

NUEVOS CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS ULTRASONIDOS DE POTENCIA EN PROCESOS INDUSTRIALES Y MEDIO AMBIENTE

Juan A. Gallego-Juárez

Grupo de Ultrasonidos de Potencia (GUP), CSIC, Madrid (jgallego@ia.cetef.csic.es)

PUSONICS S.L, Arganda del Rey (Madrid), (jgallego@pusonics.es)

Resumen

Los Ultrasonidos de Potencia (UdP) constituyen en la actualidad una rama emergente del campo de los Ultrasonidos. De hecho el éxito y rápido desarrollo de las aplicaciones de los UdP en terapia médica ha dado lugar a que este sector sea considerado como un auténtico “boom”. Las nuevas aplicaciones de los UdP en procesos industriales pueden igualmente ser incluidas dentro de este “boom ultrasónico”. La energía ultrasónica está considerada como una energía “verde”, favorable al medio ambiente, y de bajo consumo energético lo que la califica definitivamente como energía sostenible y, por tanto, con gran futuro de aplicación.

El potencial de los UdP se extiende tanto a procesos físicos como químicos y su utilización se basa en la adecuada explotación de los fenómenos no-lineales asociados a las altas amplitudes, tales como la presión de radiación, la distorsión de la onda, las corrientes acústicas, la cavitación en líquidos, las dislocaciones en sólidos, etc.

En esta presentación se hace una breve revisión de aquellos procesos ultrasónicos más actuales y novedosos, considerando su grado de aplicabilidad y su capacidad para incidir en la resolución de problemas reales planteados tanto en desarrollos tecnológicos avanzados como en tecnologías tradicionales utilizadas en la industria o en el medio ambiente. Procesos de gran impacto científico-tecnológico, como la consolidación de materiales para la creación de estructuras avanzadas o la producción de nanomateriales, serán presentados junto con otros de incidencia en sectores como el agroalimentario y medio ambiente. Se pretende así dar una amplia panorámica de la eficacia y potencial de una energía acústica que, pese a su gran valor, es poco conocida.

Palabras clave: Ultrasonidos, Ultrasonidos de Potencia, Aplicaciones Ultrasónicas.

Abstract:

Power Ultrasound (PU) now constitutes an emerging branch of the field of Ultrasound. In fact the success and rapid development of the PU applications in medical therapy has resulted in considering this sector as a real "boom". The new PU applications in industrial processes may also be included within this "ultrasonic boom". Power ultrasound is considered a "green" energy, environment friendly and energetically efficient that definitely is qualified as a sustainable energy and therefore with a great future application.

The potential of PU extends to both physical and chemical processes and its use is based on the proper exploitation of nonlinear phenomena associated with high amplitudes, such as radiation pressure, distortion of the wave, acoustic streaming, cavitation in fluids, dislocations in solids, etc..

This presentation is a brief review of those processes most current and innovative in PU , considering the degree of applicability and their ability to influence the resolution of real problems in advanced and traditional technological developments used in industry or environment. Processes of great scientific and technological impact, such as additive manufacturing and consolidation of materials for creating advanced structures or production of nanomaterials will be presented along with others in areas such as food and environment. The aim is to give a broad overview of the effectiveness and potential of an acoustic energy that, despite its great value, is poorly known.

Key words: Ultrasound, Power Ultrasound, Ultrasonic Applications

PACS: 43.25, 43.35, 43.38

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías “verdes” para procesos industriales constituye en el momento presente uno de los principales retos en el campo de la investigación y de la innovación tecnológica. Los Ultrasonidos de Potencia (UdP) ofrecen un gran potencial como energía limpia no ionizante para su aplicación en un amplio rango de procesos. Las tecnologías UdP se basan en la aplicación de las ondas elásticas de alta intensidad para producir cambios en el medio tratado mediante la adecuada explotación de los fenómenos no-lineales asociados a las altas amplitudes tales como la distorsión de la onda, la presión de radiación, las corrientes acústicas, la cavitación en líquidos y el movimiento de las dislocaciones en sólidos. Como consecuencia de estos fenómenos la energía ultrasónica es capaz de activar una serie de mecanismos tales como agitación, difusión, inestabilidades en las interfaces, reducción de la fricción, calentamientos localizados, ruptura mecánica, efectos químicos, etc. Estos mecanismos pueden ser utilizados para producir o mejorar procesos industriales, medioambientales y médicos de muy diverso tipo.

