

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 860 481**

51 Int. Cl.:

B06B 1/02 (2006.01)

G10K 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.07.2005 PCT/ES2005/070113**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.02.2007 WO07012676**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.07.2005 E 05782588 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.01.2021 EP 1914717**

54 Título: **Generador macrosónico para la despumación industrial de líquidos por vía aérea**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
05.10.2021

73 Titular/es:

**GALLEGO JUÁREZ, JUAN A. (16.6%)
INSTITUTO DE ACÚSTICA CONSEJO SUP. DE
INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS,
C/ Serrano, 144
28006 MADRID, ES;
RODRÍGUEZ CORRAL, GERMÁN (16.6%);
MONTROYA VITINI, FAUSTO (16.6%);
ACOSTA APARICIO, VICTOR (16.6%)
RIERA FRANCO DE SARABIA, ENRIQUE (16.6%) y
BLANCO BLANCO, ALFONSO (16.6%)**

72 Inventor/es:

**GALLEGO JUÁREZ, JUAN A.;
RODRÍGUEZ CORRAL, GERMÁN;
MONTROYA VITINI, FAUSTO;
ACOSTA APARICIO, VICTOR;
RIERA FRANCO DE SARABIA, ENRIQUE y
BLANCO BLANCO, ALFONSO**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 860 481 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Generador macrosónico para la despumación industrial de líquidos por vía aérea

5 **Sector de la técnica**

Esta invención se refiere a un generador sónico y/o ultrasónico para la rotura mecánica de burbujas de alta consistencia que constituyen espumas industriales. Por lo tanto, se le puede adscribir al sector de instrumentación industrial, con aplicaciones en el campo de los procesos fermentativos industriales.

10

Estado de la técnica

Los problemas asociados con un exceso de espuma en los procesos industriales, afectan a un gran número de sectores tales como el alimentario, el farmacéutico, el químico, etc. En alguno de estos sectores, y más específicamente en los que se basan en procesos de fermentación, un exceso de espuma constituye uno de los problemas más significativos. En concreto, un exceso de espuma origina una disminución de la capacidad de los depósitos, deficiencias en el proceso y reacciones, derrames y pérdidas de producto, dificultades en la dosificación del contenedor y llenado, efectos perjudiciales en maquinaria y equipos, etc.

15

20

Las espumas se producen en reactores, fermentadores, mezcladores, máquinas de envasado, etc. Existen tipos de espuma muy diversos, y cabe indicar que el grado de dificultad para su eliminación depende de sus características. Los métodos más comúnmente empleados para la despumación son: químicos, mecánicos y térmicos. Los métodos químicos son los más eficaces pero tienen el problema de contaminar el producto. Los procedimientos mecánicos tales como paletas móviles, chorros de aire o agua, etc. son buenos para espumas gruesas, pero poco eficaces para la espuma fina. Los métodos térmicos consisten en calentar y enfriar la espuma y son caros y difíciles de aplicar.

25

La capacidad de las ondas sónicas y/o ultrasónicas de alta intensidad para producir la rotura de espumas se conoce desde hace décadas [R. M. G. Boucher and A. L. Weiner "Foam control by acoustic and aerodynamic means" British Chemical Engineering vol. 8, 1963, pp. 808-812] si bien su aplicación ha sido muy limitada. Esta situación puede atribuirse fundamentalmente a la falta de generadores macrosónicos adecuados. Los generadores acústicos de potencia usados inicialmente eran del tipo aerodinámico (sirenas, silbatos acústicos) los que, aparte de poseer baja eficiencia [H. Hollfelder, Improving the efficiency of stem-jet whistles, Ultrasonics 5, 250-51, 1967], dan lugar a una serie de problemas colaterales tales como corrientes de aire, calentamiento, etc. que dificultan su aplicación.

30

35

El problema de la despumación industrial ha adquirido una mayor relevancia recientemente, por las crecientes restricciones para el uso de desespumantes químicos (el método hasta ahora más empleado), en particular en sectores tales como el alimentario y el farmacéutico. Esto hace que la aplicación de las ondas macrosónicas (sonido o ultrasonido de alta intensidad) vuelva a considerarse como un posible medio de despumación industrial no contaminante. Sin embargo, los precedentes más recientes sobre la "despumación macrosónica" recurren a la aplicación de los sonidos y/o ultrasonidos a través del líquido [N. Ueno, Y. Nishi, T. Sakurai, "Method of ultrasonic waves degassing and device using the same", patente estadounidense 6.106.590, 2000, H. K. Ratcliff, "Rotating sonic energy wave", patente estadounidense 3761732, 1972, Apparatus for defoaming liquids, patente estadounidense, 1075100, 1966, F. Shuhei, "Ultrasonic defoaming tank", patente europea EP10020253, 1998., J. A. Gallego-Juárez, "High Power Ultrasound" en Wiley Encyclopaedia of Electrical and Electronics Engineering, vol. 9, pp. 49-59, 1999] lo que en realidad supone, no la rotura de la espuma, sino la desgasificación del líquido que es un proceso distinto. De hecho, en la "desgasificación macrosónica" la onda se genera en la masa líquida y el gas disuelto o en forma de pequeñas burbujas dentro de ella se agrupa, formando burbujas de mayor tamaño que van aumentando progresivamente con la oscilación, ascendiendo hacia la superficie por donde finalmente escapan del líquido. Este es un fenómeno ampliamente referido en la bibliografía como "difusión rectificada" [T. G. Leighton "the acoustic bubble", Academic Press, Londres 1994] [L. Bjorno, "High-power Ultrasonics: Theory and Application" Proc. of the 13th International Congress on Acoustics, Belgrado 1989, pp. 77-89].

40

45

50

La "despumación macrosónica" es un proceso de destrucción de las burbujas que forman la espuma mediante las amplitudes de presión, cíclicamente positivas y negativas, generadas por las ondas sónicas y/o ultrasónicas de alta intensidad que inciden desde el aire sobre la espuma. Los mecanismos de ruptura de burbujas inducidos por radiación macrosónica son, básicamente, las resonancias de las burbujas, la presión de radiación, la fricción entre burbujas, las corrientes acústicas y la atomización de la película que forma la burbuja [L. Bjorno, "High-power Ultrasonics, Theory and Applications" Proc. of the 13th International Congress on Acoustics, Belgrado 1989, pp. 77-89].

55

60

El documento US5299175 A da a conocer una unidad electroacústica para una generación eficiente de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en un medio de gas y en interfases (gas-sólido, gas-líquido).

65

El objeto de la presente invención es un generador macrosónico por vía aérea para la rotura mecánica de las burbujas de alta consistencia que constituyen las espumas industriales que consiste en un transductor electroacústico de potencia y un dispositivo de generador electrónico para la excitación controlada del mismo. El transductor electroacústico consiste en un elemento de transducción, piezoeléctrico o magnetostrictivo que vibra

extensionalmente, que actúa como excitador de un radiador en forma de placa con un perfil discontinuo específicamente diseñado para maximizar la capacidad de potencia en la generación de campos acústicos focalizados, y/o reducir el peso del radiador de titanio. El generador electrónico introduce un dispositivo y procedimiento para el control y monitorización de la frecuencia de resonancia del transductor y para el mantenimiento constante de la potencia suministrada al mismo.

