



Categoría: Agua, calidad ambiental

MONITORIZACIÓN, ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Pérez-Naranjo A1, Moral A 1, Ballesteros Martín M. M.1, Tijero A2*

1 Grupo ECOWAL, Departamento de Biología Molecular e Ingeniería Bioquímica, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla. E-mail: aipernar@alumno.upo.es

2 Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid

Palabras clave: FBRM, floculación, coagulación, reutilización de aguas, aguas residuales

Resumen

La reutilización de aguas residuales para los procesos productivos de las industrias de generación eléctrica constituye un elemento primordial para cumplir objetivos medioambientales y económicos, pues precisa de grandes volúmenes, principalmente en sus procesos de enfriamiento de circuitos y maquinaria.

La coagulación y floculación son procesos habituales en el tratamiento de aguas residuales, un tratamiento convencional implica la adición de agentes oxidantes y desinfectantes, así como de un coagulante primario seguido por el ajuste del pH y, finalmente, el uso de un floculante.

El objetivo de este estudio fue el control y optimización de los procesos de coagulación-floculación para desarrollar una metodología que permita seleccionar los floculantes adecuados y sus dosis óptimas, como método de depuración para su posterior reutilización los sistemas de refrigeración de una industria de generación eléctrica.

Para el análisis, seguimiento y optimización del proceso de coagulación-floculación, se utilizó la técnica FBRM 'microscopio láser sin imagen o sistema de medida por reflexión de rayo enfocado' que se fundamenta en una óptica de precisión y utiliza una sonda M500P FBRM fabricado por Lasentec Mettler Toledo, en Seattle, EE.UU para monitorizar en continuo los pulsos reflejados de un haz láser enfocado que incide sobre las partículas en suspensión en el agua objeto de estudio.

La duración de cada pulso es proporcional a longitud de partícula interceptada para una velocidad constante de rotación de rayo láser, permitiendo calcular los tamaños de cuerda de las partículas, de este modo, la sonda permite analizar el estado de agregación de los coágulos formados, así como información sobre la estabilidad y su interacción con los agentes químicos empleados.

Con el análisis de los datos obtenidos se seleccionó la dosis óptima de coagulante entre las diferentes dosis estudiadas y su interacción con diferentes floculantes.

La sonda FBRM permitió la monitorización, estudio y análisis del proceso obteniendo resultados sobre los floculantes que mejor respuesta ofrecían al binomio eficacia-optimización, pudiendo ajustar la dosis de los reactivos evitando fenómenos indeseados de ensuciamiento e incrustaciones.



1. Introducción

Es un hecho constatado que la minimización del consumo del agua por parte de las industrias constituye un aspecto prioritario en políticas medioambientales. Es lógico deducir que para conseguir la reducción y optimización se lleve a cabo la reutilización.

Una de las industrias que mayores volúmenes de agua consume en sus procesos productivos son las industrias de generación eléctrica, tales como centrales térmicas y de cogeneración, dado que dichas instalaciones precisan de una caudal de aportación constante para los sistemas de enfriamientos de maquinaria y circuitos: torres de refrigeración, condensadores evaporativos y sistemas auxiliares principalmente. Gran parte del agua de aportación se evapora en el proceso y otra gran parte se purga para disminuir la concentración de sales en el sistema (Averyt et al., 2011; Macknick et al., 2011; Badr et al., 2012; Bridget et al., 2013). Por tanto, la depuración y consiguiente reutilización de aguas residuales en dichos sistemas constituye un pilar en sus políticas medioambientales y económicas.

En la actualidad hay muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo los procesos de coagulación y floculación son de los más utilizados en las etapas de separación por su bajo coste, elevada efectividad y relativa simplicidad. Otros procesos como la sedimentación y filtración no son efectivos desde el punto de vista económico cuando las partículas son pequeñas. Un procedimiento habitual consiste en la adición de agentes desinfectantes y oxidantes, ajuste de pH, adición de un coagulante y por último, adición de un floculante (Pernitsky et al., 2006; C. Johnson, 2006).

Este estudio tuvo como objetivo el control, análisis y optimización de los procesos de coagulación-floculación de agua de aporte procedente de una estación depuradora de aguas residuales de una central térmica de ciclo combinado, para desarrollar una metodología que permitiera seleccionar los floculantes eficientes y sus dosis óptimas, como método de depuración para su posterior reutilización los sistemas de refrigeración de la industria.

