
Estudio de la electro-filtración a presión constante de suspensiones sólido-líquido

D. Martínez-Capilla, X. Llauro, F. Carrasco*

Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Girona. Campus Montilivi. 17071 Girona

Study of electro-filtration of solid-liquid slurries at constant pressure

Estudi de l'electro-filtració a pressió constant de suspensions sòlid-líquid

Recibido: 13 de abril de 2013; revisado: 4 de julio de 2013; aceptado: 31 de julio de 2013

RESUMEN

Debido a que los sistemas de filtración utilizados actualmente sólo pueden eliminar una parte del agua contenida en la suspensión, se han realizado investigaciones con el objetivo de obtener mayores rendimientos en la filtración mediante la aplicación de un campo eléctrico en un filtro a presión. Para ello, se han llevado a cabo electro-filtraciones aplicando una diferencia de presión constante de 0.4 bar y diferentes valores de intensidad eléctrica (de 0 a 2.21 A). Se ha estudiado la influencia del campo eléctrico sobre el contenido en agua de la torta, la presión electro-osmótica, la resistencia específica de la torta y el pH del filtrado y del agua retenida en la torta. Se ha analizado el efecto de la electroforesis y de la electro-ósmosis sobre estas propiedades. El estudio de la variación del pH determina que la operación unitaria de electro-filtración sólo es aplicable en los procesos donde el sólido obtenido sea un residuo o cuyas propiedades puedan ser modificadas. Por fin, se ha definido un nuevo parámetro que tiene en cuenta la compresibilidad de la torta según la intensidad eléctrica aplicada y ha convenido en denominarse factor de electro-compresibilidad.

Palabras clave: electro-filtración, electro-ósmosis, electroforesis, presión constante, resistencia específica, electro-compresibilidad.

ABSTRACT

Given that filtration systems can only partially remove the water contained in slurries, it is important to conduct research works leading to better filtration yields. This is possible by applying an electric field on a pressure filter. For this, electro-filtration assays have been carried out at a constant pressure of 0.4 bar and variable electrical intensities ranging from 0 to 2.21 A. The influence of electrical field on cake water content, cake specific resistance, filtrate pH and pH of the water present in cake have been studied. The effect of electroforesis and electro-osmosis

on these properties has been analyzed. Because of changes in pH, the electro-filtration unit operation can only be used when the solids present in cake are a residue or a material whose properties can be modified. Finally, a new parameter that takes into account cake compressibility as a function of electrical intensity has been defined and it has been denominated electro-compressibility factor.

Key words: electro-filtration, electro-osmosis, electroforesis, constant pressure, specific resistance, electro-compressibility.

RESUM

Com que els sistemes de filtració utilitzats actualment només poden eliminar una part de l'aigua continguda en la suspensió, s'han dut a terme treballs de recerca amb l'objectiu d'augmentar el rendiment de la filtració mitjançant l'aplicació d'un camp elèctric en un filtre a pressió. Per això, s'han realitzat electro-filtracions a una diferència de pressió constant de 0.4 bar i diversos valors de la intensitat elèctrica (de 0 a 2.21 A). S'ha estudiat la influència del camp elèctric sobre el contingut en aigua del tortó, la pressió electro-osmòtica, la resistència específica del tortó i el pH del filtrat i de l'aigua retinguda al tortó. S'ha analitzat l'efecte de l'electroforesi i de l'electro-osmosi sobre aquestes propietats. L'estudi de la variació del pH determina que l'operació bàsica d'electro-filtració només és aplicable en els processos on els sòlids obtinguts siguin un residu o amb propietats que puguin ésser modificades. Finalment, s'ha definit un paràmetre que té en compte la compresibilitat del tortó en funció de la intensitat elèctrica aplicada i s'ha decidit denominar-lo factor d'electro-compresibilitat.

Paraules clau: electro-filtració, electro-osmosi, electroforesi, pressió constant, resistència específica, electro-compresibilitat.

* e-mail: felix.carrasco@udg.edu

INTRODUCCIÓN

La separación de sólidos insolubles en suspensión en un líquido mediante filtración es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria. Para la realización de esta separación, los procesos mecánicos son los más utilizados respecto a los procesos térmicos, basándose en consideraciones económicas.

Los filtros a presión o a vacío usados actualmente en la industria sólo pueden eliminar una parte del agua contenida en la suspensión, concretamente el agua libre y el agua retenida capilarmente en el sólido. Si se quiere obtener un sólido completamente seco, se debe aplicar un tratamiento térmico que implica elevadas emisiones de CO₂ e importantes gastos de instalación y funcionamiento.

