2 L/min, and a range of frequencies from 10 to 45 Hz, in order to increase the permeate flow in RO desalination modules. In addition, its performance is experimentally tested. For its development, the engineering design method is employed using Newton´s second law, the conservation law –applying Bernoulli´s principles, as well as the angular momentum equation. The best result using RO membranes is under pulsatile flow induced in the feed flow at Q = 0.6 L/min, p = 6205 kPa and f = 40 Hz when the flow is not turbulent. The generated pulsatile flow increases the quantity of permeated water, reduces the formation of fouling layers on the membrane and consequently reduces the frequency of membrane replacement. The pulsatile valve has the necessary requirements in order to be part of any RO system.
- **Key Words:** Pulsatile Valve, cam-follower mechanism, DC motor, Reverse Osmosis.

RESUMEN

En operaciones de ósmosis inversa (OI) se ha publicado que el flujo pulsátil promueve un mayor permeado mediante la generación y desprendimiento de vórtices, aumentando la transferencia de masa y propiciando un menor nivel de ensuciamiento a través del efecto de la velocidad cortante. En el presente proyecto se ha construido una válvula que genera las variaciones de presión en un flujo de agua determinadas por simulación, donde es necesario tener presiones que varíen de 4826 a 6205 kPa, con caudal de 0.6 a 1.2 L/min y rango de frecuencias de 10 a 45 Hz, y así aumentar el permeado de agua mediante flujo pulsátil en módulos de desalinización por OI. Además, se demuestra experimentalmente su funcionamiento. Para su desarrollo, se utilizó el método de diseño de ingeniería usando los principios de la segunda ley de Newton, la ley de conservación aplicando los principios de Bernoulli y la ecuación de momento angular. El mejor funcionamiento de permeado en membranas de OI se presenta con un flujo pulsátil en el caudal de alimentación a Q = 0.6 L/min, p = 6205 kPa y f = 40 Hz cuando el flujo no es turbulento. El flujo pulsátil generado aumenta la cantidad de agua permeada, reduce la formación de capas de ensuciamiento sobre las membranas y con ello puede reducir la frecuencia de cambio de las membranas filtrantes. La válvula pulsante tiene los requerimientos necesarios para integrarse en cualquier sistema de ósmosis inversa existente.

Palabras clave: Válvula pulsante, mecanismo leva-seguidor, motor CD, Ósmosis Inversa.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de membranas hoy son sistemas de separación estándar, utilizados en gran variedad de aplicaciones industriales, incluyendo la producción de agua y tratamiento de aguas residuales. Su diseño modular y flexibilidad de operación significa que pueden ser utilizadas tanto en el abastecimiento de agua a gran escala (p.ej. producción de agua potable) así como en sistemas pequeños de producción móvil (p.ej. en respuesta a desastres naturales). Desde el 2004, las tecnologías de membranas han sido el sistema dominante para tratamiento de aguas en Europa [1].

Existen dos tipos de módulos comúnmente disponibles para la separación basada en membranas, conocidos como las membranas de fibra hueca, y las membranas enrolladas en espiral (MEE). Las MEE son usualmente la mejor opción para aplicaciones industriales de ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UF) [2-3].

Por otra parte, el verdadero auge de las válvulas comienza de forma paralela a la revolución industrial. En 1705 Thomas Severy inventó la primera máquina de vapor (anteriormente Somerst tuvo la ideología acerca de las máquinas de vapor) la cual, dentro de sus principales componentes estarían las válvulas. Estas mismas darían paso al vapor dentro de ellas soportando presiones que se generan dentro de la máquina [4].

Recientemente se han empleado técnicas de simulación de la dinámica de fluidos en el estudio de sistemas de membranas [5]. Las técnicas de simulación reducen significativamente el tiempo, costo y riesgo asociado con los experimentos [6]. También se han utilizado las simulaciones para diseñar estrategias óptimas de control de los sistemas de membranas para maximizar su producción [7], así como para modelar el ensuciamiento dentro del canal de membranas [8]. En operaciones de microfiltración MF se ha visto que el flujo pulsátil promueve el desprendimiento de las capas de ensuciamiento a través del efecto de la velocidad cortante [9-11]. Para OI, estudios recientes utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) han publicado que el flujo pulsátil promueve

un mayor permeado mediante la generación y desprendimiento de vórtices aumentando la transferencia de masa [12-13].