Para el estudio, análisis, seguimiento y optimización del proceso de coagulación-floculación, se utilizó la técnica FBRM “microscopio láser sin imagen o sistema de medida por reflexión de rayo enfocado” (Focused Beam Reflectance Measurement) que se fundamenta en una óptica de precisión que utiliza un sensor FBRM (Blanco et al., 2002, Heinrich and Ulrich, 2012; Okpeafoh et al., 2015) para monitorizar en continuo e in-situ y a escala de laboratorio, los pulsos reflejados de un haz láser enfocado que incide sobre las partículas en suspensión en el agua objeto de estudio.

Dicha metodología permite analizar la resistencia a las fuerzas de cizalla, estabilidad de los flóculos, así como la tendencia a la re-floculación y reversibilidad. Así mismo, nos ayuda a optimizar la dosis y selección de coagulantes y floculantes, pues podemos seleccionar las dosis mínimas de polímeros evitando sobredosificaciones que repercuten negativamente en las industrias de generación eléctrica, no sólo desde el punto de vista económico sino de ensuciamiento de las instalaciones por depósitos adherentes como consecuencia de un exceso de productos sin reaccionar (Blanco et al., 1996;2002, Tijero et al., 2011).



2. Materiales y Métodos

2.1 Fundamento del método

La metodología empleada en este estudio está basada en una óptica de precisión, la cual permite estudiar y realizar el seguimiento a tiempo real de las interacciones entre partículas y los procesos de coagulación y floculación. El microscopio laser sin imagen o sistema de medida por reflexión, es una técnica que realiza mediciones de medidas de cuerda de partículas a través de la reflexión de una luz láser que hace barridos a gran velocidad con un movimiento circular constante (Preikschat and Preikschat, 1989; Hokanson and Reed, 1995; Preikschat et al., 1997).

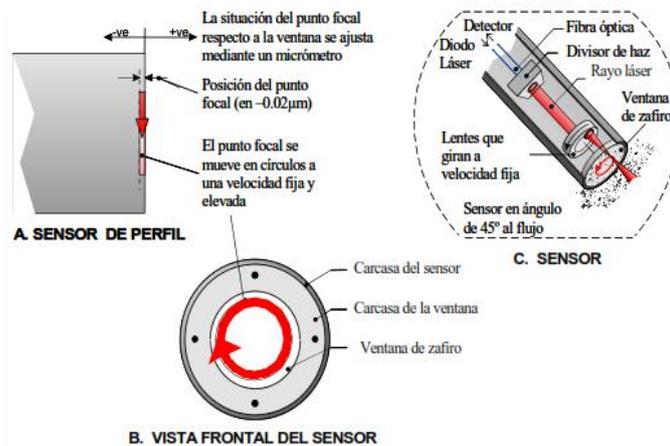


Figura 1. Estructura y funcionamiento del sensor FBRM

En la **figura 1** se representa la estructura y funcionamiento de un sensor FBRM; cuando la luz láser enfocada incide sobre una partícula, se produce un pulso proporcional de luz reflejada en función a la longitud de la partícula interceptada. A su vez, la medida de longitudes de cuerda por reflexión de rayo enfocado es proporcional al índice de refracción de las partículas y el medio que se encuentran dispersas (Kail et al., 2007)

La duración de cada pulso es proporcional a longitud de partícula interceptada para una velocidad constante de rotación de rayo láser, permitiendo calcular los tamaños de cuerda de las partículas, de este modo, la sonda permite el estudio del estado de agregación de los coágulos y flóculos. En función de la duración de la medida, se obtienen diferentes longitudes de onda que pueden ser representados mediante un histograma o distribución de los tamaños de cuerda (Tadayon and Rohani, 1998). En la **figura 2** se puede observar como los pulsos proporcionales de las partículas se emplean para obtener tamaños de cuerda.