La electro-filtración se plantea como una nueva técnica mediante la cual pueden conseguirse mayores rendimientos en la filtración gracias a la aplicación de un campo eléctrico que actúa como una fuerza adicional que se suma a la fuerza ejercida por la presión aplicada en el filtro. Ya se ha demostrado que la electro-filtración es una técnica que permite obtener mayores rendimientos respecto a la filtración a presión convencional de suspensiones sólido-líquido [1-3]. Actualmente existe un filtro prensa eléctrico comercializado para el tratamiento de lodos de depuradora. Por lo tanto, sirve para filtrar sólidos que estén considerados como un residuo. Entonces, es interesante estudiar si la electro-filtración puede ser aplicable en otros tipos de industria como podrían ser las industrias alimentaria, farmacéutica o química, donde el sólido obtenido no sea un residuo, sino un producto cuyas propiedades sean inalterables. Mediante las experimentaciones realizadas en un electro-filtro a escala de laboratorio se ha pretendido comprobar la viabilidad de esta técnica, evaluar qué efectos produce sobre el tiempo de filtración, el contenido en agua y resistencia específica de la torta y analizar la variación de las propiedades del sólido a filtrar. Además, debe tenerse en cuenta que la aplicación de una corriente eléctrica sobre una suspensión sólido-líquido desencadena la electroforesis y la electro-ósmosis, produce un aumento de temperatura, provoca la electrólisis del líquido y conduce a una variación del pH del filtrado y del líquido retenido en la torta.

Doble capa eléctrica

Cuando un sólido entra en contacto con un fluido electro-lítico se produce el fenómeno conocido como doble capa eléctrica. La formación de la doble capa eléctrica permite visualizar la atmósfera iónica en los alrededores de la superficie del sólido y explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de atracción-repulsión.

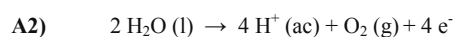
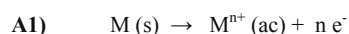
Actualmente se utiliza el modelo de Gouy-Chapman-Stern, en el cual se combina la capa absorbida de Helmholtz [4] con la doble capa difusa de Gouy [5] y Chapman [6]. Este modelo se entiende como una secuencia de etapas que suceden alrededor de una partícula con carga. Sobre esta partícula se unirán mediante fuerzas de atracción y adsorción, iones del signo contrario a la partícula, llamados contraiones, y formarán una capa rígida conocida como capa de Stern. Otros contraiones serán atraídos por la propia partícula y rechazados por la capa de Stern y por los propios contraiones que intentan unirse a la partícula. De esta manera, se produce un equilibrio dinámico y se forma una nueva capa llamada capa difusa, integrada por aniones y cationes. Esta capa difusa tiene un déficit de

iones del mismo signo que la partícula que desencadena la formación de la doble capa eléctrica, dado que estos iones serán repelidos por la propia partícula. El conjunto de la capa de Stern y la capa difusa conforman la doble capa eléctrica.

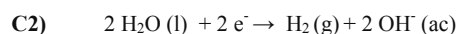
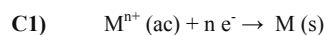
Efectos electrocinéticos

- Electro-ósmosis: Se conoce por electro-ósmosis el movimiento de un líquido, inducido por la aplicación de un potencial eléctrico, a través de un material poroso, capilar, membrana o cualquier líquido conductor [7]. La causa de este fenómeno es la fuerza de Coulomb inducida por la creación de un campo eléctrico en la solución, normalmente a través de electrodos situados en la parte superior e inferior del filtro. Durante la electro-filtración, la electro-ósmosis describe el movimiento del agua contenida en la capa difusa.
- Electroforesis: Se entiende por electroforesis el movimiento que se induce en las partículas con carga eléctrica en una suspensión acuosa al aplicar un campo eléctrico sobre dicha suspensión [7]. Las partículas positivas son atraídas por el electrodo negativo (cátodo), mientras que las partículas negativas son atraídas por el electrodo positivo (ánodo).
- Reacciones electrolíticas: Los voltajes aplicados en la electro-filtración son normalmente superiores al voltaje necesario para que se produzca la electrólisis del líquido. Las reacciones electrolíticas que tienen lugar se muestran a continuación.

ÁNODO:



CÁTODO:



donde M representa el material del electrodo.

