

**PROPULSOR PIEZOELÉCTRICO Y METODO DE GENERACIÓN DE UN
EMPUJE CON DICHO PROPULSOR PIEZOELÉCTRICO**

DESCRIPCIÓN

5

OBJETO DE LA INVENCION

Es objeto de la presente invención, tal y como el título de la invención establece un propulsor piezoeléctrico. Un material piezoeléctrico puede convertir una
10 tensión mecánica en corriente eléctrica y viceversa: cuando su estructura se deforma mecánicamente, se produce una tensión eléctrica (efecto piezoeléctrico directo); del mismo modo, cuando se aplica una tensión eléctrica externa, su estructura se deforma (efecto piezoeléctrico inverso). La magnitud de la deformación y la intensidad de la tensión son linealmente proporcionales para la
15 mayoría de los materiales piezoeléctricos.

También es objeto de la presente invención un método para la generación de empuje con el propulsor piezoeléctrico objeto de la invención.

20 Caracteriza a la presente invención el especial diseño y configuración de todas y cada una de las piezas que conforman el propulsor piezoeléctrico, así como las etapas del método de generación de un empuje con un material piezoeléctrico.

25 La presente invención aprovecha el efecto piezoeléctrico inverso en ciertos materiales piezoeléctricos para transformar una señal eléctrica alterna con un perfil específico en movimiento dirigido.

Por lo tanto, la presente invención se circunscribe dentro del ámbito de los
30 materiales piezoeléctricos y de manera más precisa de entre aquellos empleados en aplicaciones espaciales para maniobrar y controlar la actitud de

satélites en órbita terrestre, o un empuje lineal pequeño pero continuo para sondas en el espacio profundo.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

5

En el estado de la técnica se conoce la patente US2023208321A1 que divulga un método para producir aceleraciones sin expulsar ningún material de escape que se basa en inducir fluctuaciones de masa en componentes de circuitos eléctricos convencionales y combinarlas con un empuje periódico acoplado mecánicamente para producir fuerzas propulsivas sin la expulsión de ningún propelente. Los transductores de fuerza ferroeléctricos, en particular, los transductores piezoeléctricos, son accionados por al menos dos formas de onda de tensión de fase bloqueada, de modo que tanto la fluctuación de masa en reposo como la excursión mecánica necesaria para producir un empuje estacionario se producen en el propio transductor. La amplificación paramétrica se utiliza para obtener tensiones de gran amplitud, correctamente sincronizadas y de frecuencias correctas para activar el transductor mediante la simple adición de una tensión continua a la tensión alterna de una señal de conducción de frecuencia única. Las formas de onda de la tensión de control pueden ser pulsadas para maximizar el empuje y reducir el ciclo de trabajo de los componentes activos del sistema.

10
15
20

Sin embargo, dicha realización presenta aspectos que son susceptibles de ser mejorados y que actuando de forma sinérgica producen como resultado una mayor y más efectiva propulsión controlada. Por ejemplo, la reducción de la velocidad de calentamiento y la activación de los efectos de convección térmica vibracional que generan el empuje.

25

Por lo tanto, es objeto de la presente invención desarrollar un propulsor piezoeléctrico que presente una energía perdida por efectos térmicos muy reducida, donde la potencia entregada al material piezoeléctrico sea máxima, y los materiales piezoeléctricos cuenten con una gran excursión mecánica.

30

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

El objeto de la presente invención queda recogido en su esencialidad en la reivindicación independiente y las diferentes realizaciones están recogidas en las reivindicaciones dependientes.

La presente invención tiene por objeto un propulsor piezoeléctrico que comprende:

