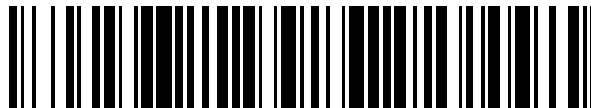


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 394 065**

51 Int. Cl.:

**F15D 1/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.11.2009 E 09802250 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **05.10.2011 EP 2370316**

54 Título: **Sistema y método para reducir la fuerza viscosa entre un fluido y una superficie**

30 Prioridad:

**08.12.2008 US 330138**

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

**16.01.2013**

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)  
100 North Riverside Plaza  
Chicago, IL 60606-2016, US**

72 Inventor/es:

**PARAZZOLI, CLAUDIO G.;  
TANIELIAN, MINAS H. y  
GREGOR, ROBERT B.**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 394 065 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

Sistema y método para reducir la fuerza viscosa entre un fluido y una superficie

5 **Campo**

La presente divulgación se refiere en general a la resistencia viscosa y, más en particular, a un metamaterial configurado para reducir la resistencia viscosa entre un fluido y una superficie.

10 **Antecedentes**

Uno de los principales colaboradores a la falta de eficacia de un objeto que se mueve a través de un fluido es la resistencia por fricción o la resistencia viscosa que tiene lugar en la capa límite del objeto. La resistencia por fricción o resistencia viscosa tiende a resistir el movimiento del objeto a través del fluido o el movimiento del fluido por encima del objeto. Por ejemplo, la maquinaria giratoria tal como una turbina que gira en un fluido está sometida a la resistencia viscosa en la capa límite del objeto. En otro ejemplo, un vehículo tal como una aeronave que se mueve a través del aire está sometido a la resistencia por fricción o la resistencia viscosa en la capa límite de la superficie de contacto de vehículo/aire que tiende a impedir el movimiento hacia delante de la aeronave.

En la técnica anterior se incluyen muchos intentos para la reducción de la resistencia viscosa que actúa sobre una superficie tal como la resistencia por fricción que actúa sobre un perfil aerodinámico que se mueve a través del aire o un perfil hidrodinámico que se mueve a través de agua. Un enfoque para la reducción de la resistencia viscosa incluye la formación de una pluralidad de perforaciones o poros en la superficie por encima de la cual el fluido se mueve y la aplicación de una fuerza de soplado o succión a los poros. La aplicación de succión a los poros se basa en el principio de eliminación de fluido de baja energía de la capa límite de la superficie con el fin de reducir la resistencia. La aplicación de una fuerza de soplado a los poros emplea el principio de adición de fluido de mayor energía a la capa límite, lo que retarda la separación de la capa límite con respecto a la superficie. Tal como se aplica a las superficies de sustentación de perfil aerodinámico o hidrodinámico, el retardo de la separación de la capa límite aumenta la sustentación, retarda la entrada en pérdida a unos ángulos altos de ataque de perfil aerodinámico en relación con la corriente de fluido en movimiento, y mejora de este modo la eficacia de la superficie de sustentación.

Desafortunadamente, la aplicación de succión en los poros requiere un sistema de vacío activo. Un sistema activo de este tipo típicamente requiere la adición de una bomba de vacío separada o la adición de una serie compleja de conductos que unen una bomba de vacío existente a los poros en la superficie. Tal como puede apreciarse, la adición de un sistema de vacío activo a menudo da como resultado un sistema más pesado que puede dar como resultado unos costes y un trabajo de mantenimiento aumentados.

Otro enfoque para aumentar la eficacia de las superficies que se mueven a través de una corriente de fluido incluye el uso de ranuras o nervaduras sobre las superficies de sustentación fluidodinámicas. Las ranuras o nervaduras pueden funcionar para retardar la separación de flujo excitando una corriente de aire de capa límite que fluye en las proximidades de la superficie de sustentación. No se pretende que las ranuras o nervaduras reduzcan la resistencia y pueden aumentar ligeramente la resistencia viscosa debido al área de superficie adicional de la superficie de sustentación como resultado de las ranuras o nervaduras. Las ranuras o nervaduras se proporcionan para excitar la capa límite como resultado de los remolinos de capa límite que se forman alrededor de los bordes de salida de las ranuras o nervaduras. La separación de corriente de fluido de capa límite de mayor energía mejora la eficacia de las superficies de sustentación de perfil aerodinámico e hidrodinámico similar a la eficacia mejorada asociada con la tecnología de fuerza de soplado que se menciona anteriormente. Para superficies lisas, tales remolinos van y vienen en la corriente de aire de capa límite y pueden rebotar o desviarse con respecto a la superficie de sustentación.

La configuración de las ranuras o nervaduras sobre la superficie puede estar adaptada a la corriente de aire de capa límite y el entorno de fluido circundante y a la forma en la que es probable que las superficies de sustentación se muevan en relación con el entorno de fluido circundante. Por ejemplo, las ranuras o nervaduras han de estar orientadas a lo largo de una dirección que es, en general, paralela a la dirección prevista del movimiento de la superficie de sustentación en relación con el fluido.