- Aumento de la temperatura: La circulación de una intensidad a través de una suspensión sólido-líquido provoca un aumento de la temperatura y, por ende, una disminución de la viscosidad del líquido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar las experimentaciones se construyó un electro-filtro a presión a escala de laboratorio, cuyo diagrama de flujo se ilustra en la figura 1. Por otro lado, la figura 2 muestra la apariencia real de la instalación de electro-filtración. El depósito presurizado está constituido por un tubo de PVC de 31.5 cm de longitud y 11 cm de diámetro, perfectamente sellado en las partes superior e inferior gracias a tapas estancas de PVC. La presurización del depósito se consigue mediante aire comprimido. Se montó un sistema de regulación que permitió obtener presiones relativas entre 0 y 2.5 bar. Por otro lado, el electro-filtro está constituido por un tubo de metacrilato (con el fin de visualizar lo que ocurre en su interior) de 12 cm de largo

y 9 cm de diámetro, equipado de cierres de estanqueidad de PVC.

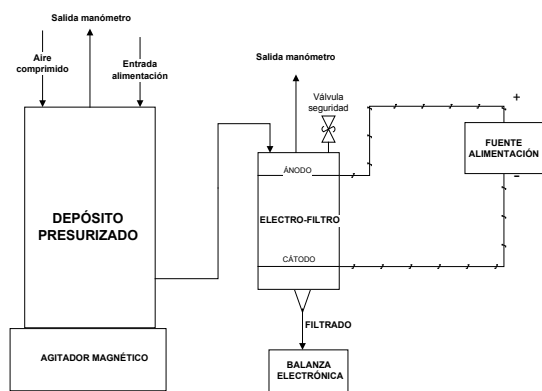


Figura 1. Diagrama de flujo del electro-filtro.



Figura 2. Instalación experimental de electro-filtración.

Dado que la suspensión con la que se realizaron las experimentaciones estaba conformada por polvo de vidrio (SiO_2) y sabiendo que estas partículas tienen carga negativa, el ánodo se colocó en la parte superior del filtro y el cátodo en la inferior. De esta manera, por efecto de la electroforesis se esperó la formación de una capa en la parte superior del filtro y una reducción del espesor de la torta de filtración en la parte inferior, comportando una mayor velocidad de filtración. Debido a la electro-ósmosis, según indica la teoría, la película de agua que envuelve a la partícula negativa, tiene un exceso de carga positiva. Es este exceso de carga positiva el que es atraído por el cátodo situado en la parte inferior. Además, se produce una mayor extracción de agua debido al caudal electro-osmótico, que se suma al caudal de filtrado originado por efecto de la presión.

El voltaje máximo de la fuente de alimentación disponible para realizar las experimentaciones fue de 30 V. Se observó que la intensidad no era lo suficientemente elevada como para desencadenar los efectos electrocinéticos esperados. Con el objetivo de aumentar estos efectos se añadió NaCl para incrementar la conductividad de la muestra y la intensidad que circulaba entre el ánodo y el cátodo. A partir de diversos valores de voltaje y de conductividad se obtuvieron diferentes valores de intensidad eléctrica, que fueron los siguientes: 0, 0.1, 0.2, 0.35, 0.61, 1.04 y 2.21 A. De esta manera pudieron llevarse a cabo filtraciones a diferente intensidad eléctrica.

En un primer bloque de ensayos se experimentó con suspensiones acuosas de polvo de vidrio (SiO_2) y se evaluó la variación del tiempo de filtración, del contenido en materia seca de la torta, de la resistencia específica de la torta, de la presión electro-osmótica y del pH (tanto de la torta disuelta como del filtrado). Cada uno de los puntos experimentales es la media de tres ensayos, habiéndose obtenido, en todos los casos, desviaciones estándar inferiores al 1% del valor medio. Las suspensiones se prepararon agregando 100-130 g de polvo de sílice a 1400-1700 g de agua, de manera que la consistencia de la suspensión fue en cada uno de los experimentos realizados de 7.0%. La temperatura de las suspensiones fue de unos 11°C. En un segundo bloque de ensayos se experimentó con puré de patata, concentrado de verduras y cemento. Se evaluaron los efectos de las reacciones electro-líticas sobre el sólido de la suspensión a filtrar estudiando la variación del pH de las diferentes muestras antes y después de la electro-filtración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos con polvo de vidrio en suspensión acuosa

La variación del volumen de filtrado con el tiempo en función de la intensidad eléctrica aplicada se ilustra en la figura 3. Resulta claro el efecto beneficioso del campo eléctrico, puesto que hace disminuir el tiempo de filtración. Debido al efecto de la electroforesis que provoca una reducción de la formación de capa en el filtro y al efecto de la electro-ósmosis que induce una mayor extracción de agua al atraer el agua que envuelve las partículas sólidas hacia el cátodo, el tiempo de filtración para filtrar un mismo volumen de muestra (1000 mL) disminuyó de 1328 s a 700 s, al aumentar la intensidad eléctrica de 0 a 2.21 A. Esto implica una disminución del tiempo de filtración del 47% al aplicar corriente eléctrica respecto a la filtración a presión convencional.