a. Un conjunto de elementos piezoeléctricos idénticos,

- 10 i. En el que cada elemento piezoeléctrico es una pila de discos piezoeléctricos polarizados en disposición alternada con respecto a unos electrodos conductores;
- ii. En el que el material de los discos piezoeléctricos polarizados delgados tiene un factor de calidad Q superior a 1800 y una constante piezoeléctrica d_{33} superior a $270 \cdot 10^{-12}$ m/V, condiciones combinadas que conducen a una gran excursión mecánica de los elementos piezoeléctricos y a una cantidad insignificante de energía perdida por efectos térmicos durante tales excursiones;
- 15 iii. en el que cada lado de cada disco piezoeléctrico polarizado delgado de la pila está cubierto por un electrodo conductor;
- 20 iv. en el que los discos piezoeléctricos polarizados y los electrodos conductores están unidos con una capa de resina epoxídica conductora de electricidad;
- v. en el que cada disco piezoeléctrico polarizado de la pila está orientado de modo que el lado con polaridad positiva esté orientado hacia el lado con polaridad positiva de los discos piezoeléctricos polarizados delgados vecinos, y los discos piezoeléctricos polarizados extremos de la pila tengan el lado con polaridad positiva orientado hacia el centro de la pila;
- 25 vi. en el que los electrodos conductores presentan pestañas salientes para facilitar las conexiones eléctricas;
- 30 vii. en el que las pestañas de los electrodos en contacto con la polaridad positiva de los discos piezoeléctricos polarizados están alineadas entre sí,

- en el lado diametralmente opuesto de la pila en relación con las pestañas de los electrodos en contacto con la polaridad negativa de los discos piezoeléctricos polarizados;
- b. dos piezas metálicas desiguales, una pieza menor y una pieza mayor en
- 5 disposición paralela y colocadas en los extremos de las pilas
- i. en las que un conjunto de tornillos permite comprimir el conjunto de los elementos piezoeléctricos, a lo largo de su eje de simetría, entre las dos piezas desiguales y;
- ii. en las que los materiales de las piezas metálicas desiguales y de los
- 10 tornillos son tales que la precarga necesaria sobre los elementos piezoeléctricos puede soportarse homogéneamente y sin inducir deformaciones perjudiciales de los elementos piezoeléctricos, de las piezas metálicas desiguales o de los tornillos, donde el material de la pieza menor debe ser menos densa que el material de la pieza mayor
- c. una fuente de alimentación capaz de proporcionar una forma de onda de
- 15 corriente alterna,
- i. en la que la fuente comprende un generador de forma de onda arbitraria, un amplificador y un transformador;
- ii. en la que el polo positivo de la fuente está conectado mediante cables
- 20 eléctricos a las pestañas de los electrodos conductores que están en contacto con la polaridad positiva de los discos piezoeléctricos polarizados de cada elemento piezoeléctrico, y el polo negativo de la fuente está conectado mediante cables eléctricos a las pestañas de los electrodos conductores que están en contacto con la polaridad negativa
- 25 de los discos piezoeléctricos polarizados de cada elemento piezoeléctrico

En una forma de realización preferente no limitativa la presión total ejercida por la precarga sobre las pilas debe ser preferentemente del orden de ~20 MPa

- 30 Además, de manera complementaria en la fuente de alimentación se implementa un detector de fase, que calcula el ángulo de fase de impedancia (IPA) entre las formas de onda de tensión y corriente que fija un ángulo de fase deseado y un

controlador de fase varía la frecuencia de accionamiento para mantenerla independientemente de los desplazamientos debidos a los efectos térmicos.

En una posible forma de realización, dado que el material de la pieza menor debe
5 ser menos densa que el material de la pieza mayor, el material de la pieza mayor (7) es latón y el de la pieza menor (6) es aluminio.

El propulsor piezoeléctrico complementariamente comprende un sistema de refrigeración térmica para evitar grandes cambios en la condición de resonancia,
10 donde la pieza mayor como la pieza menor presentan orificios pasantes a través de las cuales se dispone una tubería a lo largo del eje de simetría de la estructura, y a través de la cual se bombea un refrigerante líquido de un lado al otro de la tubería pasando la tubería cerca del conjunto de pilas. Dicha tubería puede estar fabricada en aluminio recubierto externamente con pintura mate
15 negra. Adicionalmente, el propulsor estaría protegido por un escudo térmico externo diseñado para reflejar la radiación solar incidente y así reducir el calentamiento debido a las condiciones ambientales.