Sumario de la invención

Esta invención se refiere a un generador sónico y/o ultrasónico para emisión a través del aire con una capacidad de potencia y unas características de radiación determinadas que permiten obtener de forma segura y controlada los niveles acústicos necesarios (> 170 dB ref. $2,10^{-4}$ μ bar) para la rotura mecánica de las burbujas de alta consistencia que constituyen las espumas industriales según la reivindicación 1. A este fin, el dispositivo incorpora como radiador una placa vibrante de gran superficie (en comparación con la longitud de onda de vibración), construida en un material de alta resistencia mecánica y buenas características vibracionales (generalmente una aleación de titanio), cuyo espesor es variable de forma discontinua para distribuir las masas, homogeneizar las amplitudes de los desplazamientos vibratorios y, como consecuencia, aumentar la capacidad de potencia. El radiador es una placa de gran área con espesor no homogéneo que vibra en uno de sus modos flexionales. Además, el volumen de la placa radiante se minimiza para una frecuencia de resonancia definida. El perfil de la cara emisora de la placa se diseña para obtener campos focalizados desplazando relativamente las zonas internodales de modo que la distancia de estas zonas al foco haga que la radiación llegue en fase.

Asimismo, el generador incorpora un dispositivo electrónico digital para el control y monitorización precisos de la frecuencia de resonancia bajo las distintas condiciones de trabajo.

Descripción de las figuras

Figura 1: Esquema de un radiador de placa con perfil discontinuo en ambas caras para radiación direccional y focalizada, respectivamente (según la patente [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfases", patente española n.º 8903371, 1989]).

Figura 2: Distribución de las amplitudes de vibración en un radiador focalizado/direccional según la patente [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfases", patente española n.º 8903371, 1989].

Figura 3: Esquema de un radiador de placa para emisión focalizada con máxima capacidad de potencia (según la presente invención).

Figura 4: Distribución de las amplitudes de vibración en un radiador de potencia diseñado según los criterios de la presente invención.

Figura 5: Comparación de las curvas de capacidad de potencia para dos radiadores de placa diseñados: (a) según la patente [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfases", patente española n.º 8903371, 1989], (b) según la presente invención.

Figura 6: Esquema de un transductor macrosónico con radiador de placa según la presente invención:

1. Conexión con equipo electrónico.
2. Elemento de transducción: sándwich piezoeléctrico (o magnetostrictivo) más amplificador mecánico.
3. Cara de la placa radiante con distribución de espesores para obtener máxima capacidad de potencia de la placa.
4. Cara con perfil para obtener radiación focalizada.

Figura 7: Diagrama de bloques del sistema electrónico para generación según la presente invención.

Descripción de la invención

El objeto de la invención es un generador macrosónico para la emisión focalizada a través del aire de ondas sónicas o ultrasónicas de alta intensidad sobre un medio espumoso con el objetivo de romper las burbujas que forman este medio. Dicho generador consiste básicamente en un elemento de transducción piezoeléctrico (o magnetostrictivo) que acciona una placa vibrante de gran superficie (en comparación con la longitud de onda de vibración en el material) y espesor no homogéneo que vibra flexionalmente y actúa como radiador acústico. La invención incluye un sistema electrónico de excitación que incorpora un dispositivo digital para programar el ciclo de operación y el control y monitorización de la frecuencia de resonancia en condiciones de trabajo variables.

Para destruir una espuma se requiere una alta intensidad acústica: generalmente más de 170 dB. Producir este alto nivel a través del aire implica disponer de un generador acústico de alto rendimiento con alta capacidad de potencia que emita un campo acústico focalizado. Para la consecución de estos objetivos se precisan generadores de potencia a altas frecuencias sónicas o ultrasónicas con unas características muy específicas. La generación por vía aérea de altas intensidades sónicas y/o ultrasónicas presenta grandes dificultades debido a la baja impedancia acústica del medio y a su elevada absorción. La mayoría de los sistemas de generación que han tratado de aplicarse a problemas industriales han sido de tipo aerodinámico (silbato y sirenas) en los que la energía se suministra mediante un chorro de gas [P. Greguss, "The application of airborne and liquid borne sounds to industrial technology" *Ultrasonics* 2, 1964]. La potencia acústica conseguida con estos sistemas era en algunos casos relativamente elevada, sin embargo, los rendimientos alcanzados eran muy bajos. Por otra parte, presentaban dificultades para trabajar a frecuencias ultrasónicas y las señales acústicas emitidas solían contener armónicos y subarmónicos. Los sistemas aerodinámicos tienen además la desventaja de que, junto con la señal acústica, se propaga una gran parte del gas que produce la energía de excitación. Otros generadores ultrasónicos de tipo piezoeléctrico o magnetostrictivo que utilizan vibradores sólidos extensionales están limitados en su superficie de radiación ya que, para evitar modos transversales de vibración, no pueden tener una sección transversal de diámetro mayor a 1/3 de la longitud de onda. Esto hace además que su impedancia de radiación a través del aire (que es proporcional a la superficie radiante y a la densidad del medio) sea baja y, consecuentemente, también lo sea su rendimiento electroacústico, lo que significa que se han utilizado generalmente para radiación en agua [E. Neppiras, *The pre-stressed piezoelectric sandwich transducer*, *Ultrasonic International 1973 Conf. Proc.* pp. 295-302, J. A. Gallego-Juárez, "Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers", *J. Phys. E. Sci. Instrum.* Vol. 22, pp. 804-816, 1989]. Los intentos para aumentar la superficie de radiación han dado lugar a transductores con radiadores en forma de placa que vibra flexionalmente [K. Matsuzawa, "Ultrasonic transducers with flexurally vibrating diaphragms for use in air" I and II, *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 9 n.º 3 y 9, pp. 235-45 y 1167-71, 1970]. El problema es que estos sistemas presentan una concentración de energía muy escasa, debido a la cancelación de fase que se produce como consecuencia de las zonas que vibran en contrafase. Los generadores macrosónicos con radiadores de placa que presentan una solución mejor adaptada a la concentración de energía son los generadores de placa escalonada [patente española n.º 8903371, 1989]. En estos generadores, el elemento radiante es una placa que vibra a flexión, pero que, en lugar de ser plana, presenta un perfil discontinuo. El diseño del perfil se obtiene desplazando las zonas internodales para poner en fase la radiación. Así se han conseguido radiadores de placa con perfil discontinuo en sus dos caras de modo que por una cara generan campos coherentes y, por la otra, campos focalizados (figura 1).

Sin embargo, estos generadores, que son de propósito general, presentan ciertas dificultades para su utilización en la despumación industrial. En concreto tienen limitaciones en su capacidad de potencia y su estructura, con un perfil para campos direccionales, y carecen de utilidad específica para la despumación industrial. Además, el sistema de control de la frecuencia de resonancia empleado en estos generadores no dispone de la estabilidad necesaria para los tratamientos industriales. De hecho, el sistema reivindicado en la patente mencionada [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfaces", patente española n.º 8903371, 1989] se basa en osciladores de tipo analógico, que consisten en un amplificador de potencia realimentado a partir del propio transductor ultrasónico mediante un circuito puente sintonizado, un desfaseador, un limitador y un filtro; o bien mediante monitorización de la frecuencia de resonancia del emisor mediante un bucle bloqueado por fase (PLL). Estos sistemas presentan un comportamiento bastante crítico, sobre todo en los instantes iniciales de la emisión, en los que el dispositivo transductor está totalmente frío, requiriendo además la utilización de componentes de precisión y diversos puntos de ajuste, que han de ajustarse individualmente para cada emisor ultrasónico que se conecte. Otro problema es que, con la variación de las condiciones de trabajo del transductor, la potencia emitida puede variar apreciablemente, con la consiguiente pérdida de efectividad del sistema o sobrecarga del mismo. Estos problemas obligan a que el generador tenga que ajustarse cada vez que se pone en marcha, por un operador humano especializado y, además, requiere monitorización permanentemente por si disminuye la potencia de emisión.

Por todo ello, estos generadores resultan claramente insuficientes para su aplicación a la despumación en condiciones industriales. Se requiere ampliar la capacidad de potencia del transductor, se requiere simplificar su estructura y se requiere introducir una electrónica más estable y precisa.