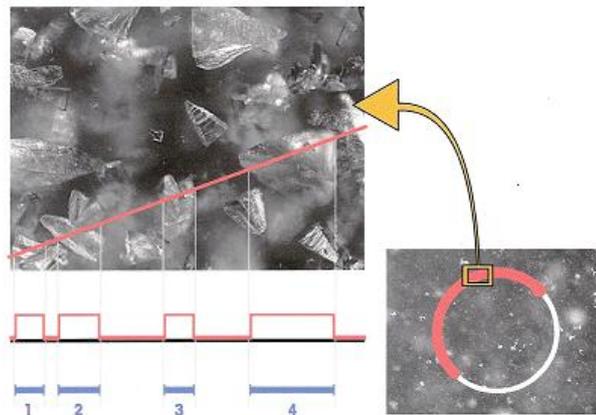


Figura 2. Pulsos proporcionales a longitudes de las partículas

La técnica FBRM nos proporciona datos sobre distribución de la longitud de cuerda de las partículas en suspensión en tiempo real. Esta distribución está influenciada por la forma, tamaño y concentración de partículas y nos permite el seguimiento on-line del proceso de coagulación y floculación reproducible tanto a escala industrial como a escala de laboratorio. Además aporta información acerca de la estabilidad, capacidad de re-floculación y seguimiento de la interacción con los agentes químicos utilizados (Kovalsky and Bushell, 2005).

En este estudio se empleó una sonda M500P FBRM de Lasentec Mettler Toledo, en Seattle, EE.UU (Blanco et al., 2002) junto con un dosificador automático (**Figura 3**). A partir del análisis de los datos obtenidos se seleccionó la dosis óptima de coagulante entre las diferentes dosis estudiadas, y una vez seleccionada se estudió su interacción con diferentes floculantes.



Figura 3. Equipo de medida por reflexión de rayo enfocado “FBRM”



2.2 Ensayos de coagulación

Todos los ensayos de coagulación se realizaron con agua de aporte de una instalación de tratamiento físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales en una central térmica de ciclo combinado (CTCC). Se utilizó tricloruro de hierro como agente coagulante. Con el objeto de mejorar el conocimiento de los fenómenos de coagulación y las propiedades de los coágulos generados tras la adición de tricloruro de hierro, así como el residual de polielectrolito, se realizaron una serie de ensayos a diferentes concentraciones para así poder calcular la mejor dosis en el proceso. Las concentraciones ensayadas fueron 20, 40, 60 ppm y a la concentración empleada en la CTCC a escala de laboratorio (80 ppm). Para reproducir las condiciones de operación de la fábrica, se agitó la muestra de agua en un vaso de precipitado de 600 mL y se adicionó el coagulante a los 60 segundos agitando a 600 rpm durante 5 min.

2.3 Ensayos de floculación

Una vez llevado a cabo el estudio de coagulación, con el objetivo de evaluar la eficacia en la formación de flóculos y la estabilidad frente a la fuerza de cizalla se realizaron diversos ensayos utilizando varios floculantes de diferentes características (**Tabla 1**). Los ensayos de floculación se realizaron tras el proceso de coagulación con tricloruro de hierro a las concentraciones seleccionadas 60 ppm y 80 ppm. Una vez finalizado el proceso de coagulación, se adicionó el floculante seleccionado para alcanzar las siguientes concentraciones a los tiempos: 0,3 ppm (1 min), 0,45 ppm (2 min) y 0,6 ppm (3 min). En último lugar, con el objetivo de evaluar la estabilidad y capacidad de re-floculación se varió la agitación a diferentes tiempos, partiendo de 400 rpm (2 min) hasta 600 rpm (1 min) y a 800 rpm (1 min), y por último, para determinar la estabilidad de los flóculos así como la reversibilidad de la floculación, se descendió a 400 (6 min) rpm nuevamente.

Tabla 1. Características de los floculantes ensayados

Nombre	Tipo	Carga	Peso molecular
FL.01	Líquido	30 %	Alto
FL.02	Sólido	25%	Medio
FL.03	Líquido	10%	Bajo
FL.04	Sólido	10%	Bajo
FL.05	Sólido	25%	Bajo
FL.06	Sólido	30%	Medio

3 Resultados y discusión

3.1 Ensayos de coagulación

En primer lugar, se evaluó el efecto de la adición de diferentes concentraciones de agente coagulante (FeCl_3) sobre el tamaño medio de cuerda (TMC) y el número de partículas.



Para evaluar la evolución del proceso de coagulación, se determinó el TMC en el transcurso del ensayo con el uso del láser FBRM. El TMC nos facilita datos sobre la distribución de la longitud de cuerda de las partículas en suspensión, las cuales son interceptadas por el rayo láser y se encuentra directamente relacionado con la forma, tamaño y concentración de las mismas. En este estudio, se determinaron el número de partículas medidas durante el intervalo del experimento en diferentes intervalos de TMC (1-10, 10-50, 50-100 y 100-250 μm).