También es objeto de la presente invención un método para generar un empuje
20 sin expulsar propulsante, basado en el propulsor piezoeléctrico anteriormente descrito que comprende las etapas de:

- a. Comprimir el conjunto de elementos piezoeléctricos, a lo largo de su eje de simetría, entre las dos masas desiguales;
- b. Aplicando un voltaje alterno al conjunto de elementos piezoeléctricos a
25 través de las pestañas de los electrodos conductores,
 - i. donde el voltaje alterno aplicado tiene una forma de onda que comprende dos componentes sinusoidales con frecuencias diferentes, el primer componente sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de resonancia de espesor (o primer armónico) de los elementos piezoeléctricos, y el
30 segundo componente sinusoidal con frecuencia igual al doble de la frecuencia de resonancia de espesor (o segundo armónico) de los elementos piezoeléctricos;

- ii. donde la amplitud de la segunda componente sinusoidal no es superior al 20% de la amplitud de la primera sinusoidal, y la relación de fase entre las dos componentes sinusoidales de la forma de onda es $\pi/2$, de modo que la segunda derivada de la forma de onda de tensión, que es
- 5 proporcional a la aceleración de la pila, alcanza valores positivos más altos que los negativos durante cada ciclo, dando una aceleración durante la fase de expansión de los elementos piezoeléctricos superior a la aceleración durante la fase de contracción;
- iii. en el que, al aplicar la tensión alterna sobre los elementos
- 10 piezoeléctricos, y debido a la mayor aceleración de la expansión, se produce un empuje a lo largo del eje de simetría de los elementos piezoeléctricos en la dirección que conecta los elementos piezoeléctricos con la pieza metálica mayor;
- c. medir tanto la impedancia de los elementos piezoeléctricos, como el
- 15 ángulo de fase entre las formas de onda de tensión y corriente suministradas a los elementos piezoeléctricos, con el fin de identificar la condición de resonancia de espesor del elemento piezoeléctrico como el rango de frecuencias en el que tanto la impedancia está en un mínimo local y el ángulo de fase entre las formas de onda de tensión y corriente es cero;
- 20 el método puede incluir además la adición de un número arbitrario de armónicos superiores de la frecuencia de resonancia del espesor en la forma de onda de la tensión alterna, con amplitudes y fase relativa convenientemente elegidas para que la segunda derivada de la forma de onda de la tensión, que es proporcional
- 25 a la aceleración de la pila, alcance valores positivos superiores a los negativos durante cada ciclo, dando lugar a una aceleración durante la fase de expansión de los elementos piezoeléctricos superior a la aceleración durante la fase de contracción.
- 30 En otra forma de realización el método puede incluir además uno o más sistemas para estabilizar la condición de resonancia de espesor del elemento piezoeléctrico durante largos períodos de tiempo, a saber:

- a. un sistema de bucle cerrado que mide y rastrea la condición de resonancia de espesor de los elementos piezoeléctricos durante toda la duración del suministro de corriente alterna, y lo comunica al generador de forma de onda arbitraria, a fin de que el generador de forma de onda arbitraria adapte la forma de onda suministrada a la condición de resonancia cambiante;
- 5 b. suministrando la tensión alterna en impulsos cortos, para limitar el calentamiento de los elementos piezoeléctricos que se produce por una activación continua, y para limitar la consiguiente deriva de la condición de resonancia,
- 10 i. en el que los periodos de los impulsos sean mucho más largos que un ciclo de la tensión alterna, permitiendo de esta manera varios ciclos de aceleración dentro del mismo impulso;
- c. un sistema para enfriar los elementos piezoeléctricos mediante la absorción de su radiación térmica emitida por medio de un material de alta absorptividad (mayor de 0.9) y alta conductividad térmica (mayor de 230 W/m*K),
- 15 i. en el que el sistema de refrigeración incluye un sensor para controlar la temperatura de los elementos piezoeléctricos;
- ii. en el que el material tiene la forma de un tubo que pasa cerca de los elementos piezoeléctricos y permite bombear y hacer fluir en su interior un líquido refrigerante.
- 20 iii. En el que el tubo que pasa cerca de los elementos piezoeléctricos estaría hecho de aluminio con una alta conductividad térmica (mayor de 230 W/m*K), recubierto externamente con pintura mate negra con una alta absorptividad (mayor de 0.9).
- 25
- Gracias a las características reivindicadas se consigue un propulsor piezoeléctrico que presenta una energía perdida por efectos térmicos muy reducida, donde la potencia entregada al material piezoeléctrico es máxima, los materiales piezoeléctricos cuentan con una gran excursión mecánica debido al
- 30 empleo de unos mayores factores de calidad, una mayor constante piezoeléctrica entre otros elementos característicos.

Salvo que se indique lo contrario, todos los elementos técnicos y científicos usados en la presente memoria poseen el significado que habitualmente entiende un experto normal en la técnica a la que pertenece esta invención. En la práctica de la presente invención se pueden usar procedimientos y materiales
5 similares o equivalentes a los descritos en la memoria.