Tal como puede verse, existe una necesidad en la técnica para un sistema y un método para reducir la resistencia viscosa de una superficie que se mueve a través de un fluido y que es preferiblemente un sistema pasivo que no requiere componentes activos. Además, existe una necesidad en la técnica para un sistema y un método para reducir la resistencia viscosa de una superficie que se mueve a través de un fluido que se comporta bien cuando se cambia el movimiento direccional de la superficie de sustentación en relación con el fluido. Adicionalmente, existe una necesidad en la técnica para un sistema y un método para reducir la resistencia viscosa de una superficie que se mueve a través de un fluido que sea de construcción simple, de coste bajo y de peso ligero. El documento WO 2005/089176 A2 da a conocer el uso de metamateriales, con una propiedad mecánica controlable de forma activa, en una aeronave.

**Breve resumen**

La presente invención reside en un sistema para reducir la resistencia viscosa de un fluido sobre una superficie de acuerdo con la reivindicación 1, y un método de reducción de la resistencia viscosa de un fluido que se mueve en relación con una superficie de acuerdo con la reivindicación 11.

Las necesidades que se describen anteriormente, asociadas con la reducción de la resistencia viscosa que actúa sobre una superficie se tratan y se mitigan de forma específica mediante un metamaterial que puede estar incorporado como parte de, y/o que puede aplicarse a, una superficie que se mueve a través de un entorno de fluido tal como a través del aire o a través de un líquido (por ejemplo, agua). Preferiblemente, un metamaterial de este tipo tiene una respuesta de permeabilidad magnética a unas frecuencias en el intervalo de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz y que puede abarcar las bandas infrarroja, visible y ultravioleta del espectro electromagnético. El metamaterial genera una fuerza entre la superficie y una corriente de fluido circundante tal como una corriente de aire o una corriente de líquido de una forma que reduce la resistencia viscosa del fluido sobre la superficie.

La expresión "metamaterial" se usa por los expertos en las técnicas relevantes para describir unos materiales que muestran unas propiedades que no se encuentran en la naturaleza. Los átomos y las moléculas en la naturaleza experimentan típicamente una fuerza de atracción cuando se encuentran en las proximidades de otros materiales, tal como los materiales usados para superficies aerodinámicas y fluidodinámicas incluyendo, sin limitación, los perfiles aerodinámicos y los perfiles hidrodinámicos. Los expertos en los campos relevantes de la tecnología hacen referencia típicamente a tales fuerzas en el marco de la teoría clásica como fuerzas de "van der Waals" y en el marco de la teoría cuántica como fuerzas de "Casimir-Polder-Lifshitz".

Los metamateriales contemplados según se da a conocer en el presente documento y el sistema y los métodos para usar tales metamateriales de acuerdo con los principios de las realizaciones que se dan a conocer en el presente documento reducen, eliminan e invierten tales fuerzas de atracción y pueden posibilitar una fuerza de repulsión entre una superficie y los átomos y/o las moléculas en un fluido que fluye más allá de la superficie. Los metamateriales según se da a conocer en el presente documento tienen una permeabilidad magnética que es sensible a la inversión de tales fuerzas de atracción dentro del intervalo de frecuencias de  $10^{14}$  a  $10^{16}$  Hz del espectro electromagnético para crear la fuerza de repulsión.

El metamaterial tiene una alta permeabilidad magnética y una permitividad eléctrica relativamente baja suficiente para generar una fuerza de repulsión entre el metamaterial aplicado a, o integrado con, la superficie y el fluido que fluye alrededor, o por encima, de la superficie. En una realización, el metamaterial puede tener una permeabilidad magnética que es más grande que la permitividad eléctrica del metamaterial por un factor de hasta por lo menos 10. La permeabilidad magnética del metamaterial tal como se describe en el presente documento es un parámetro adimensional y hace referencia a la permeabilidad del material en relación con la permeabilidad absoluta del vacío (es decir,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Newtons por metro<sup>2</sup>).

En una realización, el metamaterial tiene preferiblemente una permeabilidad magnética  $\mu(\omega)$  con un valor absoluto de hasta aproximadamente 25. Más preferiblemente, el metamaterial puede tener un valor absoluto de permeabilidad que se encuentra dentro del intervalo de desde aproximadamente 5 hasta aproximadamente 15, siendo el valor absoluto de permitividad del metamaterial más pequeño por un factor de hasta aproximadamente 10 o más grande. El metamaterial puede configurarse como una parte integral de una superficie y puede configurarse también como un añadido que puede unirse a una superficie tal como a una superficie externa de un perfil hidrodinámico, un casco de barco, una superficie automotriz u otras superficies externas de vehículo tales como una superficie aerodinámica que comprende, por ejemplo, un ala de aeronave, una superficie hidrodinámica, un ala de aeronave, una superficie de cola, una superficie de control, un fuselaje, una pala de hélice, un álabe de turbina, a pesar de que el metamaterial puede aplicarse a cualquier superficie usando cualquier medio de fabricación, técnica o mecanismo adecuados.