Dichos trabajos realizaron un estudio paramétrico utilizando flujo pulsátil a diferentes frecuencias y amplitudes, en canales de membranas obstruidos por mallas espaciadoras. Sin embargo, para identificar los mecanismos de mejoramiento de transferencia de masa, y las condiciones óptimas que llevan a la máxima productividad del sistema de membranas, no se han publicado estudios experimentales. Para dicho estudio se necesita de un prototipo que, dentro del sistema de OI realice cierta función con dichos parámetros para modificar el proceso de separación en una forma mejorada. Por esto, se optó por diseñar e incorporar un prototipo de válvula pulsante al sistema de OI y así mejorar la transferencia de masa dentro del módulo de membrana, logrando desprender vórtices y mejorar el desempeño de la operación, mediante el control del ancho de pulso de banda y la frecuencia dentro de un flujo de agua pulsátil.

2. MÉTODO

2.1 DISEÑO DE LA VALVULA PULSANTE

Se trabajó inicialmente en una válvula comercial con la función de pulsar a cierta frecuencia y que se pueda controlar el ancho de banda que requiere el proceso de ósmosis inversa "Desaladora". Lo más cercano fue una electroválvula marca ODE, modelo 21AN2KOT12-XC. Válvula solenoide para alta presión, acción directa -2/2 vías, normalmente cerrada. Los datos técnicos de la electroválvula son los siguientes:

- Montaje sobre placa
- Máxima presión permitida: 100 bar
- Brida de interfaz 30x30, 1/8", 1/4", 3/8", 1/2"
- Material del diafragma: teflón -40 °C +180 °C
- Presión mínima de 0.1 bar
- Bobina estándar serie 8W Ø 13
- Otras aplicaciones: automatización, A/A, calefacción, refrigeración.

El problema detectado al trabajar en la electroválvula es que se bloquea el vástago a baja frecuencia (15 Hz) sin controlar la presión.

El método propuesto se utiliza para realizar el diseño de la válvula pulsante, por donde fluirá el agua. Producto del desarrollo de una serie de metodologías de diseño [14], en la Figura 1 se puede apreciar el prototipo virtual de la válvula pulsante (la cual se representa en un software 3D), para que posteriormente se obtuviera un prototipo funcional y finalmente se fabricara en físico para evaluar su desempeño.

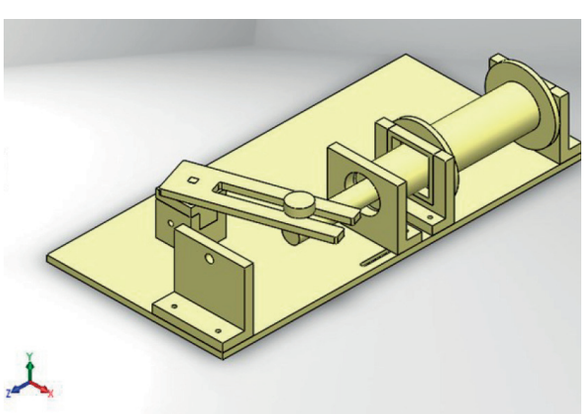


Figura 1: Prototipo virtual de la válvula pulsante

Para ello, se necesitan conocer los siguientes parámetros del modelado:

- Variación de presión entre 4826 y 6205 kPa.
- Frecuencia entre 10 y 45 Hz.
- Densidad del agua salada ρ = 990 - 1050 kg/m^3.
- Flujo volumétrico o caudal hasta 1.8 L/min.
- Temperatura entre 15 °C y 40 °C
- Oscilaciones del fluido mediante pulsos.

Considerando estos parámetros de diseño y con base en la ecuación de Bernoulli, la segunda ley de Newton y la conservación de cantidad de movimiento fueron utilizadas para encontrar la fuerza de reacción que existe en el área de obstrucción del fluido [15].