A lo largo de la descripción y de las reivindicaciones la palabra “comprende” y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y
10 características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

EXPLICACION DE LAS FIGURAS

15 Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente.

20

La figura 1 es un esquema del montaje de una pila piezoeléctrica.

La figura 2 es una realización del propulsor, que contiene cinco versiones idénticas de la pila de la figura 1.

25

La figura 3 muestra un esquema de la arquitectura electrónica utilizada para activar y controlar el propulsor.

La figura 4 es una realización alternativa del propulsor que incluye la adaptación
30 de la estructura para un sistema de refrigeración activo.

La figura 5 muestra el desplazamiento y la aceleración de la pila piezoeléctrica para diferentes valores de la fase relativa entre los componentes sinusoidales de la señal de activación.

- 5 La figura 6 muestra los desplazamientos medios medidos por equipos micrométricos durante la activación del propulsor.

- La figura 7 muestra el desplazamiento y la aceleración de la pila piezoeléctrica cuando el tercer armónico de la resonancia del material piezoeléctrico se excluye
10 o se incluye en la señal de activación.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

- A la vista de las figuras se describe seguidamente un modo de realización
15 preferente de la invención propuesta.

- En la figura 1 podemos observar una pila (5) piezoeléctrica que comprende una serie de discos piezoeléctricos (2) delgados dispuestos de forma alineada y separados entre sí por medio de una serie de electrodos conductores (1)
20 intercalados entre los discos piezoeléctricos (2), quedando unidos los discos piezoeléctricos (2) con los electrodos conductores (1) por medio de una resina epoxi conductora de electricidad (3), conformando lo que denominamos una pila.

- Los electrodos deben tener pestañas salientes (4) para facilitar las conexiones
25 eléctricas alternas.

- Los discos piezoeléctricos (2) deben presentar un alto valor de constante piezoeléctrica d_{33} y un alto valor de factor de calidad Q (o, equivalentemente, un bajo factor de disipación $\tan(\delta)$).
30

Cada disco piezoeléctrico polarizado delgado de la pila está orientado de modo que el lado con polaridad positiva esté orientado hacia el lado con polaridad

positiva de los discos piezoeléctricos polarizados delgados vecinos, y los discos piezoeléctricos polarizados delgados extremos de la pila tengan el lado con polaridad positiva orientado hacia el centro de la pila;

- 5 Las pestañas de los electrodos en contacto con la polaridad positiva de los discos piezoeléctricos finos polarizados están alineadas entre sí, en el lado diametralmente opuesto de la pila en relación con las pestañas de los electrodos en contacto con la polaridad negativa de los discos piezoeléctricos polarizados, tal y como se puede observar en la figura 1.

10

El coeficiente piezoeléctrico d_{33} mide la deformación de la pila en la misma dirección del potencial aplicado: un valor alto de este coeficiente se traduce en una mayor deformación en comparación con materiales con d_{33} más bajo sometidos a la misma tensión. Esto permite una mayor excursión mecánica que

15 facilita la generación de empuje.

15

El factor de calidad Q describe la calidad de un oscilador en condiciones de resonancia: Los materiales piezoeléctricos con factores Q más altos presentan una resonancia más fuerte y estable, pero con un ancho de banda disponible

20 más estrecho alrededor de la frecuencia de resonancia, lo que significa que es necesaria una sintonización más fina para localizar la resonancia.

20

Equivalentemente, un Q alto indica una baja tasa de pérdida de energía por efectos térmicos (bajo factor de disipación $\tan(\delta)$), de modo que puede

25 conseguirse un menor calentamiento del propulsor.

25

En una posible forma de realización los discos piezoeléctricos polarizados delgados tienen un factor de calidad Q superior a 1800 y una constante piezoeléctrica d_{33} superior a $270 \cdot 10^{-12}$ m/V, condiciones combinadas que

30 conducen a una gran excursión mecánica de los elementos piezoeléctricos y a una cantidad insignificante de energía perdida por efectos térmicos durante tales excursiones;

30

En la figura 2 se observa la configuración del propulsor piezoeléctrico objeto de la invención, que como puede observarse, comprende una serie de pilas (5) conformadas tal y como se ha descrito en la figura 1, dispuestas en paralelo y comprimidas entre una pieza menor (6) y una pieza mayor (7), donde el concepto de pieza menor y pieza mayor hace referencia a sus masas; donde ambas piezas están unidas por una serie de tornillos (8) ya que los elementos piezoeléctricos necesitan estar sometidos a una precarga para funcionar correctamente y transmitir cualquier empuje. El número y disposición de la precarga son tales que la presión ejercida sobre las caras de las pilas sea lo más homogénea posible. La presión total ejercida por la precarga sobre las pilas debe ser preferentemente del orden de ~20 MP que es una presión necesaria y suficiente para permitir un correcto comportamiento actuante de las pilas y al mismo tiempo evitar el pandeo de las mismas.