El problema de la limitación en la capacidad de potencia proviene de que la distribución de amplitudes de vibración en las zonas internodales no es homogénea, sino que existen máximos y mínimos de amplitud y la diferencia entre ellos es considerable (figura 2). Esto es un factor limitativo determinante ya que, para una superficie radiante dada, la capacidad de potencia está determinada por las máximas tensiones que puedan alcanzarse sin que la placa vibrante llegue a su límite de fatiga. En el caso de una distribución poco homogénea de las amplitudes de vibración, el desplazamiento límite podría alcanzarse en un punto de máxima amplitud, para potencias aplicadas relativamente bajas. Para placas realizadas de aleaciones de titanio, que es un material de alta resistencia a la fatiga, el límite de tensión máxima está fijado en aproximadamente 200 MPa. Esto significa que, con la distribución de desplazamientos de la figura 3, el máximo desplazamiento sería de 48,6 micrones. Puede mejorarse esta distribución de desplazamientos, y por tanto ampliar la capacidad de potencia de estos radiadores, mediante una redistribución de las masas de la placa. Así, se ha diseñado un nuevo tipo de radiador que, además de incorporar en su cara radiante el perfil requerido para la generación de un campo acústico focalizado, necesario para la despumación, presenta en su cara no radiante un perfil que viene determinado por la redistribución de las amplitudes de vibración. La

configuración de este perfil se lleva a cabo con los siguientes objetivos: aumentar las amplitudes de los desplazamientos de la zona internodal periférica, que suponen la mayor parte de la superficie de radiación y, al mismo tiempo, disminuir los desplazamientos de las zonas internodales centrales. Para conseguir esto se modifica el perfil de la cara no radiante según el siguiente criterio: el espesor de los escalones situados en las zonas internodales periféricas se adelgaza mientras que el de las zonas centrales se mantiene o se modifica ligeramente. Estas modificaciones se llevan a cabo mediante la utilización de una modelización por elementos finitos para asegurar que la máxima tensión mecánica se mantenga siempre dentro de las zonas periféricas.

Con una placa realizada según estos criterios (figura 3) se consigue una distribución de las amplitudes de vibración que, como se aprecia en la figura 4, aumenta las amplitudes en las zonas internodales periféricas, lo que, teniendo en cuenta que la potencia es función del cuadrado de la amplitud, supone un notable incremento en la capacidad de potencia. De hecho, el radiador de la figura 3 diseñado con estos nuevos criterios para la misma frecuencia (21 kHz) que el radiador de la figura 1 (diseñado según [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfases", patente española n.º 8903371, 1989]) presenta una capacidad de potencia de casi 600 W (en comparación con los 490 W del modelo anterior) (figura 5). Esta mejora se consigue además con una superficie radiante un 23 % menor ya que, para mantener la frecuencia y el modo de vibración, se ha disminuido el diámetro. Teniendo en cuenta que la capacidad de potencia es proporcional a la superficie de radiación, si comparásemos dos placas de la misma superficie, diseñadas según [J. A. Gallego-Juárez *et al.* "Equipo electroacústico para la generación de altas intensidades sónicas y ultrasónicas en gases e interfases", patente española n.º 8903371, 1989] y según la presente invención, el aumento de la capacidad de potencia de la segunda sobre la primera sería del orden de un 50 %, para una misma superficie. Así pues, con la presente invención, se logra no solo un aumento de capacidad de potencia del radiador sino también una disminución en su volumen (lo que supone un menor coste de material de titanio generalmente empleado) y una simplificación en sus perfiles, lo que facilita su mecanización. La figura 6 muestra un esquema del transductor macrosónico con el radiador según la presente invención.

Por lo que se refiere al sistema electrónico de generación que forma el objeto de la presente patente (figura 7), introduce un nuevo procedimiento para la monitorización de la frecuencia de resonancia del emisor y para el mantenimiento constante de la potencia que no precisa la asistencia de un operador humano. El procedimiento se basa en la inclusión de un microcontrolador en el bucle de control del transductor que mantiene en todo momento, de forma automática, las condiciones óptimas de emisión.

Este método presenta una serie de ventajas sobre los comentados anteriormente:

- a) No es preciso ajustar los parámetros del generador manualmente cada vez que se enciende, pudiendo ponerse en marcha por cualquier persona sin especialización.
- b) El funcionamiento del sistema en el punto de resonancia resulta muy estable, adaptándose fielmente a los cambios de frecuencia de resonancia e impedancia eléctrica provocados por variaciones de las características del medio en el que está radiando el emisor, y los derivados del envejecimiento del sistema, sin requerirse ninguna monitorización durante el tiempo de operación.
- c) No es preciso realizar ningún ajuste cada vez que se cambia el transductor, pues el generador se adapta automáticamente a las características de cada transductor individual.
- d) La realización del dispositivo electrónico no necesita la utilización de componentes de alta precisión.
- e) Aumenta la fiabilidad y longevidad del sistema completo, al disponer de una mayor protección y un mejor control.
- f) Dispone de capacidad de supervisión y telemetría a distancia, que permite rutinas automatizadas de mantenimiento.
- g) Se adapta a entornos industriales con duras condiciones ambientales.

Tal como se expone en el diagrama de bloques de la figura 7, el sistema de generador consiste en las siguientes etapas fundamentales:

- 1) Una reactancia de compensación L1 de la capacitancia parásita del transductor.
- 2) Un transformador T1 de adaptación de impedancias, que reduce la impedancia del transductor a la de la impedancia característica de la línea de transmisión descrita en el siguiente párrafo.
- 3) Una línea de transmisión común C1, para conectar el conjunto de transductor, transformador T1 y reactancia L1 con el conjunto de amplificador y sistema de control.
- 4) Un transformador de impedancias T2 que adapta la impedancia característica de la línea de transmisión C1 a la impedancia de salida del amplificador de potencia descrito en el siguiente párrafo.

5) Un amplificador de potencia A1, adecuado para suministrar la potencia necesaria al transductor.

6) Un canal para la toma de una muestra de la señal de corriente en el secundario del transformador T2.

7) Un canal para la toma de una muestra del voltaje aplicado a la línea de transmisión C1.

8) El conjunto de procesadores analógicos de señal PGA1, PGA2, PGA3, E1, E2, DC1, DC2, MU1, MU2, amplifican con diferentes valores de ganancia (PGA1, PGA2, PGA3) las señales eléctricas, en diferentes tramos del proceso para extraer de las muestras de voltaje y corriente su característica de valor eficaz (E1, E2), cruces por cero de la señal (DC1, DC2), u obtener resultados de la multiplicación (MU1, MU2, MU3) de las mismas.

9) Un circuito PLL (bucle bloqueado por fase, del inglés *Phase Locked Loop*) para la generación de la señal excitadora del amplificador de potencia, con una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del transductor.

10) La unidad de voltaje programable, UV1 y el sumador analógico SM1, para la corrección de frecuencia y fase.

11) El conversor analógico/digital AD1, multiplexor M1.

12) Un procesador P1, para realizar operaciones de medición de las condiciones de trabajo, control de estabilidad de fase, potencia y banda de frecuencias de trabajo, supervisión del sistema completo electroacústico, monitorización de variables y parámetros, así como de comunicación con ordenadores o dispositivos remotos.

13) Una interfaz de comunicaciones I1, para conectar el microprocesador M1 a un ordenador remoto.

A continuación se describe individualmente el funcionamiento de cada una de estas etapas, así como su interrelación:

1) La reactancia de compensación L1 resuena a la frecuencia de trabajo del transductor con la capacitancia eléctrica parásita del transductor, compensando la diferencia de fase perjudicial que esta podría introducir.

2) El transformador T1 es de banda mucho más ancha que el margen de frecuencia de resonancia en que se mueve el transductor, introduciendo una diferencia de fase despreciable. La relación de transformación es tal que la impedancia que presenta el primario está adaptada a la impedancia característica de la línea de transmisión, cuando está cargado con el transductor frío.