Teniendo en cuenta las leyes de conservación. En este caso, la conservación de la masa es trivial dado que solo se tiene una entrada y una salida; entonces el flujo de masa que entra es igual al flujo de masa que sale [15]. Considerando que el agua es incompresible y el diámetro de paso constante, las velocidades promedio del fluido son iguales y por lo tanto se determina que son:

$$v_2 = v_1 = v = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \quad (1)$$

Donde:
v_2 = velocidad de salida
v_1 = velocidad de entrada
v = velocidades promedio
$\dot{V}$ = flujo volumétrico promedio
A_c = área de la sección del codo (tubería lineal)

También:

$$\dot{m} = \rho\dot{V} \quad (2)$$

Donde:
$\dot{m}$ = flujo de masa a través de una entrada o salida
ρ = densidad del agua a temperatura ambiente
$\dot{V}$ = Gasto o flujo volumétrico

Mediante la ecuación de Bernoulli se calcula la velocidad de salida, teniendo en cuenta una altura de igual magnitud en ambos lados de la válvula, se elimina el término de alturas y queda solamente despejar (V2) para conocer el otro valor de la siguiente ecuación [15]:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (3)$$

Dónde:
$p_1 = p_2$ = presión estática
ρ = densidad del fluido
v = velocidad del fluido
g = gravedad
$z_1 = z_2$ = altura sobre el nivel de referencia

Teniendo en cuenta la ecuación de la cantidad de movimiento que se muestra a continuación se usa para calcular la fuerza resultante en el codo de la válvula pulsante.

$$\sum \vec{F} = \sum_{Sal} \beta\dot{m}\vec{v} - \sum_{Ent} \beta\dot{m}\vec{v} \quad (4)$$

Donde:
F = fuerza neta
β = factor de corrección del flujo de cantidad de movimiento
$\dot{m}$ = flujo de masa a través de una entrada o salida
v = velocidad de entrada o salida

Teniendo la fuerza que se requiere en la obstrucción del flujo, considerando la presión máxima, de acuerdo a las dimensiones del conducto para el flujo de 1.8 L/min y a partir de la fuerza de obstrucción se determina el radio en la parte interna de la válvula con la fórmula del torque [15]:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \tag{5}$$

Donde:
τ = momento o torsión
r = radio
F = fuerza

A continuación, se presenta cómo se calcula el diámetro del eje de la válvula conociendo los momentos torsionales interno y externo, basándose en el esfuerzo cortante torsional y deformación torsional de acuerdo al material acero inoxidable seleccionado que soportará las variaciones de velocidad del motor. Para esto se requirieron las siguientes fórmulas:

$$\Gamma_{max} = \frac{\tau c}{I} \tag{6}$$

Donde:
Γ_{max} = esfuerzo cortante máximo
τ = par de torsión aplicado en la sección de interés
c= distancia del eje a la superficie
I = momento polar de inercia de la sección transversal

$$I = \frac{\pi D^4}{32} \tag{7}$$

D = diámetro de la flecha; $D = 2r$

Con la longitud ya establecida del radio exterior y teniendo conocimiento del material, se calcula el momento con la ecuación (5) y posteriormente con el módulo de deformación y parámetros establecidos por el material se calcula la deflexión máxima permisible establecida por la siguiente ecuación:

$$y_{max} = \frac{-FL^3}{3EI} \tag{8}$$

Donde:
y_{max} = flexión máxima relativa
F = fuerza
L = longitud del pasador
E = módulo de elasticidad
I = momento de inercia

Donde el momento de inercia se calcula de la ecuación (7). Con el momento torsional y considerando una propiedad del material se calcula el esfuerzo flexionante real:

$$\sigma = \frac{M}{S} \tag{9}$$

Donde:
σ = esfuerzo flexionante real
M = brazo de palanca
S = constante de propiedad de sección del material

2.2 DISEÑO DEL MECANISMO MOTRIZ POR SOLENOIDE

Con el mecanismo motriz activado por solenoide se caracterizó el desplazamiento del brazo externo de la válvula pulsante en 5 mm para la presión baja y alta obteniendo un intervalo de desplazamiento del área de obstrucción.

Para el sistema motriz por solenoide se utiliza la ecuación (5) para el torque exterior; para ello se usó la siguiente formula basada en momentos magnéticos la cual calcula los parámetros del solenoide [16].

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{N^2 A \mu_0}{c^2} \tag{10}$$

Donde:
F = fuerza exterior del codo en Newton
i = corriente máxima del solenoide
N = número de vueltas
A = área del solenoide
c = apertura del solenoide
μ_o = permeabilidad magnética del aire

Una vez obtenidos los parámetros del solenoide se procede a imprimir en 3D el carrete para proceder a bobinar con el calibre calculado.