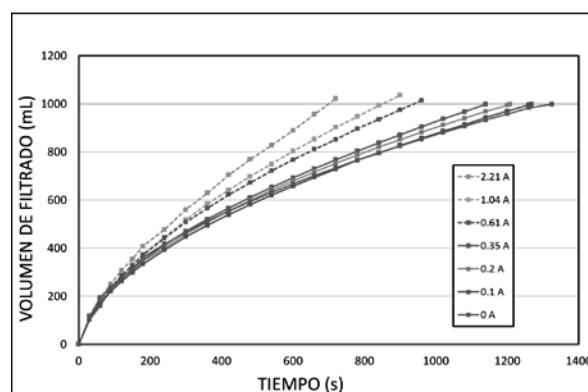


Figura 3. Efecto de la intensidad sobre el volumen filtrado.

Según la ecuación de Hiemenz y Rajagopalan [7], la electroforesis es directamente proporcional al valor de la intensidad del campo eléctrico. En este caso se demuestra que cuanto mayor es la intensidad que circula entre los electrodos, mayor es la electro-ósmosis, por lo que se produce una mayor extracción de agua del sólido, con el consecuente aumento del porcentaje de materia seca de la torta formada, como se observa en la figura 4a. Al pasar de 0 a 2.21 V, el contenido en sólidos secos de la torta se incrementa del 58.1 al 68.4%, lo cual supone una importante disminución de la cantidad de agua retenida en la

torta. Por otro lado, la figura 4b muestra la variación del parámetro M (masa de torta húmeda / masa de torta seca) en función de la intensidad aplicada. Se ha puesto de manifiesto la importante disminución de M con la intensidad. Así pues, M disminuyó de 1.72 a 1.49 cuando la intensidad aumentó de 0 a 1.04 A. La aplicación de 2.1 A en lugar de 1.04 A provocó un pequeño cambio en el porcentaje de agua retenida por la torta.

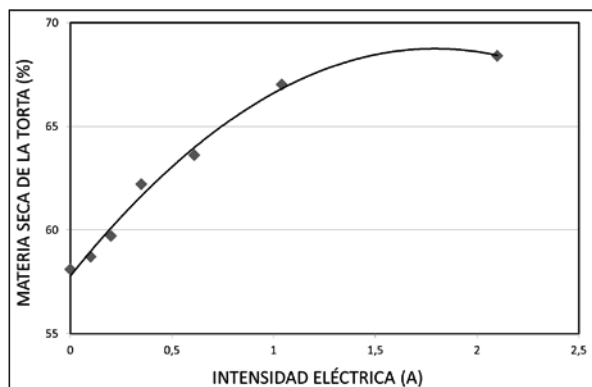


Figura 4a. Evolución del porcentaje de materia seca de la torta en función de la intensidad eléctrica.

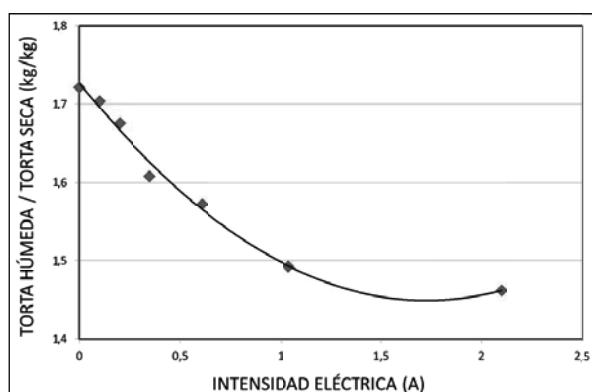


Figura 4b. Evolución del parámetro M (masa de la torta húmeda / masa de la torta seca) en función de la intensidad eléctrica.