3) La línea de transmisión común C1 es apantallada para evitar la emisión de interferencias, y puede ser del tipo coaxial, o bien del tipo bifilar con pantalla, y su impedancia característica puede variar entre 50Ω y 300Ω . Dependiendo de la aplicación, puede ser necesario que el transductor y el equipo principal estén muy separados entre sí, y por tanto la línea de transmisión puede ser muy larga, lo que significa que es necesario que las impedancias terminales se adapten en sus extremos.

4) El transformador de impedancias T2 tiene una banda mucho más ancha que el margen de frecuencia de resonancia en que se mueve el transductor, introduciendo una diferencia de fase despreciable. La relación de transformación es tal que la impedancia que presenta el secundario está adaptada a la impedancia característica de la línea de transmisión, cuando está excitado por el amplificador de potencia.

5) El amplificador de potencia A1 es capaz de entregar una potencia apropiada a cada aplicación a la frecuencia de trabajo del transductor. Su diseño es común y puede adquirirse en el mercado. Ha de ser capaz de funcionar ininterrumpidamente a la máxima potencia nominal.

6) El canal para la toma de una muestra de la señal de corriente en la carga está formado por la resistencia R1 que está en serie con la carga del amplificador y que es de valor muy inferior a la impedancia característica de la línea C1, de manera que no modifica apreciablemente la impedancia de carga, y el voltaje que aparece en sus bornes es proporcional a la intensidad de corriente en la línea. La señal obtenida sirve tanto para controlar la frecuencia como para controlar la potencia.

7) El canal para la toma de una muestra del voltaje aplicado a la línea de transmisión C1 consiste en un divisor de voltaje que toma una pequeña fracción de ese voltaje, construido con las resistencias R2 y R3. La señal obtenida sirve tanto para controlar la frecuencia como para controlar la potencia.

8) Conjunto de procesadores de señal PGA1, PGA2, PGA3, amplificadores programables, controlables desde el procesador, PGA1 amplifica la muestra de voltaje, PGA2 la muestra de corriente, PGA3 la señal de excitación al amplificador PA. Mediante la modificación de la ganancia, controlable digitalmente, suministran el nivel dinámico adecuado para minimizar errores en el proceso. E1, E2, obtienen el valor eficaz de la señal eléctrica asociada a la muestra de voltaje (E1) y la muestra de corriente (E2), lo cual posibilita extraer parámetros ulteriores como el módulo de la impedancia, o no sobrepasar la máxima corriente admitida por el transductor. DC1, DC2 son los extractores de

cruces por cero de las muestras de voltaje y corriente, respectivamente, básicamente recortan la señal de entrada, justo a su paso por el valor cero, de manera que su salida únicamente presenta dos estados, "0" y "1", dependiendo de si esta señal está por encima o por debajo de este valor, esto proporciona un valor de disparo a partir del cual puede medirse una fase de referencia, y con ello la diferencia de fase entre voltaje y corriente, lo cual es útil, como medida y como señal de error, para el bucle de realimentación de regulación de fase mediante el circuito PLL. MU1, MU2, MU3 son circuitos multiplicadores. El funcionamiento de MU1 se describe en el párrafo del PLL. MU2 se utiliza como comparador de fase, tras integrar su salida, mediante R7 y C3, obtenemos la diferencia de fase entre voltaje y corriente. MU3 se encarga de obtener la potencia eléctrica, a partir de las muestras de voltaje y corriente mencionadas anteriormente como producto de ellas, integración a través de R5 y C2 y escalado posterior. Es interesante hacer constar que la utilización de PGA1 y PGA2 delante de MU3 tiene por objeto aumentar el rango dinámico y la resolución del conversor AD1 que incrementa notablemente su rendimiento, tanto como (bits de resolución PGA1) x (bits de resolución PGA2), lo cual permite realizar, a bajo costo, sistemas de medición de potencia de precisión.

9) El circuito PLL (*Phase Locked Loop*) es de tipo común. Consiste en un VCO (oscilador controlado por voltaje, del inglés *voltage controlled oscillator*), un multiplicador de cuatro cuadrantes que actúa como comparador de fase M1 y un filtro de paso bajo formado por la resistencia R6 y el condensador C3. El VCO tiene dos salidas, una en forma de onda cuadrada para enviarse al comparador de fase y otra de forma de onda sinusoidal para enviarse al amplificador, ambas salidas están fuera de fase mediante $\pi/2$ radianes. La otra entrada para el comparador de fase es la señal de muestra de corriente de salida. El comparador de fase es un multiplicador de cuatro cuadrantes, de forma que el PLL se acopla en la frecuencia a la que la diferencia de fase entre las dos entradas sea $\pi/2$, y cuando la diferencia de fase entre las dos salidas del VCO sea también $\pi/2$, el resultado es que se mantendrá en la frecuencia a la que la fase en el voltaje y la corriente a la salida del amplificador de potencia es 0. La frecuencia central de trabajo del VCO se regula mediante la resistencia R4 y el condensador C1. La salida del VCO muestra una forma de onda compatible con el transductor, normalmente sinusoidal, cuya amplitud viene controlada digitalmente por PGA3.

10) Puesto que la respuesta del transductor presenta diferentes resonancias hemos de situar la zona de trabajo en uno de los modos de resonancia donde el transductor muestre el máximo rendimiento. La unidad de voltaje programable, UV1, produce un voltaje eléctrico, recibe instrucciones desde el procesador. El sumador SM1 añade este voltaje al error de lectura de fase del bucle de control primario del PLL, de manera que podemos alterar la fase y frecuencia del VCO, puesto que, como se comentó anteriormente, conocemos aquella y la frecuencia, obtenida mediante un procedimiento de recuento de pulsos durante un período de tiempo conocido, mediante la entrada DF. Esto permite establecer un bucle de control y desplazar el margen de captura del PLL en la zona de frecuencias que deseemos, y por lo tanto, proceder a monitorizar la fase en la banda de frecuencias de resonancia que deseemos.

11) El conversor AD1, junto al multiplexor M1 de cuatro entradas: VV, V1, VW, VF, para la conversión numérica del valor de voltaje eficaz, corriente eficaz, potencia y fase, respectivamente, de manera que estas puedan adquirirse por el procesador, a fin de que alimenten la variable de entrada en los diferentes algoritmos. La resolución en bits de AD1 se magnifica por el empleo de PGA1 y PGA2, amplificadores controlados digitalmente, que, tal y como se comentó anteriormente, amplían notablemente su dinámica.

12) El procesador P1 es de tipo general y puede ser un microcontrolador, o un microprocesador, o un procesador de señales, o una FPGA o cualquier otro capaz de realizar operaciones en tiempo real a gran velocidad. Cumple las siguientes funciones:

a) Medición y cálculo de parámetros fundamentales del transductor:

- Medición de la magnitud del voltaje aplicado a la línea L1.
- Medición de la magnitud de la corriente en la línea L1 y cálculo de su fase en comparación con el voltaje.
- Medición de la potencia instantánea entregada al transductor.
- Cálculo de la impedancia del transductor en módulo y fase que se inicia a partir de las mediciones de voltaje y corriente anteriores.

b) Mantenimiento de bucles de control y estabilidad de: fase, margen de frecuencia, y potencia.

c) Supervisión, vigilancia y monitorización del sistema: estado del amplificador PA, estado del transductor, márgenes de: excitación, impedancia de corriente, modos de resonancia en frecuencias perjudiciales para el transductor. Algoritmos para solucionar los diferentes eventos, estrategias para evitar fallos catastróficos.

d) Puesta en marcha desde frío, arranque suave.

e) Algoritmos de búsqueda de resonancia, que caracterizan el transductor en uso, haciendo un barrido en un margen de frecuencia adecuado y gradual, que cubra todas las posibles frecuencias de trabajo de los transductores usuales, registrando la impedancia del transductor en módulo y fase. A partir de esta medición se determina la frecuencia de

trabajo óptima del transductor en base a un conjunto de parámetros como: márgenes de frecuencia donde han de encontrarse las resonancias, rango de impedancias permisibles, rango de fase óptima y de búsqueda, nivel de excitación durante la búsqueda y estrategias de búsqueda en función del desplazamiento de frecuencia respecto a la búsqueda de frecuencia de resonancia previsible: gruesa, media y fina.