La presente divulgación contempla además un sistema de reducción de la resistencia viscosa de un fluido que se mueve más allá de una superficie generando la fuerza de repulsión entre la superficie y los átomos y/o las moléculas en un fluido mediante el uso de un metamaterial aplicado sobre, y/o incorporado en, la superficie como una parte integral de la superficie. También se da a conocer un método de formación de un metamaterial para la aplicación a una superficie de tal modo que el metamaterial genera una fuerza de repulsión entre la superficie del metamaterial y el fluido para reducir de este modo la resistencia viscosa del fluido sobre la superficie. Más en particular, los metamaterial(es) contemplado(s) puede(n) configurarse para invertir la fuerza de atracción de van der Waals o cuántica entre el fluido y la superficie para reducir la resistencia viscosa entre los mismos.

Los beneficios técnicos de las realizaciones que se dan a conocer incluyen un enfoque pasivo para la reducción de la resistencia viscosa que no requiere componentes activos. Además, las realizaciones que se dan a conocer son efectivas y operativas con independencia de la dirección del movimiento entre el fluido y la superficie.

Debido a la naturaleza pasiva del metamaterial y las capacidades operativas y funcionales direccionalmente independientes, las realizaciones que se dan a conocer pueden aplicarse de forma ventajosa a los perfiles

aerodinámicos, los perfiles hidrodinámicos y otras estructuras fluidodinámicas para disminuir la resistencia viscosa y aumentar la eficacia de los mismos. Por ejemplo, varias realizaciones pueden aplicarse a superficies aerodinámicas tales como un fuselaje de aeronave, un perfil aerodinámico tal como un ala o una superficie de control, o cualquier superficie para reducir la fricción de fluido y/o para mejorar la aerodinámica, lo que puede dar como resultado unos beneficios tales como una sustentación aumentada, una resistencia reducida y una reducción resultante en el consumo de combustible para una aeronave.

Además, varias realizaciones del metamaterial pueden aplicarse a los álabes de un motor de turbina, compresor, turbina de vapor u otra turbina de fluido, álabe de turbofán, álabe de rotor, pala de hélice y otra maquinaria que tenga componentes que se mueven a través de un fluido. Además, varias realizaciones pueden aplicarse a superficies hidrodinámicas tales como cascos y otras superficies de embarcaciones tales como barcos, naves y otros vehículos. No obstante, la aplicación de varias realizaciones de metamaterial puede estar incorporada como parte de, y/o aplicarse a, cualquier superficie en la que se desea la reducción de la resistencia viscosa asociada con el flujo de fluido y que puede incluir todas las superficies y los revestimientos de los vehículos aéreos, acuáticos, espaciales y terrestres.

Las características, funciones y ventajas que se han analizado pueden conseguirse de forma independiente en varias realizaciones de la presente divulgación o pueden combinarse en otras realizaciones más, detalles adicionales de las cuales pueden verse con referencia a la siguiente descripción y los dibujos a continuación.

### Breve descripción de los dibujos

Estas y otras características de la presente divulgación se volverán más evidentes tras la referencia a los dibujos, en los que números similares hacen referencia a partes similares a través de su totalidad y en los que:

la figura 1A es una representación gráfica de las partes real e imaginaria de la permeabilidad magnética ( $\mu$  o " $\mu$ ") frente a la frecuencia de longitud de onda real ( $\omega$  o " $\omega$ ") para un metamaterial en una realización de acuerdo con los principios de la invención;

la figura 1B es una representación gráfica de las partes real e imaginaria de la permeabilidad magnética " $\mu$ " frente a la frecuencia de longitud de onda imaginaria ( $i^*(\omega)$ ) para el metamaterial de la figura 1A;

la figura 2 es una gráfica de la polarizabilidad del agua frente a la frecuencia de longitud de onda imaginaria ( $i^*(\omega)$ ) y en la que la gráfica usó una simulación por software para calcular una aproximación de la polarizabilidad;

la figura 3 es una gráfica del potencial de van der Waals normalizado frente a la distancia desde una superficie del metamaterial tal como la de las figuras 1A–B y 2 y que ilustra unas variaciones del potencial de repulsión que dependen de la respuesta eléctrica (por ejemplo, unas variaciones en la permitividad  $\epsilon$  o " $\epsilon$ ");

la figura 4A es una vista en perspectiva de un metamaterial nanofabricado que comprende unos nanocilindros separados de acuerdo con los principios de la invención;

la figura 4B es una gráfica de una parte real de la permeabilidad magnética " $\mu$ " frente a la frecuencia de longitud de onda " $\omega$ " y que ilustra la respuesta de permeabilidad magnética para el metamaterial de la figura 4A;