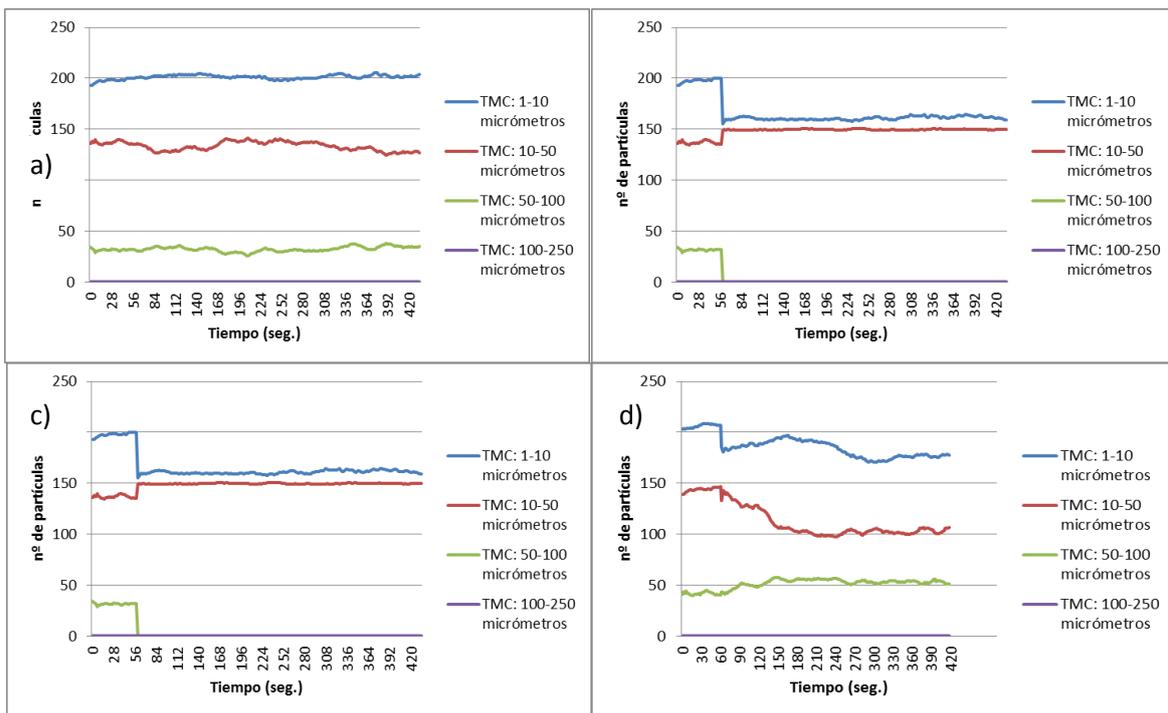


Fig.4 Numero de partículas medidas durante el transcurso del experimento con adición de a) 20 b) 40 c) 60 ppm de FeCl₃ y d) 80 ppm

A la vista de las **figura 4**, para dosis de 20 ppm de tricloruro de hierro no se observan cambios significativos respecto al TMC inicial (agua bruta) ni en la distribución de partículas. Esta concentración no es suficiente para formar coágulos apreciables.

Para dosis de 40 y 60 ppm se observa una disminución del TMC respecto al inicial del agua bruta al añadir el agente coagulante. Observamos que disminuyen el número de partículas menores (1-10 μm), así como decrecen el número de partículas entre los 50-100 μm . La coagulación queda determinada por el aumento de partículas entre los 10-50 μm .

Para dosis de tricloruro utilizada en fábrica (80 ppm de tricloruro) se observa una disminución del TMC respecto al inicial del agua bruta al añadir el agente coagulante. Esto es debido a que a pesar de que disminuyen el número de partículas inferiores (1-10 μm) también disminuyen el número de partículas entre los 10-50 μm . La coagulación queda determinada por el aumento de partículas entre los 50-100 μm .