- 5 f) Manejo de menús de visualización de datos, introducción y memorizado de parámetros desde el teclado.
- g) El manejo de procedimiento de comunicaciones con el exterior (Pc y otros dispositivos) permite la monitorización exterior de datos, parámetros y estado interno y el envío de instrucciones que modifican las condiciones de funcionamiento del transductor como: potencia de trabajo, frecuencia de trabajo, nivel de excitación en voltios.
- 10 13) La interfaz de comunicaciones I1 es del tipo estándar para comunicar ordenadores entre sí. Puede ser de bucle de corriente, o bien de voltaje tal como la RS232 o la RS485 o cualquier otra interfaz de comunicación entre ordenadores adecuada para transmitir a la distancia existente entre el equipo electrónico y el ordenador remoto que lo controle.
- 15 El perfil de la cara no emisora de la placa radiante se diseña adelgazando el espesor de las zonas internodales periféricas y manteniendo y/o modificando ligeramente el espesor de las zonas internodales centrales de modo que la distribución de los desplazamientos máximos se homogeniza maximizándose en las zonas periféricas y moderándose en las zonas centrales.
- 20 La placa radiante, para una frecuencia y modo de vibración definidos, posee la máxima capacidad de potencia con mínimo volumen.
- 25 El dispositivo de generador electrónico:
- a. produce en cada instante una señal cuya frecuencia es igual a la óptima del sistema de transducción, corrigiendo automáticamente el valor de dicha frecuencia para adaptarlo al deslizamiento que puede producirse en la frecuencia de resonancia del emisor,
- 30 b. produce en cada instante una señal cuya potencia es constante e igual a la potencia de consigna prefijada en el momento de su configuración, corrigiendo automáticamente un valor de excitación de voltaje del transductor para adaptarlo a la variación de las condiciones de trabajo del mismo,
- 35 c. funciona automáticamente de forma autónoma sin necesidad de la intervención de un operador especializado,
- d. funciona de forma óptima con cualquier transductor conectado al mismo, independientemente de sus características concretas de frecuencia de resonancia, ancho de banda y resistencia eléctrica, sin ser necesario ajustar los parámetros del sistema,
- 40 e. recuerda las características del último transductor que se conectó al mismo y detecta automáticamente si el transductor conectado actualmente tiene las mismas características que el anterior, procediendo en caso contrario a la caracterización completa del nuevo transductor,
- 45 f. una vez realizada la caracterización completa de un nuevo transductor, inicia automáticamente su excitación a la frecuencia óptima del nuevo transductor y a la potencia prefijada,
- g. en el caso de una variación drástica en las condiciones del entorno de trabajo del transductor que hagan cambiar totalmente sus características, procede de forma automática a la caracterización completa del transductor como si se tratase de un nuevo transductor,
- 50 h. puede supervisarse, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto, para registrar tanto los parámetros del transductor como las condiciones de trabajo,
- 55 i. puede recibir instrucciones, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto, para variar la potencia, excitación eléctrica y frecuencia de trabajo del transductor, o para pararlo, o ponerlo en marcha, o incluso para iniciar una operación de caracterización completa del transductor al que se encuentre conectado, así como los diferentes parámetros de funcionamiento y seguridad,
- 60 j. puede supervisarse o recibir instrucciones, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto, utilizando una línea de datos compartida con otros equipos idénticos que a su vez pueden supervisarse o recibir instrucciones,
- 65 k. incluye un circuito PLL (*Phase locked loop*) integrado por un oscilador controlado por voltaje, un multiplicador de cuatro cuadrantes que actúa como comparador de fase y un filtro de paso bajo, con tres bucles de control, implementados mediante un procesador, uno para controlar la potencia de salida, otro para controlar la banda de

frecuencia de trabajo y otro para controlar la fase entre corriente y voltaje de salida,

- 5 l. supervisa y monitoriza el sistema combinado *Generador electrónico de excitación - Transductor ultrasónico* según un conjunto de parámetros tales como: rango de impedancia de trabajo, rango de frecuencia de trabajo, diferencia de fase máxima admisible, diferencia de fase mínima obtenible, máxima corriente, máxima excitación, modo de excitación o potencia constante, nivel de excitación durante la caracterización, estado del voltaje de suministro, adoptando diferentes estrategias para obtener el máximo rendimiento energético,
- 10 m. protege el sistema en su conjunto, evitando el funcionamiento en condiciones extremas o excesivamente desfavorables para el transductor, que aun pudiendo funcionar puntualmente en ellas, puede ver comprometida su longevidad, afectando, por tanto, a la fiabilidad conjunta.

REIVINDICACIONES

1. Generador macrosónico por vía aérea para la rotura mecánica de burbujas de alta consistencia que constituyen espumas industriales, en el que este consiste en

5 un transductor electroacústico de potencia y un dispositivo de generador electrónico para la excitación controlada del mismo, para el control y monitorización de la frecuencia de resonancia del transductor, para el mantenimiento constante de la potencia suministrada al transductor y

10 un radiador de titanio en forma de placa con una cara emisora y una cara no emisora, que tiene cada una un perfil discontinuo,

en el que el transductor electroacústico de potencia consiste en

15 un elemento de transducción piezoeléctrico o magnetostrictivo que vibra extensionalmente, que está configurado para actuar como excitador del radiador en forma de placa con un perfil discontinuo específicamente diseñado para maximizar la capacidad de potencia en la generación de campos acústicos focalizados y reducir el peso del radiador de titanio,

20 en el que

el radiador es una placa de gran área con espesor no homogéneo que vibra en uno de sus modos flexionales,

25 el perfil de la cara emisora de la placa radiante se diseña para obtener campos focalizados desplazando relativamente las zonas internodales de la placa de modo que la radiación llega en fase,

el perfil de la cara no emisora de la placa radiante se diseña adelgazando un espesor de las zonas internodales periféricas de la placa y manteniendo y/o modificando ligeramente un espesor de las zonas internodales centrales de la placa de modo que la distribución de los desplazamientos máximos se homogeniza, maximizándose en las zonas periféricas de la placa y moderándose en las zonas centrales de la placa,

30 el dispositivo de generador electrónico incluye un circuito PLL (*Phase locked loop*) que consiste en un oscilador controlado por voltaje, un multiplicador de cuatro cuadrantes que actúa como un comparador de fase y un filtro de paso bajo, con tres bucles de control, implementados mediante un procesador, un primer bucle para controlar la potencia de salida, un segundo bucle para controlar la banda de frecuencia de trabajo y un tercer bucle para controlar la fase entre corriente y voltaje de salida.
2. Generador macrosónico por vía aérea según la reivindicación 1, en el que la placa, para una frecuencia y modo de vibración definidos, está configurada para poseer una máxima capacidad de potencia con mínimo volumen.
3. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1 y 2, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para producir en cada instante una señal cuya frecuencia es igual a una óptima del sistema de transducción, corrigiendo automáticamente el valor de la frecuencia de la señal para adaptarlo a un deslizamiento que puede producirse en la frecuencia de resonancia del emisor.
4. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2 y 3, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para producir en cada instante una señal cuya potencia es constante e igual a una potencia de consigna prefijada en el momento de su configuración, corrigiendo automáticamente un valor de excitación de voltaje del transductor para adaptarlo a la variación de las condiciones de trabajo del mismo.
5. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3 y 4, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para funcionar automáticamente de forma autónoma sin necesidad de la intervención de un operador especializado.
6. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4 y 5, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para funcionar de forma óptima con cualquier transductor conectado al mismo, independientemente de sus características concretas de frecuencia de resonancia, ancho de banda y resistencia eléctrica, sin ser necesario ajustar los parámetros fundamentales del transductor.
7. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4 y 5, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para recordar los parámetros fundamentales del último transductor que se conectó al mismo y detecta automáticamente si el transductor conectado actualmente tiene los mismos parámetros fundamentales que el anterior, procediendo en caso contrario a un ajuste completo de los

parámetros fundamentales del nuevo transductor.