La relación entre el radio y la longitud de las pilas cilíndricas debe ser tal que no se produzca pandeo durante la precarga. La pieza mayor (7), además de actuar como soporte para la precarga de las pilas, constituye el punto de contacto entre el propulsor y el cuerpo sobre el que se va a aplicar la fuerza.

De manera complementaria, puede incluirse un soporte adicional (9) para el propulsor con el fin de facilitar el proceso de montaje. La elección de los materiales de las piezas metálicas desiguales se rige tanto por requisitos estructurales (limitar la deformación global de las piezas durante la precarga y la activación) como por consideraciones prácticas (limitar la masa global del propulsor mientras se proporciona la precarga). De acuerdo con estos requisitos, y dada la relativamente baja precarga necesaria para comprimir las pilas, el material de la pieza menor (6) debe ser menos denso que el material de la pieza mayor (7). Por ejemplo, la pieza mayor (7) podría ser de latón y la pieza menor (6) de aluminio.

En la figura 3 se puede observar la fuente externa de aplicación de una tensión alterna que comprende un generador de señales (12), un amplificador (13) y un transformador (14) a través de cuya salida se aplica una tensión alterna modulada a través de los electrodos de cada una de las pilas paralelas (16),
 5 siguiendo el patrón de alternancia que se muestra en la figura 1.

La forma de onda de tensión más sencilla consta de dos frecuencias principales, la frecuencia de resonancia de espesor ω del elemento piezoeléctrico y su doble, con una relación de fase fija de $\pi/2$ entre ellas y una posible relación de amplitud
 10 podría ser de alrededor de 0,177. Una forma explícita de la señal puede ser dada como en la ecuación [1]:

$$V = \frac{V_0}{1 + 0.177} [\sin(\omega t) + 0.177 \sin(2 \omega t + \pi/2)]$$

15 La frecuencia de resonancia de un material piezoeléctrico es la frecuencia a la cual exhibe máxima amplitud de oscilaciones cuando es sometido a un campo eléctrico externo. La condición de resonancia corresponde al punto en el que el ángulo de fase de impedancia (IPA Impedance Phase Angle) θ entre las formas de onda de tensión y corriente es cero, de modo que la potencia entregada al
 20 material piezoeléctrico es máxima, según la ecuación [2]:

$$P = \frac{1}{2} V_p I_p \cos \theta \quad \text{con} \quad \theta = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} V_p I_p$$

Donde V_p e I_p son los valores pico de tensión y corriente respectivamente. La
 25 adición de una componente correspondiente al segundo armónico (el doble de la frecuencia de resonancia) induce mayores desplazamientos oscilantes, al tiempo que aumenta la robustez y la estabilidad frente a los efectos no lineales propios de la condición de resonancia.

30 La ubicación de la condición de resonancia de un material piezoeléctrico en el espectro de frecuencias puede cambiar durante el funcionamiento, debido a los