Otros aspectos importantes de las tecnologías UdP, además de su carácter “verde” y sostenible, son su sinergia para actuar conjuntamente con otras formas de energía así como su versatilidad para producir diferentes efectos en medios diferentes de forma que a veces pueden aparecer incluso como efectos opuestos. Tal es, por ejemplo, el caso de la utilización de la energía ultrasónica para la rotura de aglomerados de partículas en líquidos y para la formación de aglomerados de partículas en gases.

La aplicación de los UdP en procesos industriales y medioambientales ha sido explorada desde la primera mitad del siglo XX. Ya en los años 50 se desarrollaron sistemas ultrasónicos para limpieza, emulsificación, soldadura, mecanizado, etc. Inicialmente las perspectivas de aplicación de las tecnologías UdP despertaron una gran expectación tanto entre los científicos como entre los industriales. Sin embargo sólo muy pocas empresas fueron capaces de desarrollar dispositivos comerciales para aplicaciones muy determinadas y, como consecuencia, el potencial de las tecnologías UdP quedó restringido durante muchos años a sectores muy limitados. Las razones por las que las tecnologías UdP no alcanzaron un rápido desarrollo pueden atribuirse principalmente a una serie de problemas técnicos que dificultaron su implementación a nivel industrial. En particular los problemas relacionados con la capacidad de potencia, el rendimiento y el escalamiento de los sistemas de transducción han retardado el desarrollo industrial de esta tecnología. La baja capacidad de potencia de las unidades de

transducción obligaba a la utilización de una gran cantidad de ellas en las instalaciones industriales, lo que evidentemente no resultaba práctico ni económicamente efectivo. Por otra parte, el diseño de los componentes de los transductores de UdP había que realizarlo mediante modelización analítica lo que era factible básicamente para sistemas de geometrías y estructuras simples. En consecuencia, y a pesar de los beneficios asociados al uso de la energía ultrasónica y al amplio potencial de aplicaciones, sólo un reducido número de aplicaciones han sido implantadas industrialmente.

En los últimos años ha tomado fuerza un renovado interés por las tecnologías ultrasónicas, particularmente en aquellos sectores en los que esta energía puede representar una herramienta limpia y energéticamente eficiente para la mejora de los procesos. Este es el caso de sectores tan relevantes como el alimentario, el farmacéutico, medioambiente, manufacturas varias, etc. Por otro lado, el desarrollo durante los últimos quince años de potentes programas de elementos finitos para modelización de los dispositivos de transducción UdP así como de sistemas electrónicos digitales para pilotar y controlar la sintonización de estos dispositivos de banda estrecha ha contribuido notablemente a revitalizar las expectativas de estas tecnologías.

Por nuestra parte, la introducción de una nueva familia de transductores UdP con radiadores de área extensa, que comprende una variedad de tipos diseñados para aplicaciones específicas en fluidos (especialmente en gases) y en medios multifásicos, ha supuesto una aportación que ha contribuido de manera significativa a la implementación a nivel semi-industrial e industrial de nuevas aplicaciones industriales en los sectores alimentario, medioambiental y manufacturero.

En esta presentación se pretende hacer una breve revisión de aquellos procesos ultrasónicos más actuales y novedosos, considerando su grado de aplicabilidad y su capacidad para incidir en la resolución de problemas reales planteados tanto en desarrollos tecnológicos avanzados como en tecnologías tradicionales utilizadas en la industria o en el medio ambiente

2. PROCESOS EN INGENIERÍA DE MATERIALES E INGENIERÍA MECÁNICA

2.1. Manufactura aditiva de materiales [1]

La manufactura aditiva de materiales es un método moderno de fabricación de objetos tridimensionales sobre un sustrato añadiendo capas de material y consolidando estas capas. Los UdP se utilizan para la consolidación de las capas mediante las vibraciones ultrasónicas y presión. Las capas se colocan según la forma que se quiera dar al objeto y los materiales empleados pueden ser plásticos o metálicos y su composición variar discontinua o gradualmente de una capa a la siguiente, creando un gradiente de material. Este procedimiento permite la construcción de objetos compuestos (composites) reforzados con fibras y es muy útil en la realización de estructuras aeronáuticas.