- 5 8. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, en el que, una vez realizado el ajuste completo de los parámetros fundamentales de un nuevo transductor, el dispositivo de generador electrónico está configurado automáticamente para iniciar su excitación a la frecuencia óptima del nuevo transductor y a una potencia prefijada.
- 10 9. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, en el que el dispositivo de generador electrónico, en el caso de una variación drástica en las condiciones del entorno de trabajo del transductor que hagan cambiar totalmente sus parámetros fundamentales, está configurado para proceder automáticamente al ajuste completo de los parámetros fundamentales del transductor como si se tratase de un nuevo transductor.
- 15 10. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para supervisarse, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto, tanto para registrar los parámetros fundamentales del transductor como las condiciones de trabajo del transductor.
- 20 11. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para recibir instrucciones, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto para variar la potencia, excitación eléctrica y frecuencia de trabajo del transductor, o para pararlo, o ponerlo en marcha, o incluso para iniciar un ajuste completo de los parámetros fundamentales del transductor al que está conectado, junto con los diferentes parámetros de funcionamiento y seguridad.
- 25 12. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para supervisarse y recibir instrucciones, a través de una interfaz de comunicaciones, por un ordenador remoto, usando una línea de datos compartida con otros equipos idénticos que a su vez pueden supervisarse o recibir instrucciones.
- 30 13. Generador macrosónico por vía aérea según las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, en el que el dispositivo de generador electrónico está configurado para supervisar y monitorizar el transductor electroacústico de potencia, según un conjunto de parámetros tales como: rango de impedancia de trabajo, rango de frecuencia de trabajo, diferencia de fase máxima admisible, diferencia de fase mínima obtenible, máxima corriente, máxima excitación, modo de excitación o potencia constante, nivel de excitación durante el ajuste de los parámetros fundamentales, estado del voltaje de suministro.
- 35

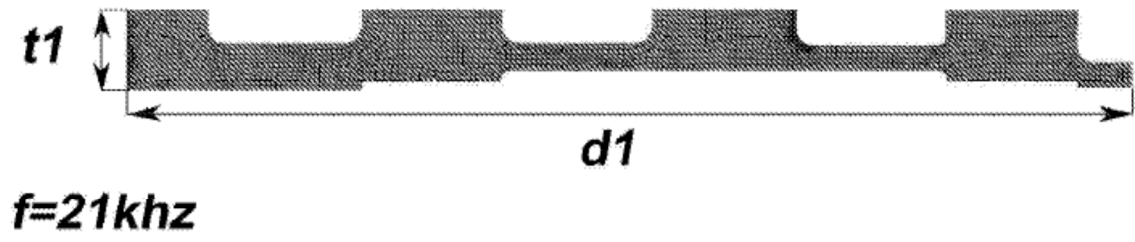


Figura 1

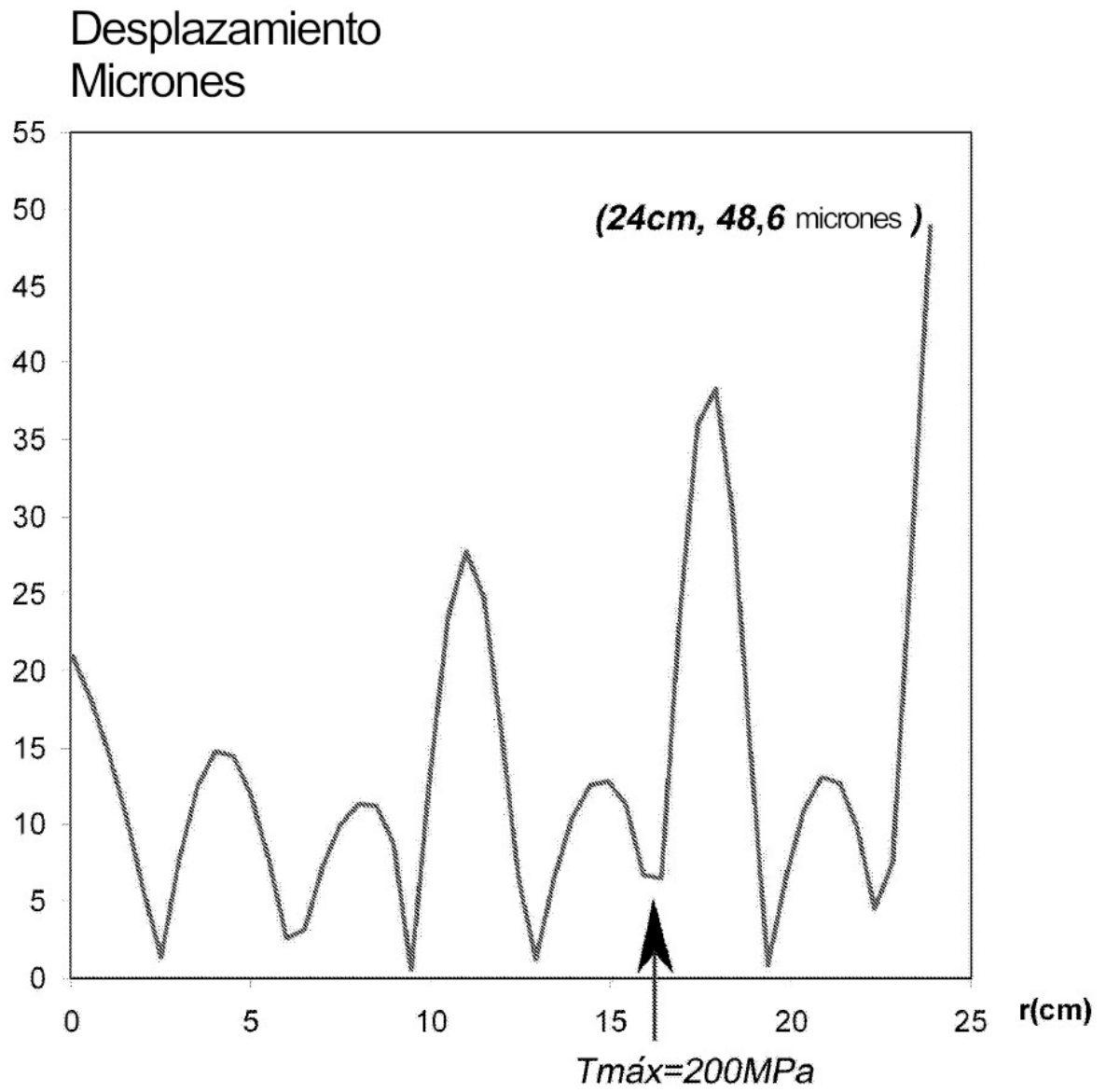
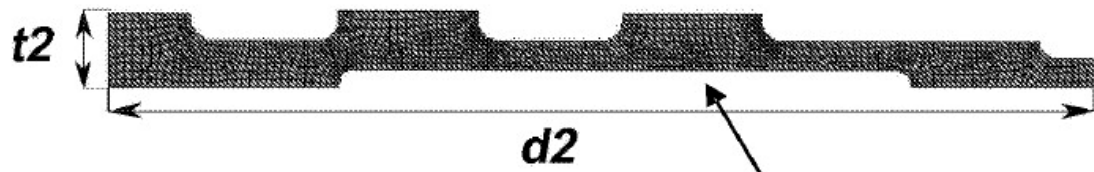