3.2. Ensayos de floculación

Tras la selección de las dosis de $FeCl_3$ que obtienen mejor respuesta en el proceso de coagulación (60 y 80 ppm), se realizaron ensayos con aguas provenientes de la industria empleando sendas concentraciones de $FeCl_3$ y un total de seis floculantes seleccionados (**Tabla 1**). Con estos ensayos se pretende optimizar la dosis de los floculantes ya que se incrementa la concentración a lo largo del experimento y se evalúa la capacidad de floculación de éstos. Asimismo, aumentando la agitación desde 400, 600 hasta 800 rpm se evalúa la estabilidad de la floculación frente a la agitación y para estudiar la reversibilidad de la floculación se reduce drásticamente la agitación nuevamente a 400 rpm. El ensayo de estabilidad de la floculación es muy importante en este estudio, es cierto que interesan agregados de partículas significativamente grandes pero sino son estables frente al tiempo y variada agitación, no son interesantes para la industria pues no se conseguirá una adecuada coagulación-floculación.

La **Tabla 2** muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de coagulación-floculación para todos de los floculantes seleccionados. Todos los floculantes probados fueron estables frente a la agitación en los ensayos de la evaluación de la refloculación. A la vista de los resultados los floculantes que mejor respuesta ofrecen son FL.01 y FL.06. Con el floculante FL.01 y a una dosis óptima de 0,3 ppm se obtienen los valores más elevados de tamaño medio de cuerda máximo y en cuanto a la estabilidad de los flóculos formados, uno de los ensayos que consigue mejores resultados es a 60 pmm de coagulante. El floculante FL.01 tiene un elevado peso molecular y una alta carga (30%) un incremento en el peso molecular del polímero aumenta el tamaño del floculo debido a que, al disponer de una cadena molecular larga, la poliacrilamida puede interactuar con las partículas a distancias más largas (Zhu et al., 2009). Estos ensayos pueden extrapolarse a otros estudios de floculación con poliacrilamidas aniónicas en fibro-cementos , en los cuales los mejores resultados se obtenían con floculantes de elevado peso molecular (Negro et al., 2005)

Tabla 2. Tamaños de cuerda máximos alcanzados durante la estabilidad a las diferentes concentraciones de coagulantes (60 y 80 ppm) y dosis optima de floculante según el tipo de floculante objeto de estudio.

Floculante	$FeCl_3$ (ppm)	TMC (μm)	max	TMC est (μm)	Dosis óptima floculante (ppm)
FL.01	60	100		79	0.3
	80	104		39	0.3
FL.02	60	68		31	0.3
	80	92		70	0.3
FL.03	60	75		50	0.45-0.6
	80	100		70	0.45-0.6



FL.04	60	50	36	0.3
	80	80	49	0.3
FL.05	60	72	59	0.45-0.6
	80	79	43	0.45-0.6
FL.06	60	110	40	0.3
	80	100	48	0.3

4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la viabilidad del uso de la técnica FBRM para el estudio de optimización de los mecanismos de floculación en aguas residuales para su posterior reutilización en una fábrica de generación eléctrica.

La utilización de esta técnica permitió la selección de la concentración de agente coagulante tricloruro de hierro (60 ppm) y de agente floculante (FL.01) a 0,03 ppm. A la vista de los resultados se consiguen valores de TMC significativos y estabilidad frente a la agitación, esto se traduce en menores dosis de polielectrolito a utilizar con el consiguiente beneficio económico y mejora en la vida útil de las instalaciones, pues disminuiríamos los problemas asociados al ensuciamiento de las aguas de procesos en formas de depósitos adherentes.

La sonda FBRM permitió la monitorización, seguimiento, análisis y optimización del proceso obteniendo resultados sobre la dosis de coagulante a utilizar y los floculantes de mayor eficiencia en cuanto a los procesos de coagulación-floculación, pudiendo disminuir la dosis de los polielectrolitos evitando sobredosificaciones de los mismos. Ésta técnica nos proporciona información útil sobre distribución del tamaño medio de cuerda de las partículas, dosis óptima y procesos de aglomeración y dispersión de partículas.