El mecanismo de unión y consolidación es el de la soldadura ultrasónica que ha sido ampliamente estudiado. La unión de las capas se inicia por una combinación de una presión estática moderada y el roce mutuo de las superficies causado por el movimiento ultrasónico. El movimiento limpia las superficies mediante la fricción y nivela las asperezas superficiales. Esto permite el contacto directo de las capas de material resultando en una unión atómica. Las vibraciones ultrasónicas de cizalladura producen calor mediante la fricción, dando lugar a deformación plástica y promoviendo la difusión y cristalización entre capas, obteniéndose una unión bien consolidada.

2.2.-Producción de nanomateriales [2,3]

El elevado interés que existe en la actualidad por los nanomateriales es en gran parte debido a que la nanotecnología permite obtener nuevas propiedades de los materiales tradicionales mediante la reducción del tamaño de partícula. Este interés ha conducido al desarrollo de diversos métodos de síntesis y fabricación. Los UdP constituyen una de las técnicas más recientes para la preparación de nanocompuestos, que se inició en los años 90 y cuya aplicación ha ido creciendo exponencialmente.

Existen diversas teorías para explicar cómo los UdP actúan en la formación de los nanocompuestos, pero todas coinciden en que el fenómeno básico es el de la cavitación ultrasónica, es decir, la formación, crecimiento y colapso de las burbujas en el medio líquido. La cavitación rompe los enlaces químicos y produce la descomposición del material. Esta descomposición depende de parámetros tales como la presión de vapor del material, la presión de vapor del solvente, el gas ambiente, etc.

El colapso de la burbuja origina muy altas temperaturas (5000 °K) que se producen en menos de un nanosegundo lo que hace que las tasas de enfriamiento obtenidas sean superiores a 10^{10} °K/s. Esta rápida velocidad de enfriamiento impide la organización y cristalización de los productos resultantes que predominantemente son nanopartículas amorfas sobre todo si el producto es volátil y la fase gas juega un papel importante. Si el producto de partida es no-volátil, la acción de la burbuja de cavitación ocurre enteramente en el líquido en un entorno de unos 200nm y los nanoproducidos resultantes son a veces amorfos y a veces cristalinos, dependiendo de la temperatura en dicho entorno.

En resumen, mediante las tecnologías UdP es posible obtener nanomateriales que en su fase sólida pueden ser amorfos o cristalinos y de distintas formas y estructuras.

3.- APLICACIONES EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

3.1.- Desespumación ultrasónica [4]

La espuma es una dispersión de gas en líquido constituido por burbujas de gas separadas una de otra por una película líquida delgada. En general, es un subproducto no deseado en los procesos industriales debido a que causa dificultades en el control y en la operatividad del mismo. Un ejemplo típico es el de la industria de la fermentación, en la que la espuma representa uno de los mayores problemas. La espuma en fermentaciones provoca diversos efectos adversos tales como la pérdida de fluido y células de los cultivos, contaminación de la atmósfera, actuar como barrera para la transferencia de oxígeno, generar datos no válidos de fermentación, etc. Hay varios métodos convencionales para combatir la espuma tales como los térmicos, los químicos o los mecánicos. Los métodos térmicos implican calentar o enfriar la espuma, lo que generalmente es difícil y costoso. Los métodos químicos emplean agentes antiespumantes que producen una disminución de la tensión superficial. Son, en general, eficaces pero causan problemas de contaminación del proceso. Los métodos mecánicos tratan de producir la ruptura de burbujas mediante dispositivos tales como palas rotatorias, chorros de aire o líquido, bombas de vacío, etc. En general, los métodos mecánicos son efectivos sólo para espumas de burbujas grandes.

Los UdP representan un procedimiento limpio y eficiente para romper las burbujas de las espumas. Los mecanismos de desespumación ultrasónica son bastante complejos ya que en ellos interviene la actuación conjunta de varios efectos tales como los debidos a la presión de radiación, la vibración de la burbuja, la generación de ondas capilares en la capa líquida, etc.

La aplicación de la energía ultrasónica para romper la espuma se introdujo por primera vez mediante el uso de dispositivos basados en generadores acústicos aerodinámicos. Sin embargo tales dispositivos, además de involucrar un alto consumo de energía, presentan inconvenientes prácticos tales como la necesidad de una alta capacidad de generación de aire y el control y la esterilización del flujo de aire.