2.3. DISEÑO DEL MECANISMO MOTRIZ POR LEVA-SEGUIDOR IMPULSADO CON MOTOR DE CD

Con el intervalo obtenido mediante el mecanismo motriz activado por el solenoide se definió el desplazamiento de la trayectoria del seguidor en función del ángulo de giro de la leva, como se muestra en la Figura 2. Gráfica obtenida mediante el análisis en software de Diseño Asistido por Computadora (CAD).

Una vez obtenido el desplazamiento de la leva-tambor se adapta a un motor de corriente directa el cual tiene las siguientes características:

Motor de corriente directa CD en derivación:
Voltaje: 160 V
Corriente: 6 A
Velocidad de giro = 3600 r.p.m.

Se optó por el motor de corriente directa debido a que su velocidad de giro se controla mediante la resistencia de ajuste y el voltaje suministrado por una fuente de corriente directa. A 1000 r.p.m. se encontró el ancho del pulso requerido por el sistema de desalinización por ósmosis inversa.

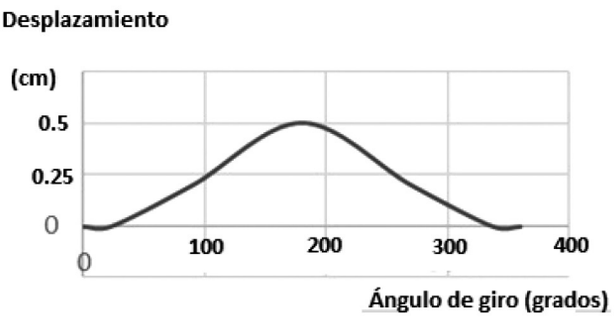


Figura 2: Desplazamiento leva-tambor en función del ángulo de giro

Se utilizó la ecuación de esfuerzo cortante para obtener el diámetro requerido del seguidor de la leva.

$$\tau = \frac{V}{A} \tag{11}$$

Donde:
τ = Esfuerzo máximo de corte
V = Fuerza Cortante
A = Área de sección transversal

Se calculó la deflexión máxima mediante la fórmula de una carga en uno de sus extremos para ver si el seguidor entraba en el rango de deflexión permitido.

$$y_b = y_{\max} = \frac{-FL^3}{3EI} \tag{12}$$

Donde:
$y_b = y_{max}$ = deflexión máxima
F = fuerza en el extremo
L = longitud del seguidor
E = módulo de elasticidad del material
I = momento de inercia

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño de la válvula pulsante se apoya en los cálculos de la ecuación de Bernoulli, la segunda ley de Newton, la conservación de cantidad de movimiento, fuerza mecánica en un circuito magnético lineal excitado por una fuente, torque mecánico y la ley de Ohm. Para ello fue necesario agregar otras teorías basadas en máquinas eléctricas de corriente directa y mecanismos leva-tambor con corredera, así como teoría de vigas en voladizo para desplazamiento lineal de un seguidor. Los resultados obtenidos fueron parámetros de diseño y modelado, para ser evaluados después en un prototipo funcional y hacer cambios. Se realizó prueba sin carga para comprobar el funcionamiento del solenoide el cual excitándolo con pulsos de corriente directa a 6 A y 110 V CD funcionó correctamente. Posteriormente se hizo la prueba con carga. En esta última prueba, al inicio funcionó correctamente solo que al incrementar y llegar a una frecuencia más alta el solenoide se quedaba en un intervalo máximo de 30 Hz. Aquí el caudal del fluido era lo suficientemente fuerte para no moverlo, y no se visualizaba el movimiento del solenoide.

Con resultados no satisfactorios fue evidente que el solenoide no proveía la presión mínima que el sistema requería de 4826 kPa quedando en las 6205 kPa sin variar su presión. Por esto se optó por mejorar el mecanismo. En el sistema motriz con solenoide se logró caracterizar las distancias del brazo para determinar las presiones máximas y mínimas. Considerando esa distancia de desplazamiento se diseñó un nuevo sistema motriz usando el mecanismo leva-seguidor-corredera. Obteniendo el sistema leva-tambor el cual es impulsado por motor de corriente directa.

Se optó por un motor de CD, en el cual variando su velocidad se podría llevar a obtener frecuencias diferentes en los pulsos de la válvula. La leva de tambor conectada a su eje con una ranura que nos indica un desplazamiento del rango obtenido mediante pruebas por el solenoide (Figura 3).