- cambios de temperatura que inevitablemente se producen a medida que el material piezoeléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Se implementan dos métodos para evitar que este efecto afecte al funcionamiento del propulsor. Por un lado, para mantener la condición de IPA cero, se
- 5 implementa un detector de fase (15), que calcula el IPA entre las formas de onda de tensión y corriente; una vez fijado el ángulo de fase deseado (10), un controlador de fase (11) varía la frecuencia de accionamiento para mantenerla independientemente de los desplazamientos debidos a los efectos térmicos.
- 10 Por otro lado, se puede implementar un sistema de refrigeración térmica para evitar grandes cambios en la condición de resonancia, tal y como se muestra en la figura 4, donde la pieza mayor (7) como la pieza menor (6) presentan orificios pasantes (17) que permiten la instalación de una tubería (18) a lo largo del eje de simetría de la estructura. Se utiliza un sistema externo para bombear
- 15 refrigerante líquido a través de la tubería de un lado (19) al otro (20) de la estructura, pasando la tubería cerca del conjunto de pilas (5). Para facilitar la transferencia de radiación de calor de las pilas (5) a la tubería (18), esta última debe fabricarse con un material de alta absorptividad (mayor de 0.9), de modo que pueda absorber eficazmente la radiación infrarroja térmica, y de alta
- 20 conductividad térmica (mayor de $230 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$), para que pueda transferir rápidamente el calor hacia el exterior. Por ejemplo, el material para el tubo es aluminio recubierto externamente de pintura mate negra, que en conjunto presentan estas dos propiedades.
- 25 En la figura 5a se puede observar cómo la deformación de un material piezoeléctrico es proporcional a la tensión aplicada, en el caso de una forma de onda sinusoidal simple la aceleración (es decir, la segunda derivada del desplazamiento) del material piezoeléctrico durante un ciclo tendría picos positivos y negativos con la misma amplitud.
- 30 En la figura 5b se observa cómo la diferencia de fase elegida entre las dos componentes sinusoidales maximiza la asimetría de la aceleración, de tal forma

que alcanzará valores positivos más altos que los negativos durante cada ciclo. El perfil asimétrico de la señal de excitación y la disposición asimétrica de las piezas metálicas en compresión conducen a la producción de una aceleración neta en la dirección de la pieza mayor.

5

Las figuras 6a y 6b muestran los resultados de los experimentos destinados a medir el desplazamiento inducido por el propulsor durante su activación en un equipo micrométrico. La señal utilizada para activar el propulsor es la dada en la ecuación [1] con $V_0=50V$. Cada gráfico es un promedio de varias activaciones de 20 segundos de duración, realizadas en ambas direcciones (definidas convencionalmente) hacia delante (a) y hacia atrás (b). Mediante una calibración del equipo micrométrico, es posible relacionar el desplazamiento medido con un valor de impulso impartido por el propulsor: (a) $5,8 \mu N$ y (b) $17 \mu N$.

10

15

En principio, podría obtenerse una amplificación del efecto eligiendo una forma de onda ampliada que incluyera también armónicos de orden superior de la frecuencia de resonancia fundamental, que son teóricamente infinitos pero de intensidad progresivamente decreciente. La señal resultante sería una suma de términos de la forma $A \sin(n \omega t + \phi)$, en la que las amplitudes A y las fases ϕ deberían sintonizarse de forma que se satisfaga la condición asimétrica de la aceleración descrita anteriormente. La figura 7 muestra cómo la inclusión del tercer armónico, según la ecuación [3] siguiente, afecta al perfil de aceleración.

20

$$V = \frac{V_0}{1 + 0.177} [\sin(\omega t) + 0.177 \sin(2 \omega t + \pi/2) + 0.06 \sin(3 \omega t + \pi)]$$

25

El efecto es un aumento de la asimetría hacia valores positivos. Sin embargo, hay que considerar que, en algunos casos, los armónicos superiores de la resonancia de espesor podrían solaparse con frecuencias de otros tipos de resonancias piezoeléctricas, como las radiales, que se acoplarían e interferirían negativamente con el comportamiento requerido, de modo que el efecto neto podría debilitarse. La supresión de resonancias no deseadas puede lograrse diseñando adecuadamente la forma de las pilas, lo que, sin embargo, también

30

puede dar lugar a problemas mecánicos no deseados en la fase de precarga. En este sentido, la elección de activar el material piezoeléctrico sólo con la frecuencia fundamental y el segundo armónico proporciona un mejor control sobre el resultado.

5

Descrita suficientemente la naturaleza de la presente invención, así como la manera de ponerla en práctica, se hace constar que, dentro de su esencialidad, podrá ser llevada a la práctica en otras formas de realización que difieran en detalle de la indicada a título de ejemplo, y a las cuales alcanzará igualmente la

10

protección que se recaba, siempre que no altere, cambie o modifique su principio fundamental.