Una de las mayores ventajas de esta técnica que ofrece a las industrias, es la capacidad de optimizar el proceso de depuración de aguas residuales mediante la implantación de un sensor *on-line* sin la necesidad de realizar análisis de laboratorio de mayor complejidad en cuanto a tiempo y consumo de reactivos, lo que repercute en la mejora de la calidad de las aguas y en el estado de conservación estructural de sus instalaciones, así como permite optimizar el consumo de agentes químicos durante el proceso en función de los parámetros de calidad necesarios del agua de salida. Así, la implantación de un sensor FBRM se constituye como una forma rápida y económica de controlar los mecanismos de coagulación-floculación y predecir la calidad de las aguas finales del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Averty K. B.; Fisher J. B.; Huber-Lee A. T.; Lewis A.; Macknick J.; Madden N. T.; Rogers J.; Tellinghuisen S. Freshwater Use by U.S. Power Plants Electricity's



- Thirst for a Precious Resource, A Report of the Energy and Water in a Warming World Initiative, Cambridge, MA, Union of Concerned Scientists, NREL Report No. TP-6A20-5327; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, (2011).
- Badr L.; Boardman G.; Bigger J. Review of Water Use in U.S. Thermoelectric Power Plants. *J. Energy Eng.* (2012),1384246–257.
 - Blanco.A, Negro.C, Hooimeijer.A, Tijero.J .Polymer optimization in paper mills by means of a particle size analyser: an alternative to zeta potential measurements *Appita J.*, 49 (1996), pp. 113–116.
 - Blanco.A , Negro.C, Tijero.J.. Developments of flocculation in papermaking. PIRA International, Leatherhead, UK (2002) pp. 38–58.
 - Bridget R. Scanlon,* Robert C. Reedy, Ian Duncan, William F. Mullican, and Michael Young.Controls on Water Use for Thermoelectric Generation: Case Study Texas, *U.S. Environmental Science and Technology* . Volume 47, Issue 19, (2013), pp 11326-11334.
 - Johnson C., 2.4 - Advances in Pretreatment and Clarification Technologies, In *Comprehensive Water Quality and Purification*, edited by Satinder Ahuja, Elsevier, Waltham, (2014), pp 60-74.
 - Heinrich J., Ulrich J.. Application of laser-backscattering instruments for in situ monitoring of crystallization process—a review *Chem. Eng. Technol.*, 35 (6) (2012), pp. 967–979.
 - Hokanson, J. V., Reed, B. W. “Apparatus and method for particle analysis”, US5426501, (1995).
 - Kail.N, Briesen.H, Marquardt.W. Advanced geometrical modelling of focussed beam reflectance measurements (FBRM). *Part. Part. Syst. De Char.*, 24 (2007), pp 184-192
 - Kovalsky.P, Bushell.G. In situ measurement of fractal dimension using focussed beam reflectance measurement. *Chem. Eng. J.*, 111 (2005), pp. 181–188.
 - Macknick J.; Newmark R.; Heath G.; Hallett K. C.A Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies, National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-6A20-50900; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, (2011).
 - Negro N, A, Fuente E, LSánchez L, Tijero J. Influence of flocculant molecular weight and anionic charge on flocculation behaviour and on the manufacture of fibre cement composites by the Hatschek process. *Cement and Concrete Research*Volume 35, Issue 11, (2005), pp 2095–2103
 - Okpeafoh S. Agimelen, Peter Hamilton, Ian Haley, Alison Nordon, Massimiliano Vasile, Jan Sefcik, Anthony J. Mulholland, Estimation of particle size distribution and aspect ratio of non-spherical particles from chord length distribution, *Chemical Engineering Science*, Volume 123, (2015), pp 629-640.
 - Pernitsky D.J., Edzwald J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology–AQUA*, 55 (2),(2006), pp 121–141.
 - Preikschat E., Hokanson J. V., Reed B. W. “System for acquiring an image of a multi-phase fluid by measuring backscattered light”, US5619043, (1997).
 - Preikschat F. K., Preikschat E. “Apparatus and method for particle analysis”, US5012118, (1989).



- Tadayyon.A., Rohani S. Determination of particle size distribution by Par-Tec (R) 100: modeling and experimental results. Part. Part. Syst. Charact., 15 (1998), pp. 127–135.
- Tijero, A, Moral, A, Marin, A , Tijero, J. Eliminación de depósitos adherentes en una central de ciclo combinado. (2011). VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua “Ríos Ibéricos +10. Mirando al futuro tras 10 años de DMA”.
- Zhe Zhu, Tao Li, Jiajuan Lu, Dongsheng Wang, Chonghua Yao. Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids. International Journal of Mineral Processing Volume 91, Issues 3–4, 16, (2009) pp 94–99.