la figura 4C es una vista en perspectiva de un metamaterial nanofabricado que comprende unas nanoesferas separadas de acuerdo con los principios de la invención;

la figura 5A es un diagrama en sección transversal que ilustra una celda unidad para una disposición ordenada de nanotiras de plata acopladas para un metamaterial nanofabricado de acuerdo con los principios de la invención;

la figura 5B es una gráfica que muestra las partes reales de la permitividad " $\epsilon$ " (que se muestra con trazo discontinuo) y la permeabilidad " $\mu$ " (que se muestra con trazo continuo) como una función de la frecuencia de longitud de onda " $\omega$ " para la celda unidad de la figura 5A; y

la figura 5C es una sección transversal de la celda unidad de la figura 5A que muestra la estructura posterior a la fabricación y que además ilustra las líneas de campo B totales en el interior de la sección transversal de la celda unidad.

### Descripción detallada

Haciendo referencia a continuación a los dibujos en los que lo que se muestra es sólo para fines de ilustración de unas realizaciones varias y preferidas de la divulgación y no para fines de limitación de la misma, las figuras 1–5C ilustran varios aspectos de las realizaciones de la invención para reducir la resistencia viscosa de una superficie que se mueve a través de un fluido aprovechando las propiedades de un metamaterial que posibilitan, entre otras capacidades, la reducción, eliminación y/o inversión de las fuerzas de atracción que existen entre los átomos y las moléculas de un fluido y una superficie.

Las realizaciones según se da a conocer en el presente documento y tal como se contempla por los principios de la invención pueden incorporar preferiblemente un metamaterial, o una combinación de metamateriales, que tenga(n) unas propiedades de una alta permeabilidad magnética y una baja permitividad eléctrica que sean suficientes para

generar una fuerza de repulsión entre el metamaterial y el fluido que fluye por encima de la superficie. Tal como se usa en la presente divulgación, la expresión “fuerza de van der Waals” hace referencia a, y se caracteriza típicamente como, la totalidad de fuerzas de atracción o de repulsión entre los átomos y las moléculas (o entre partes de la misma molécula) de un fluido en el que los átomos y las moléculas se encuentran en las proximidades inmediatas de una superficie. En el marco de la teoría clásica, los expertos en la técnica hacen referencia a tales fuerzas como fuerzas de van der Waals y en el marco de la teoría cuántica, como fuerzas de “Casimir–Polder–Lifshitz”.

Los metamateriales según se da a conocer en el presente documento en el sistema y método para usar tales metamateriales pueden reducir, eliminar e invertir tales fuerzas de atracción y pueden posibilitar una fuerza de repulsión entre una superficie y los átomos y/o las moléculas en un fluido que fluye más allá de la superficie. Las realizaciones de metamaterial según se da a conocer en el presente documento en el sistema y método de uso del mismo tienen una permeabilidad magnética que es sensible a la inversión de tales fuerzas de atracción a unas frecuencias específicas del espectro electromagnético para crear la fuerza de repulsión. El metamaterial tiene preferiblemente una respuesta de permeabilidad magnética a unas frecuencias en el intervalo de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz a pesar de que se contempla una respuesta de permeabilidad magnética a unas frecuencias fuera del presente intervalo. El metamaterial genera la fuerza de repulsión entre la superficie y la corriente de fluido circundante tal como una corriente de aire o una corriente de líquido de una forma que reduce la resistencia viscosa del fluido sobre la superficie.

En una realización, el metamaterial tiene preferiblemente un valor absoluto de la permeabilidad magnética  $\mu(\omega)$  de hasta aproximadamente 25 (es decir,  $-25 \leq \mu(\omega) \leq 25$ ) a pesar de que el metamaterial puede tener un valor absoluto de permeabilidad magnética que es más grande que 25. La permeabilidad magnética tal como se describe en el presente documento es un parámetro adimensional y hace referencia a la permeabilidad del material en relación con la permeabilidad absoluta del vacío (es decir,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Newtons por metro<sup>2</sup>). En una realización más preferible, el metamaterial puede tener una permeabilidad que se encuentra dentro del intervalo de desde aproximadamente 5 hasta aproximadamente 15 (en valor absoluto). El metamaterial tiene preferiblemente una permeabilidad magnética que es más grande que un valor absoluto de la permitividad eléctrica del metamaterial por hasta un factor de aproximadamente 10 o más grande a unas frecuencias en el intervalo de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz a pesar de que las propiedades preferidas de permeabilidad y permitividad pueden tener lugar a unas frecuencias por encima y por debajo del intervalo de frecuencias preferido.