Como indica la teoría, el ánodo se oxida y al estar formado por acero se forma Fe^{3+} . Además se producen H^+ y O_2 , mientras que el cátodo no se reduce, sino que lo hace el agua, dando lugar a OH^- y H_2 . Estas reacciones electroquímicas son responsables de que alrededor del ánodo el pH sea ácido y alrededor del cátodo, el pH sea básico. En la figura 5 se observa que el valor del pH del filtrado tiende a aumentar a medida que aumenta la intensidad que circula entre electrodos, por lo tanto tiende a volverse básico. Este fenómeno se entiende mejor teniendo en cuenta que el cátodo, donde se producen hidroxilos que dan basicidad, está situado en la parte inferior del filtro. Por otro lado, se sospecha que los protones H^+ , producidos en el ánodo situado en la parte superior del filtro, quedan retenidos en la torta de sólidos. Para comprobar esta hipótesis se diluyó la torta formada en cada ensayo en una misma cantidad de agua y se midió el pH de la suspensión. La figura 6 muestra, en efecto, que el valor del pH disminuyó por la presencia de protones H^+ , que le dan carácter ácido a la suspensión. La tendencia de ir disminuyendo el valor del pH se rompe para los valores de 0.61, 1.04 y 2.21 A, ya que en estos casos la velocidad de filtración es más elevada y esto supone que se arrastren más protones con

el filtrado, hecho que provoca que, aunque el valor del pH disminuya respecto al valor que corresponde a 0 A, sea ligeramente superior al valor del pH para intensidades de 0.1, 0.2 y 0.35 A, donde la velocidad de filtración es inferior y un mayor número de protones persiste en la torta de sólidos.

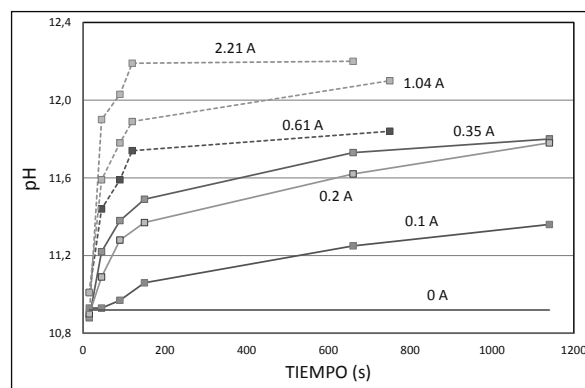


Figura 5. Evolución del pH del filtrado en función de la intensidad eléctrica.

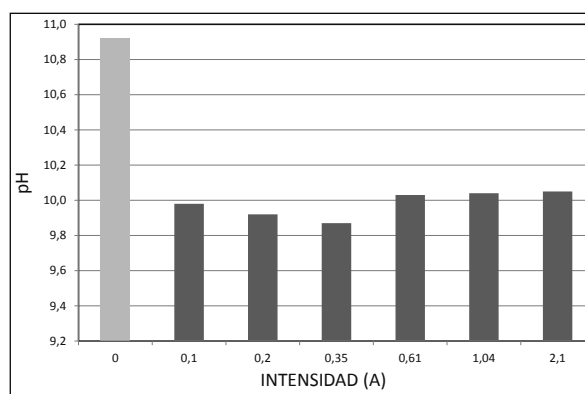


Figura 6. Evolución del pH de la torta diluida en agua.

Para analizar el comportamiento matemático de la filtración, Webber y Stahl [8] hicieron referencia a uno de los estudios electrocinéticos desarrollados por Yukawa en 1975 [9], donde la electro-filtración se contempla como la suma de la presión electro-osmótica y de la presión hidráulica. Con la intención de comprobar matemáticamente los efectos de la electroforesis y de la electro-ósmosis, se realizó el cálculo de la de la presión electro-osmótica y de la resistencia específica de la torta, considerando la torta de polvo de vidrio como una torta compresible.

Con el cálculo de la presión electro-osmótica se pretende demostrar que ésta aumenta al incrementarse la intensidad eléctrica, tal y como ya demostró Yukawa [9].

$$(-\Delta P_E) = (-\Delta P_H) \cdot \frac{q_{eo}}{q_p} \quad (\text{ecuación 1})$$

En cambio, con el cálculo de la resistencia específica de la torta se pretende analizar cómo varía la resistencia de ésta al aumentar la intensidad eléctrica, lo que conlleva un mayor efecto de la electroforesis y una disminución de la formación de capa en el cátodo.

La resistencia que se opone a la filtración [10] es debida a los siguientes factores: viscosidad del líquido, características de la torta y naturaleza del medio filtrante.