Con esta nueva mejora al mecanismo de animación el prototipo quedo completado de tal forma que mediante pruebas se observó que la generación de pulsos cambia a frecuencias diferentes cuando varía la velocidad del motor, y quedó comprobado que el rango especificado

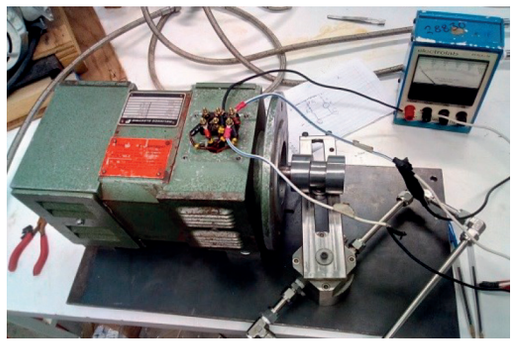


Figura 3: Mecanismo de válvula con leva-tambor implementado con motor CD

de presión estaba entre los 4826 y 6205 kPa. Este rango se observa y monitorea en un flujo pulsátil mediante el software LabVIEW a través de lecturas en sensores colocados en un sistema hidráulico experimental, en serie con módulos de membrana de flujo cruzado para el permeado de agua salina, en el cual se han colocado sensores de pulsos y manómetros en la entrada y salida del circuito hidráulico.

En la sección experimental es posible observar cómo las diferentes frecuencias pueden influenciar en el permeado de agua a través de las membranas en el proceso por ósmosis inversa. Esto es más visible en la Figura 4, donde el flujo de la bomba es de Q = 0.6 L/min y la presión p = 4826 kPa. Se observa cómo cada frecuencia tiene pendiente diferente, lo cual permite identificar qué frecuencia tiene mayor permeabilidad. En este caso se encuentra que con la frecuencia de f = 20 Hz después de cierto tiempo de operación se tiene una cantidad mayor de agua permeada.

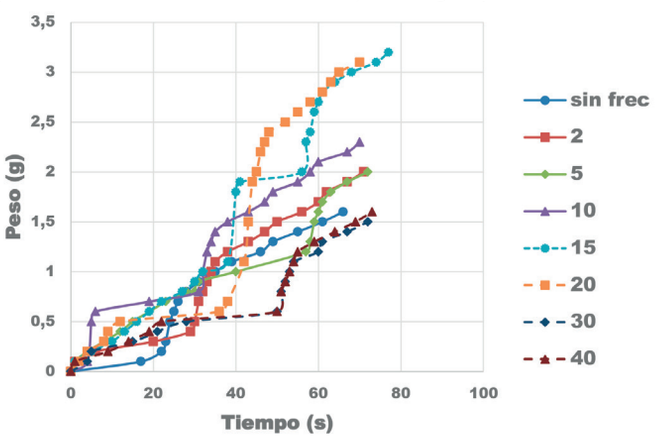


Figura 4: Masa permeada de agua por la membrana a diferentes frecuencias de la válvula

A continuación, se mantuvo el mismo caudal Q = 0.6 L/min con un incremento en la presión a p = 5515 kPa, obteniendo el mejor resultado de filtración de agua a una frecuencia f = 40 Hz como se observa en la Figura 5.

Posteriormente, se dejó el mismo flujo Q = 0.6 L/min, pero con un incremento a la presión p = 6205 kPa, donde el mejor resultado se presentó a f = 40 Hz (Figura 6).

De manera análoga, se varió el flujo a Q = 0.9 L/min y presión p = 4826 kPa, obteniendo el mejor resultado a f = 15 Hz.

A continuación, se mantuvo el caudal Q = 0.9 L/min, pero con p = 5515 kPa, observando el mayor permeado de agua a f = 20 Hz.

Posteriormente, se operó la bomba Q = 0.9 L/min, p = 6205 kPa, donde no se notan muchos cambios de una frecuencia a otra, esto se debe a que el flujo es turbulento. Aquí es necesario un mayor consumo de energía eléctrica para mover una mayor cantidad de líquido.

Finalmente se varió el flujo a Q = 1.2 L/min y p = 4826 kPa, donde se permeó la mayor cantidad de agua a f = 15 Hz.