Además, el metamaterial tiene un valor absoluto de permeabilidad magnética que es más grande que el valor absoluto de permitividad por cualquier factor, incluyendo factores más grandes que 10. Un metamaterial que tiene una permeabilidad magnética de aproximadamente  $-15$  y una permitividad eléctrica de aproximadamente 1,5 (es decir, una diferencia por un factor de 10) puede dar como resultado un potencial de repulsión entre el metamaterial (por ejemplo, aplicado a o incorporado en una superficie) y un átomo/ molécula de un fluido en las proximidades de la superficie. Los metamateriales que tienen las propiedades que se describen anteriormente de la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica son efectivas en la generación de la fuerza de repulsión entre el metamaterial y un fluido que fluye por encima de la superficie para un conjunto dado de parámetros de material, tal como se describe en mayor detalle a continuación.

Los metamateriales según se da a conocer en el presente documento pueden configurarse (por ejemplo, nanofabricarse) adicionalmente para tener una permeabilidad magnética negativa y pueden mostrar un comportamiento de resonancia magnética negativa (es decir, un aumento en la magnitud de la permeabilidad) a ciertas longitudes de onda. La permeabilidad es más grande que la permitividad del metamaterial por un factor de 10 o superior para producir un potencial de repulsión. Un metamaterial nanoestructurado que tiene un espesor  $\delta$  puede caracterizarse como que tiene un índice de refracción efectivo que se expresa como  $n = n' + in''$  y una impedancia efectiva que se expresa como  $\eta = \eta' + i\eta''$ . En el presente caso,  $n'$  e  $in''$  son los índices de refracción reales e imaginarios, respectivamente, del índice de refracción efectivo  $n$ . De forma similar,  $\eta'$  e  $i\eta''$  son las impedancias real e imaginaria, respectivamente, de la impedancia efectiva  $\eta$ .

El documento de Yuan indica que para obtener tales parámetros (es decir, el índice de refracción efectivo  $n$  y la impedancia efectiva  $\eta$ ), los valores complejos de los campos reflejado y transmitido pueden obtenerse a través de la experimentación y/o a través de una simulación. Además de tener un índice de refracción efectivo  $n$  y una impedancia efectiva  $\eta$ , una película delgada de un metamaterial nanoestructurado puede caracterizarse por su permitividad efectiva  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  y su permeabilidad  $\mu = \mu' + i\mu''$  que puede definirse como  $\epsilon = n/\eta$  y  $\mu = n\eta$ . En el presente caso,  $\epsilon'$  e  $i\epsilon''$  son, respectivamente, la permeabilidad real e imaginaria de la permeabilidad efectiva  $\epsilon$ . De forma similar,  $\mu = \mu' + i\mu''$  son, respectivamente, la permitividad real e imaginaria de la permeabilidad efectiva  $\mu$ .

Los metamateriales de índice negativo (NIM) tienen una permitividad eléctrica negativa y una permeabilidad negativa y los expertos en la técnica pueden hacer referencia a los mismos como que tienen un electromagnetismo a izquierdas según se da a conocer en el documento de Yuan. También puede hacerse referencia a los NIM como materiales a izquierdas y pueden mostrar un comportamiento magnético resonante a unas longitudes de onda que se encuentra dentro de la región de  $10^{14}$  a  $10^{16}$  Hz. El documento de Yuan indica que la resonancia magnética en un NIM de este tipo incluye una parte real del índice de refracción efectivo que es negativa o bien a través de la

condición fuerte  $\mu' < 0$  y  $\epsilon' < 0$  o a través de una condición más general  $\epsilon'\mu'' + \mu'\epsilon'' < 0$ .

En una realización que se da a conocer en el presente documento, un metamaterial puede fabricarse para tener una permeabilidad magnética suficiente para efectuar una inversión de la fuerza de atracción de van der Waals (o una inversión de la fuerza de atracción de Casimir–Polder–Lifshitz). El metamaterial puede fabricarse de acuerdo con los principios de las realizaciones que se dan a conocer en el presente documento y puede reducir, eliminar y/o invertir tales fuerzas de atracción y puede posibilitar una fuerza de repulsión. El metamaterial y el sistema de uso del mismo pueden configurarse para invertir la fuerza de atracción de van der Waals o cuántica entre el fluido y la superficie para reducir la resistencia viscosa entre los mismos. De esta forma, el metamaterial puede generar la fuerza de repulsión entre una superficie y los átomos y/o las moléculas en un fluido que fluye más allá de la superficie. Tal como se indica anteriormente, un metamaterial de este tipo puede caracterizarse también como un metamaterial a izquierdas. Un potencial de repulsión puede generarse en las proximidades de una superficie para unos materiales de superficie que tienen unas respuestas magnéticas y eléctricas apropiadas.