La resistencia total al flujo de fluido a través de la torta viene dada por la siguiente expresión:

$$R = \mu\alpha(L_c + L_m) \quad (\text{ecuación 2})$$

La resistencia específica de la torta, α (expresada en m^{-2}), representa la resistencia al paso de fluido que ofrecen las partículas empaquetadas en la torta. L_m es el espesor de torta que proporcionaría la misma resistencia al flujo que el medio filtrante. El espesor de la torta, L_c , varía constantemente con el volumen de filtrado y viene definido por la siguiente expresión:

$$L_c = \frac{w_s V}{\rho_s A} \quad (\text{ecuación 3})$$

w_s está definido como la masa de sólidos por unidad de volumen presentes en la suspensión. La definición de w_s puede variar según los autores, por lo que la resistencia específica de la torta puede venir dada en m^{-2} (este trabajo) o en m/kg .

Combinando las ecuaciones 2 y 3 queda:

$$R = \mu\alpha\left(\frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m\right) \quad (\text{ecuación 4})$$

La velocidad de filtración se mide a través del caudal volumétrico de filtrado (dV/dt):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A(-\Delta P)}{\mu\alpha\left(\frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m\right)} \quad (\text{ecuación 5})$$

La ecuación 5 se considera como la ecuación básica de la filtración a presión constante y aplicándole el tratamiento matemático adecuado permitirá calcular la resistencia específica de la torta. Una vez integrada y reordenada, se obtiene:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha w_s}{2A^2(-\Delta P)\rho_s} V + \frac{\mu\alpha}{A(-\Delta P)} L_m \quad (\text{ecuación 6})$$

Mediante regresión lineal de la ecuación 6, se obtiene la resistencia específica de la torta a partir de la pendiente de la recta y el espesor ficticio del medio filtrante, a partir de la ordenada en el origen, para los ensayos llevados a cabo a diferentes valores de la intensidad eléctrica.

Tabla 1. Variación de la presión electro-osmótica y de la resistencia específica de la torta en función de la intensidad eléctrica.

Intensidad	Condiciones	ΔP_E (kPa)	α (m^{-2})
0 A	0 V, 1650 μS	0	$6.28 \cdot 10^{14}$
0.1 A	10 V, 1650 μS	0.34	$5.83 \cdot 10^{14}$
0.2 A	20 V, 1650 μS	2.68	$5.80 \cdot 10^{14}$
0.35 A	30 V, 1650 μS	4.51	$5.63 \cdot 10^{14}$
0.61 A	30 V, 2270 μS	15.0	$5.27 \cdot 10^{14}$
1.04 A	30 V, 4400 μS	18.0	$4.69 \cdot 10^{14}$
2.21 A	30 V, 9320 μS	29.9	$4.59 \cdot 10^{14}$

La tabla 1 muestra que la presión electro-osmótica aumentó, como era de esperar, al incrementarse la intensidad eléctrica. De hecho, este parámetro se incrementó de 0 a 29.9 kPa al pasar la intensidad eléctrica de 0 a 2.21 A. Para tener en cuenta el efecto de la electro-ósmosis, el valor de $(-\Delta P)$ se calculó sumando la presión hidráulica

aplicada y la presión electro-osmótica desarrollada como consecuencia del campo eléctrico. La figura 7 ilustra la variación de la presión electro-osmótica con la intensidad eléctrica aplicada durante la filtración. El perfil de variación corresponde al de una curva polinómica de segundo grado ($r^2 = 0.98$).

Por otro lado, la tabla 1 muestra que la resistencia específica de la torta disminuyó, como era de esperar, a medida que aumentó la intensidad eléctrica. Este hecho se explica teniendo en cuenta que, cuanto más elevado es el campo eléctrico aplicado, mayor es el efecto de la electroforesis, como se ha comprobado experimentalmente. Por consiguiente, la torta formada tiene menos espesor debido a la migración de partículas inducida por el movimiento electroforético que forman una capa en el ánodo y, consecuentemente, la resistencia específica de la torta disminuye.

En este trabajo se propone una ecuación de variación de la resistencia específica de la torta con la intensidad eléctrica aplicada:

$$\alpha = \alpha_0 I^n \quad (\text{ecuación 7})$$

donde α_0 es la resistencia específica de la torta en ausencia de campo eléctrico ($I = 0$) y n podría denominarse "factor de electro-compresibilidad". Una vez logaritimizada la ecuación (7), se procedió a efectuar una regresión lineal, tal como se ilustra en la figura 8. La bondad del ajuste es satisfactoria, con un coeficiente de regresión, $r^2 = 0.98$. Los parámetros así obtenidos son los siguientes: $\alpha_0 = 6.14 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}$ y $n = -0.26$.