REIVINDICACIONES

1.- Propulsor piezoeléctrico caracterizado porque comprende

a. Un conjunto de elementos piezoeléctricos idénticos,

- 5 i. En el que cada elemento piezoeléctrico es una pila (5) de discos piezoeléctricos (2) polarizados en disposición alternada con respecto a unos electrodos (1) conductores;
- ii. En el que el material de los discos piezoeléctricos polarizados delgados tiene un factor de calidad Q superior a 1800 y una constante piezoeléctrica
10 d_{33} superior a $270 \cdot 10^{-12}$ m/V;
- iii. en el que cada lado de cada disco piezoeléctrico (2) polarizado delgado de la pila (5) está cubierto por un electrodo (1) conductor;
- iv. en el que los discos piezoeléctricos (2) polarizados y los electrodos (1) conductores están unidos con una capa de resina epoxídica (3)
15 conductora de electricidad;
- v. en el que cada disco piezoeléctrico (2) polarizado de la pila (5) está orientado de modo que el lado con polaridad positiva esté orientado hacia el lado con polaridad positiva de los discos piezoeléctricos polarizados (2) delgados vecinos, y los discos piezoeléctricos polarizados (2) extremos
20 de la pila tengan el lado con polaridad positiva orientado hacia el centro de la pila;
- vi. en el que los electrodos (1) conductores presentan pestañas salientes (4) para facilitar las conexiones eléctricas;
- vii. en el que las pestañas de los electrodos (1) en contacto con la polaridad
25 positiva de los discos piezoeléctricos (2) polarizados están alineados entre sí, en el lado diametralmente opuesto de la pila en relación con las pestañas de los electrodos en contacto con la polaridad negativa de los discos piezoeléctricos (2) polarizados;
- b. dos piezas metálicas desiguales, una pieza menor (6) y una pieza mayor
30 (7) en disposición paralela y colocadas en los extremos de las pilas (5),

- i. en las que un conjunto de tornillos (8) permite comprimir el conjunto de los discos piezoeléctricos (2), a lo largo de su eje de simetría, entre las dos piezas desiguales (6) y (7);
 - ii. en las que los materiales de las piezas metálicas desiguales y de los tornillos son tales que la precarga necesaria sobre los elementos piezoeléctricos puede soportarse homogéneamente y sin inducir deformaciones perjudiciales de los elementos piezoeléctricos, de las piezas metálicas desiguales o de los tornillos, donde el material de la pieza menor (6) debe ser menos densa que el material de la pieza mayor (7)
- 5 c. una fuente de alimentación (21) capaz de proporcionar una forma de onda de corriente alterna,
 - i. en la que la fuente comprende un generador (12) de forma de onda arbitraria, un amplificador (13) y un transformador (14);
 - 15 ii. en la que el polo positivo de la fuente (21) está conectado mediante cables eléctricos a las pestañas de los electrodos (1) conductores que están en contacto con la polaridad positiva de los discos piezoeléctricos (2) polarizados de cada elemento piezoeléctrico, mientras que el polo negativo de la fuente está conectado mediante cables eléctricos a las pestañas de los electrodos conductores que están en contacto con la polaridad negativa de los discos piezoeléctricos polarizados (2) de cada elemento piezoeléctrico.
- 20

2.- Propulsor piezoeléctrico según la reivindicación 1 caracterizado porque la presión total ejercida por la precarga sobre las pilas debe ser preferentemente del orden de ~20 MP

25

3.- Propulsor piezoeléctrico según la reivindicación 1 caracterizado porque en la fuente de alimentación (21) se implementa un detector de fase (15), que calcula el ángulo de fase de impedancia (IPA) entre las formas de onda de tensión y corriente que fija un ángulo de fase deseado (10) y un controlador de fase (11) varía la frecuencia de accionamiento para mantenerla independientemente de los desplazamientos debidos a los efectos térmicos.

30

4.- Propulsor piezoeléctrico según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque el material de la pieza mayor (7) es latón y el de la pieza menor (6) es aluminio.

5 5.- Propulsor piezoeléctrico según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque comprende un sistema de refrigeración térmica para evitar grandes cambios en la condición de resonancia, donde la pieza mayor (7) como la pieza menor (6) presentan orificios pasantes (17) a través de las cuales se dispone una tubería (18) a lo largo del eje de simetría de la estructura, y a través
10 de la cual se bombea un refrigerante líquido de un lado (19) al otro (20) de la tubería (18) pasando la tubería cerca del conjunto de pilas (5).