Para un átomo que se dispone delante de una placa magneto–dieléctrica que se modela mediante un semiespacio semi–infinito, el potencial de van der Waals  $U(z_A)$  puede determinarse usando la ecuación según sigue:

$$U(z_A) = \frac{\hbar\mu_0}{8\pi^2} \int_0^\infty du u^2 \alpha^{(0)}(iu) \int_0^\infty dq \frac{q}{b} e^{-2bs_A} \times \left[ \frac{\mu(iu)b - b_M}{\mu(iu)b + b_M} - \left( 1 + 2 \frac{q^2 c^2}{u^2} \right) \frac{\epsilon(iu)b - b_M}{\epsilon(iu)b + b_M} \right]$$

En la ecuación anterior, la permitividad eléctrica y la permeabilidad (paramagnética) pueden modelarse, respectivamente, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{\omega_{Pe}^2}{\omega_{Te}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_e}, \quad \mu(\omega) = 1 + \frac{\omega_{Pm}^2}{\omega_{Tm}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_m},$$

$$b_M \leftrightarrow \sqrt{\frac{u^2}{c^2} [\epsilon(iu)\mu(iu) - 1] + b^2}, \quad \sqrt{\frac{u^2}{c^2} + q^2} \equiv b,$$

En la expresión anterior:

- $U(z_A)$  representa el potencial de van der Waals en el que  $z$  es la distancia del átomo/ molécula (indicada por el subíndice A) a partir de la superficie;
- $h$  = constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  julios/s);
- $\mu_0$  = permeabilidad absoluta del vacío ( $4\pi \times 10^{-7}$  Newtons/metro<sup>2</sup>);
- $\pi$  = constante (3,14);
- $u$  = variable de resolución de la integral;
- $\alpha^{(0)}(iu)$  = polarizabilidad de estado fundamental del átomo/ molécula (se describe a continuación);
- $q$  = variable de resolución de la integral;
- $e$  = constante (2,718);
- $\mu(iu)$  = permeabilidad como una función de la frecuencia imaginaria;
- $\epsilon(iu)$  = permitividad como una función de la frecuencia imaginaria;
- $\mu(\omega)$  = permeabilidad efectiva del metamaterial;
- $\epsilon(\omega)$  = permitividad efectiva del metamaterial;
- $\omega_{Pm}$  y  $\omega_{Tm}$  = frecuencias magnéticas fijas del metamaterial;
- $\gamma_m$  = ganancia (/pérdida) de absorción magnética del metamaterial;
- $i\omega\gamma_m$  = pérdida magnética imaginaria del metamaterial;
- $\omega_{Pe}$  y  $\omega_{Te}$  = frecuencia eléctrica fija del metamaterial;
- $\gamma_e$  = ganancia (/pérdida) de absorción eléctrica del metamaterial;
- $i\omega\gamma_e$  = pérdida eléctrica imaginaria del metamaterial; y
- $\omega$  = frecuencia asociada con la permitividad y la permeabilidad  $\mu$ .

Una fuerza de repulsión adecuada  $\tilde{U}$  entre el átomo/ molécula y la superficie puede generarse cuando se cumple la siguiente condición:

$$U/KT = \tilde{U} > 1$$

en la que:

U = potencial de van der Waals (por ejemplo,  $U(z_A)$ );  
 k = constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  julios/Kelvin); y  
 T = temperatura en Kelvin.

En el ejemplo que se muestra en las figuras 1A y 1B, un metamaterial que tiene una respuesta magnética fuerte en relación con una respuesta eléctrica más débil en la región óptica puede caracterizarse por los parámetros  $\omega_{Pm}$ ,  $\omega_{Tm}$ ,  $\gamma_m$  y los parámetros  $\omega_{Pe}$ ,  $\omega_{Te}$ ,  $\gamma_e$ , en los que:  $\omega_{Pm}$  y  $\omega_{Tm}$  son las frecuencias magnéticas;  $\gamma_m$  es la ganancia (/pérdida) de absorción magnética del metamaterial;  $\omega_{Pe}$  y  $\omega_{Te}$  son las frecuencias eléctricas; y  $\gamma_e$  es la ganancia (/pérdida) de absorción eléctrica del metamaterial. En el ejemplo que se muestra en las figuras 1A y 1B, un metamaterial puede tener unos valores aproximados para los parámetros que se describen anteriormente según sigue:  $\omega_{Pm} = 1,0e15$ ,  $\omega_{Tm} = 2,5e15$ ,  $\gamma_m = 1,0e14$ ,  $\omega_{Pe} = 1,0e14$ ,  $\omega_{Te} = 2,5e15$ , y  $\gamma_e = 1,0e14$ . Los metamateriales pueden fabricarse para tener una amplia variedad de tales parámetros y pueden mostrar una respuesta magnética fuerte en relación con una respuesta eléctrica más débil en la región óptica suficiente para generar el potencial de repulsión. Tal como se indicó anteriormente, la respuesta de permeabilidad magnética se encuentra preferiblemente en el intervalo de 5 a 15 (en valor absoluto) o más grande y es más grande que el valor absoluto de la respuesta de permitividad eléctrica por un factor de hasta 10 o más grande. Tales parámetros pueden dar como resultado la generación de la fuerza de repulsión entre una superficie del metamaterial y un átomo/ molécula en un fluido ubicado en las proximidades de la superficie.

