



Concentración por membranas mediante ósmosis inversa de un alimento líquido

Apellidos, nombre	Pastor Navarro, Clara (clarapastor@upv.es) González Martínez, Chelo (cgonza@tal.upv.es)
Departamento	Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En Tecnología de Alimentos, el proceso de concentración se puede realizar mediante la aplicación de tecnologías de membranas. Entre las diferentes posibilidades existentes, una de ellas es la concentración por osmosis inversa, muy utilizada por ejemplo para purificar agua o desalinizar agua de mar, entre otros. Este proceso también se puede utilizar para concentrar zumos o bebidas y para ello, se debe calcular previamente la presión osmótica (Π) de la disolución. Existen ecuaciones de predicción que permiten calcular la presión osmótica de una disolución, en función del tipo, cantidad de solutos disueltos y de la actividad de agua (a_w) de la disolución. En este trabajo, el alumno será capaz de calcular la presión osmótica de una bebida y proponer qué presiones deberán ser aplicadas en el equipo de osmosis inversa para poder empezar a separar el disolvente (agua) del resto de los solutos.

2 Introducción

Para concentrar líquidos se puede utilizar una técnica denominada ósmosis inversa la cual presenta una membrana semipermeable con un diámetro de poro lo más estrecho posible de forma que, se concentra el total de material sólido, y sólo el agua puede pasar a través de la membrana. Esta técnica es de gran utilidad para la industria alimentaria ya que la utilización de altas temperaturas para concentrar puede provocar cambios de color, olor, sabor, etc. en los productos que no siempre son bien aceptados.

La ósmosis inversa es el proceso mediante el cual se separa un solvente de una solución concentrada al aplicar presión, atravesando la membrana semipermeable desde el lado de la solución más concentrada al lado de la solución más diluida. Y cuanto mayor sea la presión aplicada, mayor será el flujo de solvente permeado a través de la membrana. De forma natural, el agua pasa de la solución más diluida a la más concentrada a través de la membrana. El fenómeno cesa 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. Si lo que se pretende es invertir el flujo de agua generado por la ósmosis, es necesario aplicar, en el lado de la solución concentrada, una presión 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 al final del proceso dos corrientes líquidas: el permeado o agua filtrada y el concentrado. En función del proceso, podrán resultar de interés uno u otro, o ambos.

Esta tecnología de membranas se utiliza para desalinizar el agua de mar y las aguas salobres, producir agua ultrapura, tratar aguas residuales y también encuentra su campo de aplicación en la industria y el sector de las bebidas tales como los zumos de frutas, etc. En función del tamaño de poro que poseen las membranas, los procesos se clasifican de mayor a menor tamaño como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa^[1], tal y como se detalla en la Tabla 1. El tamaño de poro de las membranas es uniforme y equivalente al peso molecular

de una molécula patrón a partir del cual se produce la retención de más del 95% del soluto.

Tabla 1. Propiedades de los diferentes tipos de membranas.

	Microfiltración	Ultrafiltración	Nanofiltración	Ósmosis Inversa
Diámetro Poro	0.1-10 μm	1-100 nm	1nm	<0.5*nm
Especies retenidas	partículas	macromoléculas	pequeñas moléculas	sales
Presiones (10^5 Pa)	0.2-2	2-10	10-40	30-80

* Valor bastante teórico ya que el mecanismo de transferencia es del tipo difusional

La presión osmótica (Π) que se debe vencer para revertir el proceso natural y obtener el solvente sin soluto disuelto depende del tipo de soluto y de su concentración y se puede calcular a partir de la ecuación 1.

$$\pi = \frac{-RT \ln a_w}{\bar{V}_A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde, $R = 0,0821 \text{ atm l/K mol}$ y \bar{V}_A es el volumen molar del disolvente y cuyo valor es de $18 \times 10^{-3} \text{ l/mol}$.

3 Objetivo

El objetivo de este artículo docente consiste en que el alumno sea capaz de calcular la presión osmótica necesaria para concentrar una bebida, como puede ser leche.