6.- Propulsor piezoeléctrico según la reivindicación 5 caracterizado porque la tubería (18) está fabricada en aluminio recubierto externamente de pintura mate
15 negra

7.- Método para generar un empuje sin expulsar propulsante, basado en el propulsor piezoeléctrico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 caracterizado por que comprende las etapas de:

- 20 a. Comprimir el conjunto de elementos piezoeléctricos, a lo largo de su eje de simetría, entre la pieza menor (6) y la pieza mayor (7);
- b. Aplicando un voltaje alterno al conjunto de elementos piezoeléctricos a través de las pestañas de los electrodos conductores,
- i. donde el voltaje alterno aplicado tiene una forma de onda que
25 comprende dos componentes sinusoidales con frecuencias diferentes, el primer componente sinusoidal con frecuencia igual a la frecuencia de resonancia de espesor o primer armónico de los elementos piezoeléctricos, y el segundo componente sinusoidal con frecuencia igual al doble de la frecuencia de resonancia de espesor o segundo armónico de los elementos
30 piezoeléctricos;

- ii. donde la amplitud de la segunda componente sinusoidal no es superior al 20% de la amplitud de la primera sinusoidal, y la relación de fase entre las dos componentes sinusoidales de la forma de onda es $\pi/2$.
 - iii. en el que, al aplicar la tensión alterna sobre los elementos piezoeléctricos, y debido a la mayor aceleración de la expansión, se produce un empuje a lo largo del eje de simetría de los elementos piezoeléctricos en la dirección que conecta los elementos piezoeléctricos con la pieza metálica mayor;
 - c. medir tanto la impedancia de los elementos piezoeléctricos, como el ángulo de fase entre las formas de onda de tensión y corriente suministradas a los elementos piezoeléctricos, con el fin de identificar la condición de resonancia de espesor del elemento piezoeléctrico como el rango de frecuencias en el que tanto la impedancia está en un mínimo local y el ángulo de fase entre las formas de onda de tensión y corriente es cero.
- 8.- Método para generar un empuje sin expulsar propulsante según la reivindicación 7 caracterizado porque incluye además la adición de un número de armónicos superiores de la frecuencia de resonancia del espesor en la forma de onda de la tensión alterna, con amplitudes y fase relativa elegidas para que la segunda derivada de la forma de onda de la tensión, que es proporcional a la aceleración de la pila, alcance valores positivos superiores a los negativos durante cada ciclo.
- 9.- Método para generar un empuje sin expulsar propulsante según la reivindicación 7 u 8 caracterizado porque incluye además uno o más sistemas para estabilizar la condición de resonancia de espesor del elemento piezoeléctrico durante períodos de tiempo mayores de 1 día, a saber:
- a. un sistema de bucle cerrado que mide y rastrea la condición de resonancia de espesor de los elementos piezoeléctricos durante toda la duración del suministro de corriente alterna, y lo comunica al generador de forma de onda arbitraria, a fin de que el generador de forma de onda arbitraria adapte la forma de onda suministrada a la condición de resonancia cambiante;

- b. suministrando la tensión alterna en impulsos cortos, para limitar el calentamiento de los elementos piezoeléctricos que se produce por una activación continua, y para limitar la consiguiente deriva de la condición de resonancia,
- 5 i. en el que los periodos de los impulsos sean mucho más largos que un ciclo de la tensión alterna, permitiendo de esta manera varios ciclos de aceleración dentro del mismo impulso;
- c. un sistema para enfriar los elementos piezoeléctricos mediante la absorción de su radiación térmica emitida por medio de un material de
- 10 absorptividad mayor de 0.9 y una conductividad térmica mayor de 230 W/m*K,
- i. en el que el sistema de refrigeración incluye un sensor para controlar la temperatura de los elementos piezoeléctricos;
- ii. en el que el material de absorptividad mayor de 0.9 y conductividad térmica mayor de 230 W/m*K tiene la forma de un tubo que pasa cerca de los
- 15 elementos piezoeléctricos y permite bombear y hacer fluir en su interior un líquido refrigerante.
- 10.- Método para generar un empuje sin expulsar propulsante según la reivindicación 7 u 8 ó 9 caracterizado porque la forma de onda de que consta de
- 20 dos frecuencias principales presentan una relación de fase fija de $\pi/2$ entre ellas y una posible relación de amplitud podría ser de alrededor de 0,177, donde la forma explícita de la señal como en la ecuación:

$$V = \frac{V_0}{1 + 0.177} [\sin(\omega t) + 0.177 \sin(2 \omega t + \pi/2)]$$