En un ejemplo, el fluido puede estar compuesto por agua que se encuentra en las proximidades de la superficie tal como, por ejemplo, agua que fluye más allá, o alrededor, de una pala de hélice tal como la de una bomba. El átomo/ molécula puede formar una parte del agua que se encuentra en las proximidades, o que está fluyendo más allá, de la superficie de la pala de hélice. La pala de hélice puede incluir el metamaterial que puede aplicarse a la superficie de la pala o que puede estar integrado, o estar incorporado de otro modo en, la superficie. El metamaterial puede tener unos valores para  $\omega_{Pm}$ ,  $\omega_{Tm}$ ,  $\gamma_m$  y unos parámetros  $\omega_{Pe}$ ,  $\omega_{Te}$ ,  $\gamma_e$ , que dan como resultado la generación de la fuerza de repulsión entre el átomo/ molécula y la superficie. Como resultado de la fuerza de repulsión que actúa entre la superficie y el fluido circundante, puede reducirse la resistencia viscosa del fluido sobre la superficie.

De esta misma forma, el metamaterial puede aplicarse a cualquier superficie para su uso en cualquier medio fluido, incluyendo medios gaseosos y líquidos y combinaciones de los mismos. Por ejemplo, el metamaterial puede aplicarse a, o estar integrado en, cualquier superficie de cualquier vehículo u objeto que se desplaza a través de la atmósfera con el fin de reducir la resistencia de fluido viscoso entre la superficie del vehículo u objeto y el medio aéreo y/o líquido de la atmósfera. De forma similar, el metamaterial puede aplicarse a, o estar integrado en, cualquier objeto por encima del cual el fluido se mueve en relación con el objeto, incluyendo objetos o vehículos estacionarios u objetos o vehículos en movimiento.

Una etapa en el cálculo del potencial de repulsión es evaluar un valor de polarizabilidad del átomo/ moléculas en el fluido. Haciendo referencia a la figura 2, se muestra un ejemplo de la polarizabilidad frente a la frecuencia imaginaria para agua para el que un programa de software puede usarse para calcular una aproximación de un valor de polarizabilidad de acuerdo con una realización de la divulgación. Tal como se indicó anteriormente, el agua puede (es decir, fluido) puede encontrarse en las proximidades de la superficie o que puede moverse en relación con la superficie a la cual se aplica, o en la que se integra, el metamaterial. La aplicación del metamaterial a la superficie puede dar como resultado el establecimiento de un potencial de repulsión entre la superficie y los átomos/ moléculas del agua que se encuentran en las proximidades de la superficie. El potencial de repulsión puede dar como resultado una fuerza de repulsión entre la superficie y los átomos/ moléculas que constituye el fluido (por ejemplo, agua) para reducir la fricción viscosa entre la superficie y el fluido. A pesar de que la presente realización se muestra para agua, pueden usarse también otros fluidos (es decir, gases y líquidos) incluyendo aire (por ejemplo, oxígeno y nitrógeno) de una forma similar.

El proceso de cálculo del potencial de repulsión requiere la evaluación de la polarizabilidad de estado fundamental del átomo (molécula) en el orden de no desvanecimiento más bajo de la teoría de perturbación que se da en la forma de desarrollo en serie que se da a conocer a continuación como la ecuación (3) en la página 3 del documento de Buhmann:

$$\alpha^{(0)}(\omega) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{2}{3\hbar} \sum_k \frac{\omega_{k0}}{\omega_{k0}^2 - \omega^2 - i\omega\epsilon} |\mathbf{d}_{0k}|^2$$

en la que:

$\alpha^{(0)}(\omega)$  = polarizabilidad de estado fundamental de un átomo/ molécula;  
 h = constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  julios/s);  
 $\omega_{k0}$  = frecuencia de transición atómica;

$\omega$  = frecuencia asociada con un valor de polarizabilidad;  
 $i\omega$  = pérdida imaginaria; y  
 $d_{ok}$  = elemento de matriz de transición de dipolo eléctrico atómico.