En la actualidad un nuevo tipo de sistema de desespumación por ultrasonidos (UDS) se ha desarrollado sobre la base de la utilización de los transductores con radiador de placa escalonada-acanalada para transmisión focalizada de ultrasonidos de alta intensidad por vía aérea. Estos transductores están activados por un dispositivo electrónico que genera, controla y supervisa la excitación eléctrica de los mismos, así como el ajuste y el mantenimiento de un nivel adecuado de energía ultrasónica para asegurar la dosis correcta de presión acústica. Los UDS producen radiación altamente focalizada obteniéndose niveles de presión acústica superior a 170 dB. Estos sistemas han sido aplicados con éxito para el control de exceso de espuma producido en los reactores de fermentación y en otros reactores de grandes dimensiones, así como en la operación de llenado a alta velocidad de bebidas carbónicas en líneas de envasado.

Los UDS se fabrican actualmente en España por la empresa PUSONICS (spin-off del CSIC) (www.pusonics.es).

3.2.- Secado ultrasónico [5]

El secado es un método para conservar alimentos. Los procedimientos tradicionales de secado son: aire caliente y liofilización. El secado por aire caliente está muy difundido pero produce deterioro en el alimento. En la liofilización, que consiste en congelar los alimentos y después sublimarlos, el producto mantiene la calidad pero el procedimiento es caro y de alto consumo energético.

La energía ultrasónica se puede utilizar para el secado de alimentos. El mecanismo ultrasónico de acción es un proceso de deshidratación basado fundamentalmente en el efecto de microesponja producido por las vibraciones de alta frecuencia que facilita la migración del líquido a través de los canales naturales del producto. Asimismo el líquido retenido en los capilares puede ser extraído si la presión acústica es superior a la tensión superficial. Otros mecanismos complementarios son el aumento de difusividad y el arrastre del líquido por burbujas atrapadas en los microporos mediante difusión rectificada. Por otra parte, la cavitación es un poderoso efecto para separar la humedad ligada químicamente al producto. Adicionalmente, si el secado se hace por radiación aérea de la onda ultrasónica, las variaciones de presión que esta introduce en la interfase sólido-líquido favorece la tasa de evaporación del líquido extraído del interior del producto. En el caso de utilizar aire forzado para la remoción del líquido, la energía ultrasónica produce un efecto de oscilación de la velocidad que puede acelerar el secado.

Los resultados obtenidos con vegetales muestran que mediante la energía ultrasónica se puede obtener un secado de los alimentos sin calentamiento de los mismos y con una efectividad mayor que con el aire caliente y un consumo energético inferior al de la liofilización. El

resultado más importante es que, además, la calidad del producto se mantiene íntegra con este procedimiento

3.3.-Extracción con fluidos supercríticos asistida por ultrasonidos [6]

El uso de fluidos, tales como CO₂, en condiciones supercríticas para procesos de extracción es una técnica muy utilizada en la actualidad. De hecho la extracción con dióxido de carbono supercrítico está considerada hoy en día, de forma ampliamente aceptada dentro del sector alimentario, como técnica alternativa a la extracción por disolventes convencionales. Esto es básicamente debido a las importantes ventajas que el CO₂ ofrece, tales como las de su no toxicidad y reciclabilidad, así como las de ser relativamente inerte y no inflamable. Sin embargo, la extracción por fluidos supercríticos (EFS) se ve afectada por la lenta cinética del proceso. Por tanto, se requiere recurrir a la aplicación de nuevas tecnologías complementarias para mejorar la transferencia de masa del disolvente en el producto con el fin de acelerar y mejorar estos procesos. El uso de los UdP ha supuesto una manera eficaz de resolver este problema. Los UdP ayudan significativamente a la transferencia de masa mediante los mecanismos derivados de la presión de radiación y de las corrientes acústicas produciendo la necesaria agitación el FS lo que, dada la estructura de los reactores de altas presiones en los que se producen las condiciones supercríticas, sería imposible realizar por medios convencionales.

Los procesos experimentales implementados en instalaciones de EFS asistidas por UdP para la obtención de diversos aceites vegetales han demostrado la bondad de la tecnología con mejoras en el tiempo de los procesos y en la cantidad de aceite obtenida que, según el producto de que se trate, van desde el 30 al 90%.

4. – APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

4.1.- Tratamiento de aguas [7,8]

En el tratamiento de aguas la utilización de los UdP está dando respuesta a diversos problemas de forma que actualmente esta tecnología ha alcanzado una significativa relevancia en este sector. Revisaremos brevemente estos variados aspectos

4.1.1. Eliminación de la contaminación biológica

Algunas especies de bacterias y esporas se aglomeran en colonias o grupos. El uso de biocidas puede destruir los microorganismos situados sobre la superficie de estas agrupaciones, pero a menudo dejan las bacterias del núcleo intactas. También los flóculos de partículas finas pueden atrapar a las bacterias protegiéndolas contra la desinfección. Debido a estos problemas se necesitan métodos alternativos para la purificación de agua y entre éstos la aplicación de los UdP está demostrando ser de notable eficacia. La energía ultrasónica es capaz de inactivar bacterias y / o desaglomerar agrupaciones bacterianas haciéndolas así más susceptibles a los biocidas. Se ha experimentado la aplicación de los UdP en diversas gamas de frecuencias (de 20 a 850 kHz) obteniendo resultados selectivamente positivos dependiendo del tipo de especie bacteriana.

4.1.2. Eliminación de la contaminación química

Utilizando técnicas biológicas. Una propuesta atractiva para la remediación del agua es el uso de material biológico (organismos completos o enzimas) para la eliminación de la contaminación química ya que esto proporciona un proceso catalítico natural y económico.

Se ha visto en varios procesos que el uso de una enzima elimina aproximadamente el 70% de los contaminantes. Sin embargo aplicando los UdP combinados con la enzima, los contaminantes son casi completamente eliminados incluso en un tiempo más reducido. El éxito de la combinación enzima+UdP en la degradación biológica se puede deber a una mejora de la acción de la enzima por la radiación ultrasónica que facilita su difusión.

4.1.3. Tratamiento de lodos de aguas residuales

Digestión anaerobia

En los lodos biológicos la digestión anaerobia es la técnica estándar para la reducción del contenido de materia orgánica. La hidrólisis lenta del lodo biológico es el paso limitante de la degradación anaerobia. Uno de los principales efectos de los UdP sobre los microorganismos es la ruptura de las paredes celulares y posterior liberación de material celular. Esto hace que los compuestos orgánicos disueltos sean más fácilmente disponibles en el proceso anaeróbico de digestión y aumentando la velocidad de fermentación

Deshidratación

Otra de las etapas de tratamiento de aguas residuales es la deshidratación de los lodos. Este es un proceso generalmente lento y difícil ya que el agua está atrapada entre el material particulado. La separación del sólido a partir de sus aguas madres es un factor importante en el tratamiento las aguas residuales, ya que resulta en una reducción de la masa total y facilita la eliminación de relleno.

La separación sólido/líquido en las suspensiones es común a muchas industrias. Convencionalmente, para estos procesos se han venido empleando filtros de varios tipos (membranas, cerámicos, etc) activados por bombas de succión. Desafortunadamente, estas metodologías a menudo conducen a la obstrucción de los filtros con los consiguientes problemas de ralentización e incluso detención de la operación. En todo caso, en este tipo de operación siempre queda integrado con el sólido un porcentaje significativo de líquido residual muy difícil de separar.

La aplicación de los UdP representa un procedimiento eficaz para la liberación de la humedad residual. La energía ultrasónica acoplada directamente al lodo provoca, a través de las fuerzas vibratorias alternas, una deshidratación eficiente mediante el efecto de microesponja y la creación de canales para la migración de humedad. Al mismo tiempo estas fuerzas alternas favorecen la limpieza de los filtros evitando la obstrucción de los mismos.

La técnica ultrasónica ha sido probada con filtros cerámicos rotatorios obteniéndose deshidrataciones superiores al 80% con muy cortos tiempos de tratamiento (del orden de 2 segundos) y potencias ultrasónicas aplicadas relativamente bajas (alrededor de 100 W). Estos resultados suponen una notable mejora sobre la deshidratación obtenida con los filtros convencionales.

4.2.-Remediación de la contaminación atmosférica por partículas finas [9]

La eliminación de partículas finas (menores de 2 micras) en las emisiones de gases o en ambientes industriales es uno de los problemas actuales más importantes en el control de la contaminación atmosférica. De hecho, estas partículas (micrónicas y submicrónicas) constituyen uno de los mayores riesgos para la salud ya que permanecen mucho tiempo en suspensión, penetran fácilmente en los tejidos respiratorios y son generalmente tóxicas. Además los sistemas convencionales de filtración, tales como los filtros electrostáticos, resultan poco eficaces para retener estas partículas de muy pequeño tamaño.