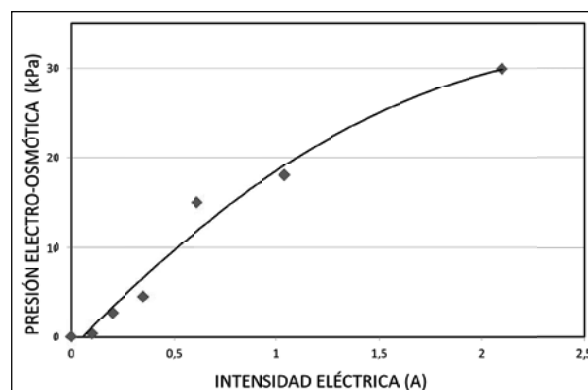


Figura 7. Variación de la presión electro-osmótica con la intensidad eléctrica.

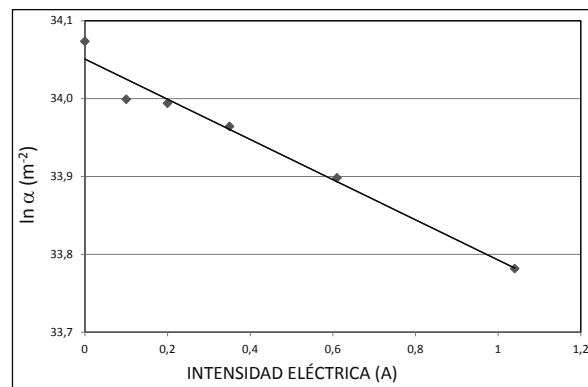


Figura 8. Análisis de regresión lineal de la resistencia específica de la torta en función de la intensidad eléctrica.

Ensayos con alimentos y cemento en suspensión acuosa

Después de determinar el pH del filtrado obtenido antes y después de la electro-filtración, se observa que éste aumenta tras la electro-filtración para los tres tipos de muestra con los que se experimentó (puré de patata, concentrado de verduras y cemento en suspensión acuosa), como muestra la figura 9. Además, tuvo lugar la oxidación del ánodo de acero con la consecuente formación de Fe^{3+} . Por lo tanto, se produjo una alteración de las propiedades de la muestra y una variación del aspecto visual generada por la oxidación del ánodo, como se ilustra en la figura 10.

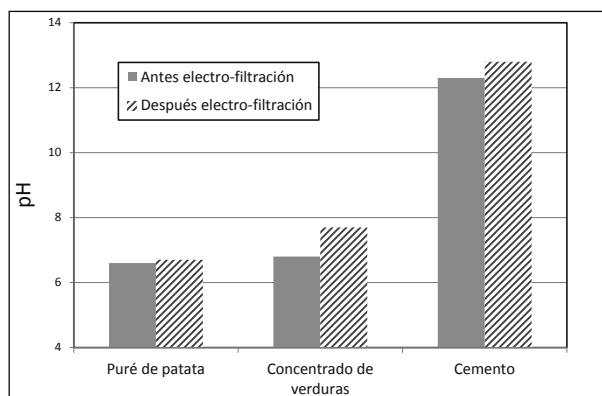


Figura 9. Variación del pH de las muestras.