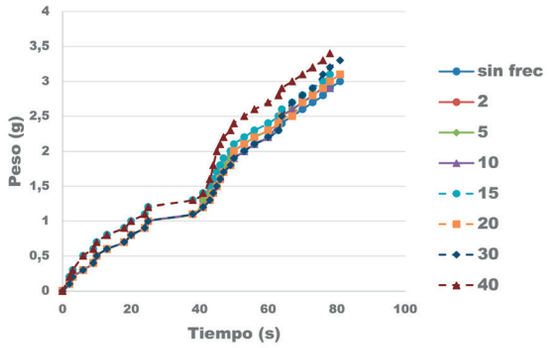


Figura 5: Masa permeada de agua por la membrana a diferentes frecuencias de la válvula

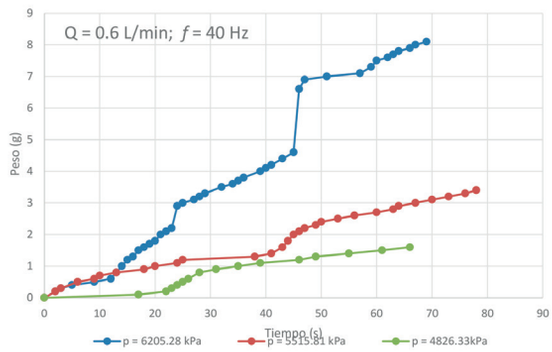


Figura 7: Masa permeada de agua por la membrana a diferentes presiones del fluido

A continuación, se operó la bomba Q = 1.2 L/min y p = 5515 kPa, donde es de notarse que no existen muchos cambios de una frecuencia respecto a otra. Esto se debe a que el flujo en estos casos es turbulento. En dicho régimen de flujo los vértices se desprenden naturalmente, lo que significa que las oscilaciones de la válvula ya no afectan de manera significativa el permeado de agua a través de las membranas.

Es importante remarcar que al utilizar agua salada no significa que el agua sea más limpia en un caso que en los otros casos de estudio, solo se sabe que permea más en una frecuencia especifica que en las otras frecuencias. Las pruebas se hicieron en 1 minuto y se registró la cantidad de agua que permeaba el sistema.

En forma transversal se observa que al comparar el bombeo con flujo variable Q = 0.6, 0.9 y 1.2 L/min y presión p = 4826 kPa, el mayor permeado se presenta con Q = 0.6 L/min y f = 20 Hz de la Figura 4.

Análogamente al operar el bombeo con flujo variable Q = 0.6, 0.9 y 1.2 L/min y presión p = 5515 kPa, la mayor cantidad permeada se observa con Q = 0.6 L/min y f = 40 Hz de la Figura 5.

Finalmente al comparar Q = 0.6, 0.9 L/min y p = 6205 kPa, la mayor permeabilidad de agua se presenta con Q = 0.6 L/min y f = 40 Hz (Figura 6).

En la Figura 7 se establece como referencia Q = 0.6 L/min, f = 40 Hz y p = 4826 kPa con masa permeada de 1.6 g; al aumentar la presión a p = 5515 kPa sin modificar el flujo ni la frecuencia la masa permeada se incrementa 112.5 %; y al aumentar la presión a p = 6205 kPa manteniendo fijo el flujo y la frecuencia la masa permeada se incrementa 506.25% respecto a la referencia.

Es posible deducir que la apertura y cierre de la válvula si influye sobre el permeado del agua a través de la membrana cuando el flujo no es turbulento. Así mismo, el incremento de la presión en el fluido contribuye a un mejor desempeño en la obtención de masa permeada de agua.

4. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El método presentado en este artículo permite calcular de una manera flexible las fuerzas que existen en una válvula pulsante y en el área por donde pasará el fluido. En el estudio se han considerado presiones que varían entre 4826 y 6205 kPa, así como la frecuencia de la variación del área de obstrucción y la amplitud del pulso requerido. El flujo pulsátil generado, además de aumentar el permeado de agua, disminuye la formación de capas de ensuciamiento sobre las membranas y con ello puede reducir la frecuencia de reemplazo de los módulos de membrana de ósmosis inversa. Por esto, es posible llegar a la conclusión de que la válvula pulsante tiene los requerimientos necesarios para integrarse en cualquier sistema de ósmosis inversa existente.

Debido a que en el equipo utilizado no es posible observar de forma directa cómo se comporta el fluido, se deja abierto a experimentación futura el estudio del comportamiento del flujo pulsátil en flujos incompresibles dentro de canales de membranas.