Se necesita, por tanto, una nueva tecnología. La aplicación de los UdP a una suspensión de partículas en un gas (aerosol) induce una serie de efectos que dan lugar a colisiones y aglomeraciones de las partículas en suspensión aumentando su tamaño. Este proceso, que se conoce como aglomeración acústica o ultrasónica, puede ser muy útil para la resolución del problema. El mecanismo de la aglomeración ultrasónica de partículas se basa en interacciones ortocinéticas e hidrodinámicas. Las interacciones ortocinéticas se producen como consecuencia de los diferentes desplazamientos que experimentan partículas de distinto tamaño mientras que las interacciones hidrodinámicas son debidas a las fuerzas hidrodinámicas que desarrollan en el fluido circundante a las partículas. La aglomeración acústica representa, por tanto, un proceso que permite precondicionar las partículas micrónicas y submicrónicas aumentando su tamaño para que puedan ser eficazmente retenidas en un filtro convencional. Esta tecnología se ha desarrollado a escala semi-industrial con cámaras de aglomeración multifrecuencia empleando transductores de placa escalonada de 10 y 20 kHz. La experimentación de la cámara de aglomeración en instalación piloto asociada a un filtro electrostático para flujos de 2000 m³/h, de emisiones producidas en la combustión de carbón en lecho fluido ha demostrado que la introducción de la tecnología UdP incrementa en más de un 40% la eficacia de retención de partículas micrónicas y submicrónicas del filtro electrostático.

Este proceso es de aplicación a numerosos problemas ambientales incluidos los casos de emergencia en instalaciones industriales o en plantas nucleares.

CONCLUSIÓN

De la revisión de esta selección de nuevos procesos que aquí se han presentado, parece evidente que la aplicación de los UdP en procesos industriales y medioambientales es un amplio campo en expansión que abarca una gran variedad de sectores. Esta es la razón por la que nuestro grupo de investigación del CSIC ha promovido la creación de la spin-off PUSONICS empresa dedicada al desarrollo, fabricación y comercialización de las nuevas tecnologías de UdP ideadas y patentadas por el grupo, así como a la explotación de todo su amplio potencial de aplicación.

AGRADECIMIENTO

Proyecto Plan Nacional DPI2009-14549-C04-01

REFERENCIAS

- [1] White, D., "Ultrasonic object consolidation" US Patent 6519500 B1, Feb 2003

- [2] Suslick, K.S., Hyeon, T.W, Fang, M.W. Nanostructured Materials Generated by High-Intensity Ultrasound: Sonochemical Synthesis and Catalytic Studies. *Chem. Mater.* 8 (1996) 2172
- [3] Gedanken, A., Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials, *Ultrasonics Sonochemistry* 11 (2004) 47–55
- [4] Gallego-Juárez J.A., Rodríguez-Corral G., Montoya-Vitini F., Acosta-Aparicio, V. M., Riera, E. & Blanco, A. 2005. Macrosonic generator for industrial defoaming of liquids by air-borne radiation. International patent PCT/ES2005/070113
- [5]. Gallego-Juárez, J.A, Riera, A., De la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral,G., Acosta-Aparicio V.M. and Blanco A., Application of High-Power Ultrasound for Dehydration of Vegetables: Processes and Devices; *Drying Technology*, 25: 1893–1901, 2007
- [6] Riera, E., Blanco, A., García, J., Benedito, J., Mulet, A., Gallego-Juárez, J.A., Blasco, M. High-power ultrasonic system for the enhancement of mass transfer in supercritical CO₂ extraction processes, *Ultrasonics* 50 (2010) 306–309
- [7] Mason, T.J., Developments in ultrasound—Non-medical, *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93 (2007) 166–175
- [8] Gallego-Juárez, J.A.*, Elvira-Segura, L., Rodríguez-Corral, G., A power ultrasonic technology for deliquoring, *Ultrasonics* 41 (2003) 255–259
- [9] Gallego-Juárez, J. A., Riera E., Rodríguez-Corral, G., Hoffmann, T.L., Gálvez-Moraleda, J.C., Rodríguez-Maroto, J.J, Gómez-Moreno, F.J., Bahillo Ruiz, A., Martín-Espigares, M., Acha, M. "Application of Acoustic Agglomeration to Reduce Fine Particle Emissions From Coal Combustion Plants" *Environmental Science and Technology*, Nov.1999 33(21), 3843-3849