4 Desarrollo

Para calcular la presión osmótica (Π) a 25°C es necesario predecir, en primer lugar, el valor de actividad de agua de una disolución multicomponente ya que la leche presenta solutos electrolitos y no electrolitos tal y como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de la leche enriquecida en calcio.

Composición	x (g/100g)
Agua	86.8
Grasas	3.2
Proteínas	3.5
Lactosa	4.8
CaCl ₂	1
Otras sales	0.7

Para predecir el valor de actividad de agua de la disolución de no electrolitos se necesita conocer el peso molecular de cada componente y su constante $k^{[2]}$ tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición, peso molecular y contante k de la disolución de no electrolitos.

Composición	x (g/100g)	Mr (g/mol)	k
Agua	86.8	18	-
Lactosa	4.8	342.3	10.2

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 3, se pueden calcular los moles (n) y las fracciones molares (X) de cada componente de la siguiente forma.

$$n_{agua} = \frac{g_{agua}}{Mr_{agua}} = \frac{86.8}{18} = 4.822$$

$$n_{lactosa} = \frac{g_{lactosa}}{Mr_{lactosa}} = \frac{4.8}{342.3} = 0.014$$

$$n_{totales} = n_{agua} + n_{lactosa} = 4.822 + 0.014 = 4.836$$

$$X_{agua} = \frac{n_{agua}}{n_{totales}} = \frac{4.822}{4.836} = 0.997$$

$$X_{lactosa} = \frac{n_{lactosa}}{n_{totales}} = \frac{0.014}{4.836} = 0.003$$



Por tanto, la actividad de agua de la disolución de no electrolitos se puede calcular a partir de la ecuación 2^[2].

$$a_w = x_w \exp(-K x_s^2) = 0.997 \exp(-10.2(0.003)^2) = 0.9972 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para predecir el valor de actividad de agua de la disolución de electrolitos se necesitan conocer los siguientes parámetros:

La molalidad del CaCl_2 ($M_{r_{\text{CaCl}_2}} = 110.98 \text{ g/mol}$), la cual se calcula de la siguiente forma:

$$m_{\text{CaCl}_2} = \frac{\text{moles de CaCl}_2}{\text{kg disolvente}} = \frac{1/110.98}{86.8/1000} = 0.104$$

Para calcular el número de especies iónicas (ν) hay que tener en cuenta que por cada mol de CaCl_2 añadido al agua se genera un mol de Ca^{2+} y dos de Cl^- , ambos capaces de interaccionar con el agua. Por tanto, el número de especies iónicas por mol de CaCl_2 en disolución es 3, tal y como se observa en la ecuación 3.



A continuación, se va a calcular el coeficiente osmótico según la ecuación 4 de Bromley^[2].

$$\phi = 1 + 2.303 \left[-|Z_+Z_-|A_\gamma \frac{I^{\frac{1}{2}}}{3} \sigma + (0.06 + 0.6B)|Z_+Z_-| \frac{I}{2} \psi + B \frac{I}{2} \right] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para ello, se necesitan calcular los siguientes parámetros:

$|Z_+Z_-|$: Valor absoluto del producto de las cargas iónicas

$$|Z_+Z_-| = |2(-1)| = 2$$

$$A_\gamma = \text{coeficiente} \left(0.511 (\text{kg mol})^{\frac{1}{2}} \text{a } 25^\circ\text{C} \right)$$

I es la fuerza iónica de la disolución, que se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i Z_i^2 = \frac{1}{2} [m(2)^2 + 2m(-1)^2] = 3m = 0.311$$



$$\sigma = \frac{3}{(\rho l^{\frac{1}{2}})^3} \left[1 + \rho l^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{1 + \rho l^{\frac{1}{2}}} - 2 \ln \left(1 + \rho l^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

siendo $\rho = 1$ para todos los solutos

Por tanto,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{3}{(3m^{\frac{1}{2}})^3} \left[1 + 3m^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{1 + 3m^{\frac{1}{2}}} - 2 \ln \left(1 + 3m^{\frac{1}{2}} \right) \right] \\ &= \frac{3}{((0.311)^{\frac{1}{2}})^3} \left[1 + (0.311)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{1 + (0.311)^{\frac{1}{2}}} - 2 \ln \left(1 + (0.311)^{\frac{1}{2}} \right) \right] = 0.507 \end{aligned}$$