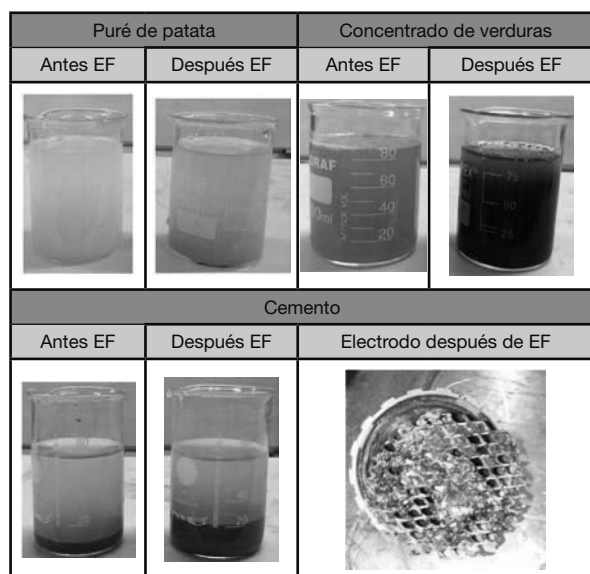


Figura 10. Variación del aspecto visual de las muestras.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la electro-filtración comporta una mejora respecto a la filtración convencional, gracias a la reducción del tiempo de filtración y a la disminución del contenido en agua de la torta. Por un lado, se consiguió una reducción del tiempo de filtración, debido a la disminución del espesor de la torta por efecto de la electroforesis. Por otro lado, se redujo el contenido en agua de la torta por efecto de la electro-ósmosis. Así pues, al aplicar una intensidad de 2.21 A se consiguió una disminución del 47% del tiempo de filtración respecto al de la filtración en ausencia de campo eléctrico. También se consiguió reducir el contenido en agua del 42 al 32%.

Aunque la porosidad de la torta (*i.e.* fracción volúmica de agua) disminuyó con la intensidad eléctrica, también se redujo en un 27% la resistencia específica de la misma al pasar la intensidad eléctrica de 0 a 2.21 A. Se ha definido un nuevo parámetro, que se ha convenido en denominar factor de electro-compresibilidad, el cual tiene en cuenta la variación de la resistencia específica de la torta con la intensidad eléctrica. En el caso del polvo de vidrio, el factor de electro-compresibilidad ha resultado ser de -0.26 . Analizando la evolución del pH del filtrado y de la torta formada antes y después de aplicar el campo eléctrico sobre suspensiones de diversos materiales (polvo de vidrio, puré de patata, concentrado de verduras y cemento), se comprobó que, en todos los casos, el valor del pH del filtrado se vio incrementado después de realizar la electro-filtración, como consecuencia de la reacción electro-lítica catódica, que da lugar a la producción de hidroxilos. Sin embargo, el pH del agua contenida en la torta disminuyó, a causa de la reacción electro-lítica anódica, responsable de la producción de protones. Debido a estas reacciones electro-líticas (que comportan la formación de Fe^{3+} y la variación de la acidez de las muestras), la electro-filtración sólo es aplicable en el caso de que los sólidos de la torta sean un residuo o acepten modificaciones en sus propiedades.

NOMENCLATURA

- A Superficie filtrante (m^2).
- L_c Espesor de la torta (m).
- L_m Espesor ficticio del medio filtrante (m).
- $(-\Delta P)$ Diferencia de presión total (Pa).
- $(-\Delta P_e)$ Diferencia de presión electro-osmótica (Pa).
- $(-\Delta P_h)$ Diferencia de presión hidráulica (Pa).
- q_{eo} Caudal volumétrico electro-osmótico (m^3/s).
- q_p Caudal volumétrico generado por la presión (m^3/s).
- t Tiempo (s).
- V Volumen de filtrado (m^3).
- w_s Masa de sólidos presentes en la suspensión por unidad de volumen (kg/m^3).
- α Resistencia específica de la torta (m^2).
- μ Viscosidad del filtrado (Pa·s).
- ρ_s Densidad de los sólidos (kg/m^3).

BIBLIOGRAFÍA

1. G. Yang, M. Chen, C. Yeh. "Dewatering of a biological industrial sludge by electrokinetics-assisted filter press". *Separation and Purification Technology*, 79, 2 (2011).
2. M. Rynkiewicz. "Application of constant electric field in simultaneous intensification of dewatering of wastewater sludge and filtrate purification". *Environmental Protection Engineering*, 37, 93 (2011).
3. H. Yoshida, H. Yukawa. "A theoretical analysis of the electroosmotic dewatering of sludge". *International Chemical Engineering*, 28, 477 (1988).
4. H. Helmholtz. "Studien electricische Grenzschichten, *Annalen der Physik*, 243(7), 337 (1879).
5. G. Gouy. "Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte". *Annuel Physique*, 9, 457 (1910).
6. D.L Chapman. "A contribution to the theory of the electrocapillarity". *Philosophical Magazine*, 25, 475 (1913).

-
7. P. Hiemenz, R. Rajagopalan. "Principles of Colloid and Surface Chemistry". Marcel Dekker, 2ª edición, New York (1997).
 8. K. Weber, W. Stahl. "Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration". Separation and Purification Technology, 26, 69 (2002).
 9. H. Yukawa, K. Kobayashi, Y. Tsukui, S. Yamano, M. Iwata. "Analysis of batch electrokinetic filtration". Journal of Chemical Engineering of Japan, 9, 396 (1975).
 10. D.G. Rao. "Fundamentals of Food Engineering". PHI Learning, 1ª edición, Nueva Delhi (2010).