Figura 2



Cara radiante

$$f2=21\text{khz}$$
$$t2=0,78t1$$
$$d2=0,88d1$$

Figura 3

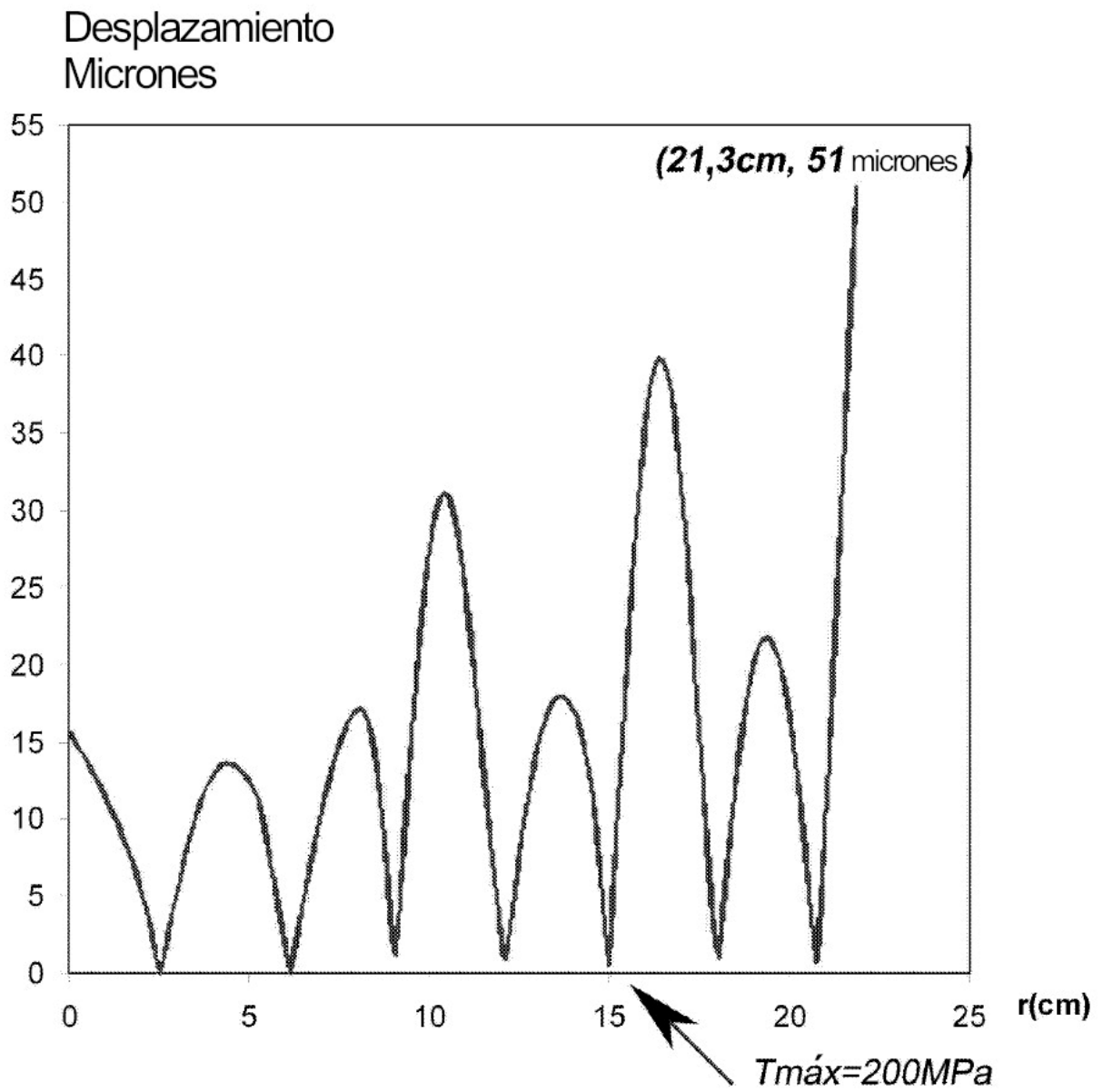


Figura 4