B = parámetro característico de cada electrolito

Según Bromley^[3], BCaCl₂ = 0.0948 kg mol⁻¹

$$\psi = \frac{2}{al} \left[\frac{1 + 2al}{(1 + al)^2} - \frac{\ln(1 + al)}{al} \right]$$

$$\text{siendo } a = \frac{1.5}{|z_+ z_-|} = \frac{1.5}{|2 \times 1|} = 0.75$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{2}{a3m} \left[\frac{1 + 2a3m}{(1 + a3m)^2} - \frac{\ln(1 + a3m)}{a3m} \right] \\ &= \frac{2}{0.75 \times 0.311} \left[\frac{1 + 2 \times 0.75 \times 0.311}{(1 + 0.75 \times 0.311)^2} - \frac{\ln(1 + 0.75 \times 0.311)}{0.75 \times 0.311} \right] = 0.560 \end{aligned}$$

Una vez determinados todos los parámetros, se puede calcular ϕ

$$\begin{aligned} \phi &= 1 + 2.303 \left[- \left(2 \times 0.511 \times \frac{(0.311)^{\frac{1}{2}}}{3} \times 0.507 \right) + (0.06 + 0.6 \times 0.0948)(2) \frac{0.311}{2} (0.560) \right. \\ &\quad \left. + 0.0948 \frac{0.311}{2} \right] = 0.8363 \end{aligned}$$

Por tanto, la actividad de agua de la disolución de electrolitos se puede calcular a partir de la ecuación 5.

$$a_w = \exp(-0.018mv\phi) \quad (\text{Ecuación 5})$$



Así,

$$a_w = \exp(-0.018 \times 0.104 \times 3 \times 0.8363) = 0.9953$$

Finalmente, la actividad de agua de la leche enriquecida se puede calcular a partir de la ecuación 6^[4].

$$a_w = (a_w)_{\text{Disolución No electrolitos}} (a_w)_{\text{Disolución Electrolitos}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

De modo que,

$$a_w = 0.9972 \times 0.9953 = 0.9924$$

Una vez obtenida la actividad de agua de la leche enriquecida se puede calcular la presión osmótica (Π) necesaria para eliminar parte del agua a partir de la ecuación 1.

$$\pi = \frac{-RT \ln a_w}{\bar{V}_A} = \frac{-0.0821 \times 298 \times \ln(0.9924)}{18 \times 10^{-3}} = 10.4 \text{ atm}$$

Para empezar a concentrar, se deberán aplicar, por tanto, presiones osmóticas superiores a 10.4 atm.

5 Cierre

En este objeto de aprendizaje se ha expuesto cómo calcular la presión osmótica de una disolución multicomponente necesaria para eliminar parte del agua y obtener así una leche concentrada que soporte mayores periodos de almacenamiento y permita un ahorro importante en el transporte. Se han descrito paso a paso cómo se han calculado todos los parámetros necesarios y finalmente, se ha calculado su valor.

6 Bibliografía

[1] www.portalechero.com

[2] Norrish, R.S. (1966). An equation for the activity coefficients and equilibrium relative humidities of water in confectionery syrups. *International Journal of Food Science & Technology*, 1(1): 25-39.

[3] Bromley, L.A. (1973). Thermodynamic properties of strong electrolytes in aqueous solutions. *AIChE Journal*, 19(2): 313-320.

[4] Ross, K. (1975). Estimation of water activity in intermediate moisture foods. *Food Technology*, 29(3), 26-34.