Como estudio posterior, se investigará cuál es la frecuencia óptima para el sistema, en función de diferentes parámetros como, por ejemplo, energía consumida, corriente, conductividad, etc.

Como consecuencia del estudio realizado, se recomienda:

- Realizar una mejora al sistema leva seguidor para eliminar el ruido ocasionado por el golpeteo.
- El material de la válvula completa debe ser de acero inoxidable debido al manejo de agua salada.

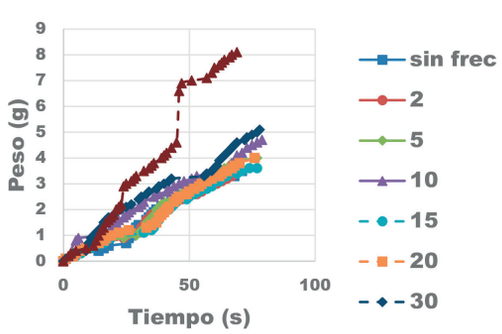


Figura 6: Masa permeada de agua por la membrana a diferentes frecuencias de la válvula

REFERENCIAS

[1]. TWTP. Water treatment market overview, Europe. The Water Treatment Plant 2011.
[2]. Neal, P.R., Li, H., Fane, A.G., Wiley, D.E. The effect of filament orientation on critical flux and particle deposition in spacer-filled channels. J. Membr. Sci. 214, 2003: p.165-178. https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00500-8
[3]. Schwinge, J., Neal, P.R., Wiley, D.E., Fletcher, D.F., Fane, A.G. Spiral wound modules and spacers Review and analysis. J. Membr. Sci. 242, 2004: p.129-153. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.09.031
[4]. Revista facultad de Ingeniería no. 23., p.120-139, septiembre del 2001. Universidad de Antioquia.
[5]. Keir, G., Jegatheesan, V. A review of computational fluid dynamics applications in pressure driven membrane filtration. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 13, 2014: p.183-201. https://doi.org/10.1007/s11157-013-9327-x
[6]. Fimbres-Weihs, G.A., Wiley, D.E. Review of 3D CFD modelling of flow and mass transfer in narrow spacer-filled channels in membrane modules. Chem. Eng. Process.: Process Intens. 49, 2010: p.759-781. https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.007
[7]. Ouyang, H., Bao, J., Fimbres-Weihs, G.A., Wiley, D.E. Control study on mixing enhancement in boundary layers of membrane systems. Journal of Process Control 23, 2013: p.1197-1204. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.07.005
[8]. Picioreanu, C., Vrouwenvelder, J.S., van Loosdrecht, M.C.M. Three-dimensional modeling of biofouling and fluid dynamics in feed spacer channels of membrane devices. J. Membr. Sci. 345, 2009: p. 340-354. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.09.024
[9]. Li, H.-y., Bertram, C.D., Wiley, D.E. Mechanisms by which pulsatile flow affects cross-flow microfiltration. AIChE Journal 44, 1998: p. 1950-1961. https://doi.org/10.1002/aic.690440903
[10]. Davis, R.H., Leighton, D.T. Shear-induced transport of a particle layer along a porous wall. Chem Eng Sci., 42, 1987: p. 275-281. https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)85057-1
[11]. Nishimura, T., Matsune, S. Vortices and wall shear stresses in asymmetric and symmetric channels with sinusoidal wavy walls for pulsatile flow at low Reynolds numbers. Int. J. Heat Fluid Flow 19, 1998: p.583-593. https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)10005-X
[12]. Fimbres-Weihs, G.A., Álvarez-Sánchez, J. Synergies between pulsatile flow and spacer filaments in reverse osmosis modules. Membranes, Materials, Simulations and Applications. A. Maciel-Cerda Editor, Springer: Switzerlland, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45315-6_8
[13]. Gastelum-Reyes, M., Fimbres-Weihs, G. CFD study of optimal frequency pulsatile flow for mass transfer enhancement in spacer-filled RO membrane channels. Memorias del congreso de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de membranas 6, 2016: p.19-27.
[14]. Cross, N. Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos, Editorial Limusa, México, 2003.
[15]. Cengel, Y.A., Cimbala, J.M. Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones. Segunda edición, Mc Graw Hill, 2010, ISBN: 978-607-15-0779-2.
[16]. Gourishankar, V. Conversión de la Energía Electromecánica, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A., 1975, ISBN: 968-6062-41-6.