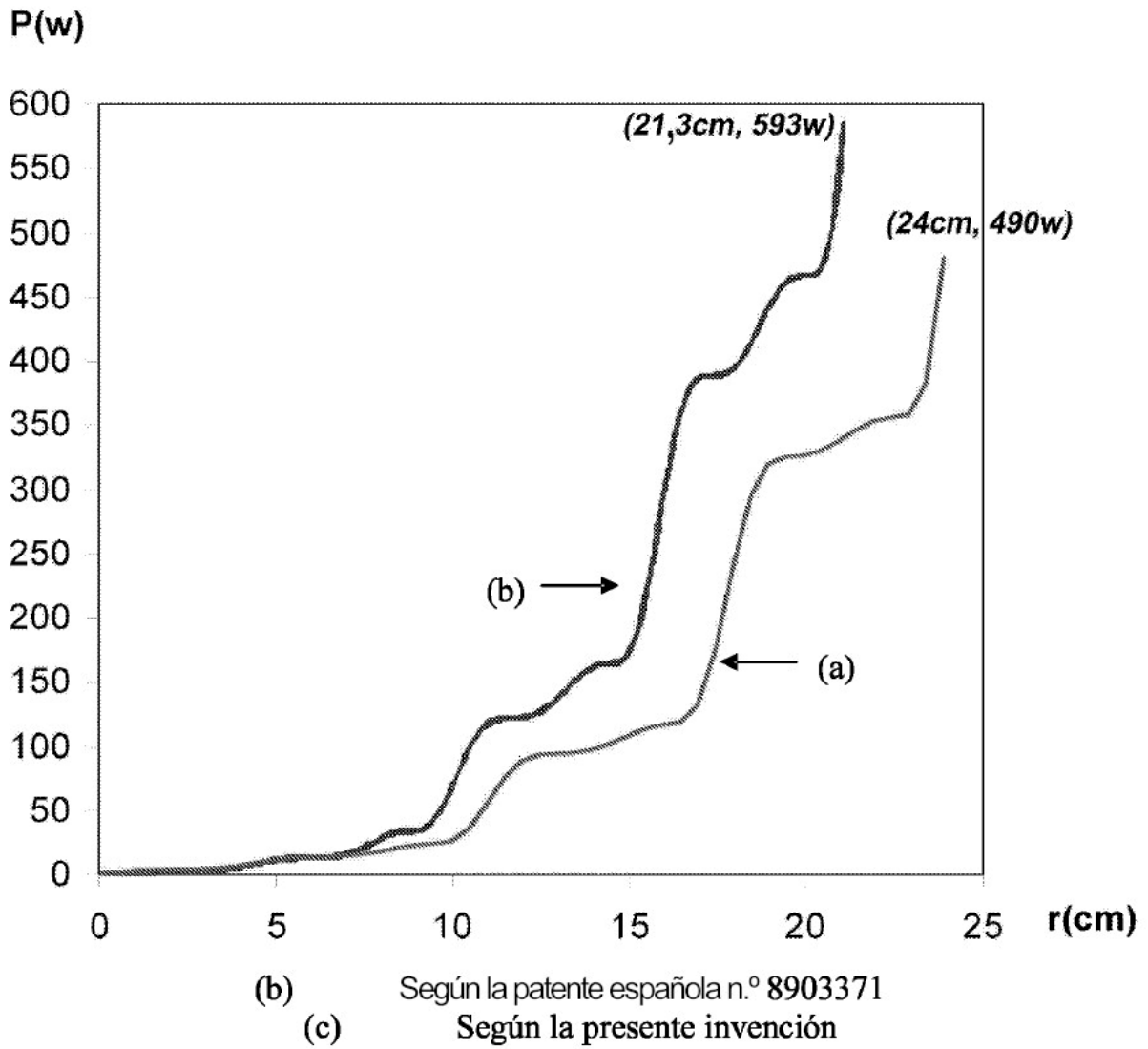


Figura 5

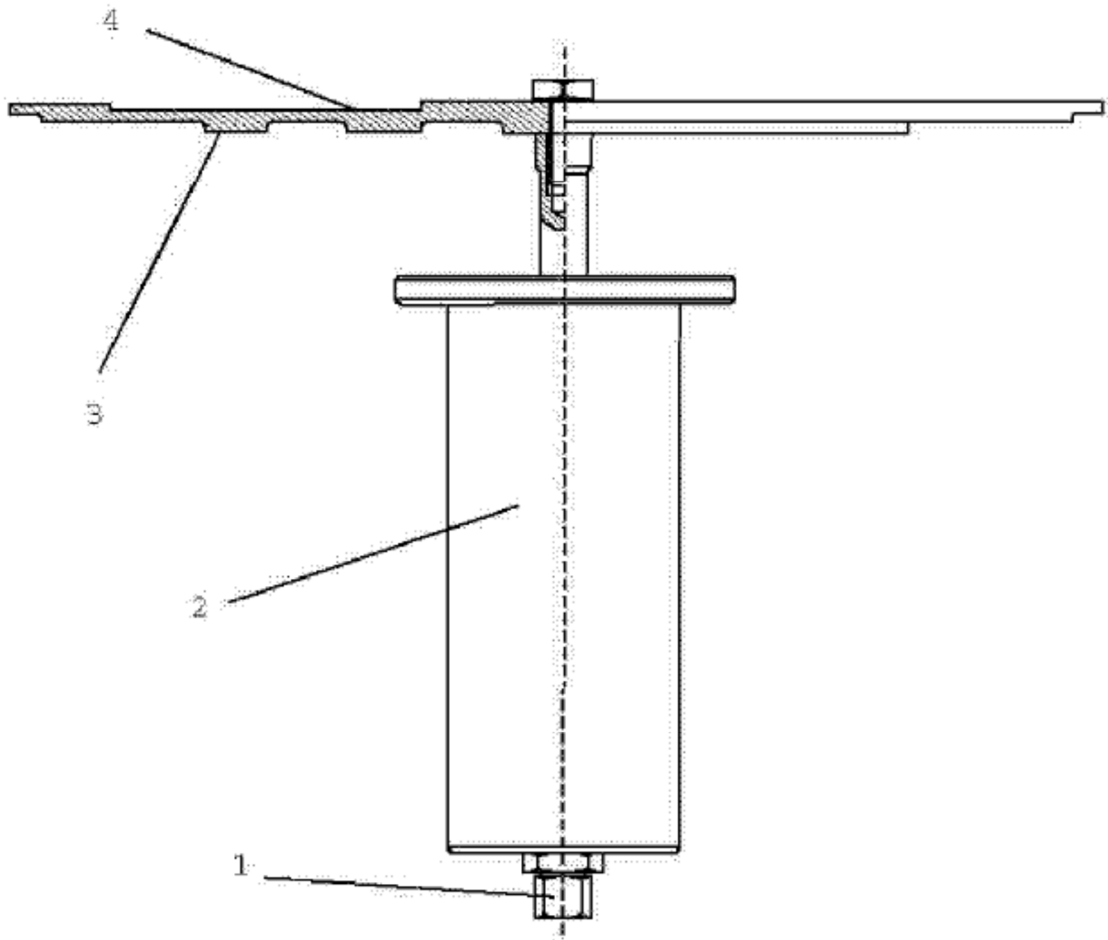


Figura 6

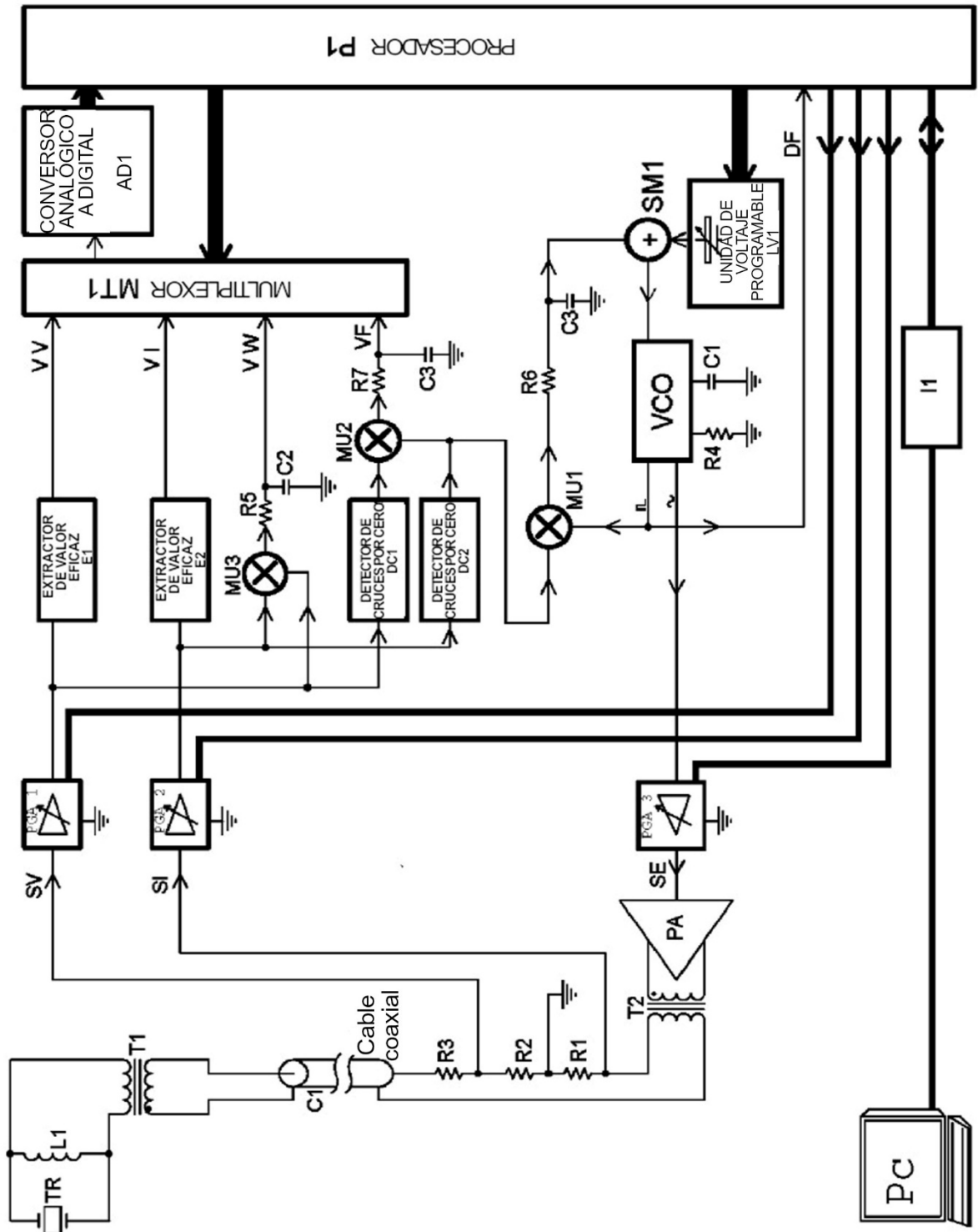


Figura 7