5 En un ejemplo, un valor de polarizabilidad puede determinarse usando el programa de software que se menciona anteriormente titulado "General Atomic and Molecular Electronic Structure System" (GAMESS) y que se describe por M. W. Schmidt y col., J. Compu. Chem. 14(11) 1347 (1993), como un programa *ab initio* que facilita unos cálculos *ab initio* que tratan todos los electrones de forma explícita u omiten orbitales de núcleo a través del uso de potenciales de núcleo efectivos. La representación gráfica de la figura 2 que ilustra un valor de polarizabilidad del agua frente a la frecuencia de longitud de onda imaginaria ( $i\omega$ ) puede calcularse usando el programa de software GAMESS y representarse de forma gráfica tal como se muestra en la curva denominada "Hessiana de GAMESS". En la gráfica de la figura 2 se muestra también una representación gráfica denominada como "Ajuste por desarrollo en serie" que se genera usando los parámetros de ajuste por desarrollo en serie en la ecuación para alfa en el documento de Buhmann, en la página 3. La representación gráfica a modo de ejemplo de la figura 2 usa los siguientes parámetros de ajuste por desarrollo en serie: ( $\omega_{k0} = 4,0e16$  radianes/segundo;  $d_{k0} = 2,0e-24$  Culombio-metros; y  $\epsilon = 0,1$   $\omega_{k0}$  radianes/segundo, a pesar de que puede usarse una amplia variedad de parámetros de ajuste por desarrollo en serie diferentes para determinar un valor de polarizabilidad. Una vez que se ha determinado, un valor de polarizabilidad (es decir,  $\alpha^{(0)}(\omega)$ ) puede insertarse en la ecuación para determinar el potencial de van der Waals  $U(z_A)$  para el metamaterial tal como se describe anteriormente y a lo que se hace referencia como la ecuación (27) del documento de Buhmann.

La figura 3 ilustra el potencial de van der Waals normalizado frente a la distancia ( $z_A$ ) de los átomos/ moléculas de agua a partir de una pared o superficie que tiene un metamaterial en una realización aplicado a la misma o integrado en la superficie. De forma más específica, la gráfica de la figura 3 ilustra unas variaciones en el potencial de repulsión entre la superficie del metamaterial y agua que tienen lugar como una función de las variaciones en la respuesta eléctrica  $\epsilon$  de acuerdo con una realización. Por ejemplo, la figura 3 muestra el potencial normalizado para un metamaterial que se caracteriza por los parámetros  $\omega_{pm} = 1,0e15$ ,  $w_{tm} = 2,5e15$ ,  $\gamma_m = 1,0e14$  y que tiene una permeabilidad  $\mu = (3,0, 4,0)$ , en la que 3,0 y 4,0 son las partes real e imaginaria, respectivamente, de la permeabilidad  $\mu$ .

Las variaciones en el potencial de repulsión pueden verse con referencia a unas curvas 10, 12 y 14. La curva 10 es una representación gráfica del potencial normalizado como una función de la distancia  $z_A$  a partir de la superficie del metamaterial (por ejemplo, una pared) para la permitividad  $\epsilon = (1,1, 0,16)$  en la que 1,1 y 0,16 son las partes real e imaginaria, respectivamente, de la permitividad  $\epsilon$ . La curva 12 es una representación gráfica del potencial normalizado para la permitividad  $\epsilon = (1,01, 0,04)$  mientras que la curva 14 es una representación gráfica del potencial normalizado para la permitividad  $\epsilon = (1,001, 0,00)$ . Tal como puede verse en la figura 3, a pesar de que el potencial normalizado aumenta en las curvas 10 y 12 con unas disminuciones en la permitividad  $\epsilon$ , el potencial normalizado de la curva 14 pasa a 0 para una disminución relativamente pequeña en la permitividad  $\epsilon = (1,01, 0,04)$  en comparación con la permitividad asociada con las curva 10 y 12. A este respecto, la figura 3 ilustra que el potencial normalizado es sensible a la respuesta eléctrica (es decir, el valor de la permitividad  $\epsilon$ ) para un valor dado de la permeabilidad  $\mu$ . En ese sentido, puede verse que la respuesta eléctrica (es decir, la permitividad  $\epsilon$ ) de un metamaterial dado con respecto a un fluido (por ejemplo, agua) ha de optimizarse con respecto a la respuesta magnética (es decir, la permeabilidad  $\mu$ ) con el fin de maximizar el potencial de repulsión.

Haciendo referencia a la figura 4A, se muestra una ilustración en forma de diagrama de un metamaterial nanofabricado simulado 20 de acuerdo con una realización de la presente divulgación. El metamaterial 20 puede comprender unas nanovarillas de plata 22 que están separadas a una distancia dada y dimensionadas y configuradas con el fin de proporcionar una respuesta resonante de permeabilidad magnética. En la realización del metamaterial a modo de ejemplo 20, las nanovarillas 22 pueden tener un diámetro "d" de entre aproximadamente 8–12 nanómetros (nm) y una separación de centro a centro "s" de entre aproximadamente 32–40 nm y una profundidad "h" de un tamaño adecuado. Más preferiblemente, las nanovarillas 22 pueden tener un diámetro "d" de aproximadamente 10 nm y una separación "s" de aproximadamente 36 nm. Las nanovarillas 22 pueden estar montadas sobre o formarse en una sola pieza con un sustrato que puede comprender la superficie. De forma opcional, el sustrato puede comprender un componente separado tal como un añadido que puede aplicarse a, o estar incorporado en, la superficie. Tal como puede verse, la realización del metamaterial 20 simulado de la figura 4A muestra una frecuencia magnética resonante  $\omega$  de aproximadamente  $5,03e15$  radianes/segundo a una longitud de onda  $\lambda$  de aproximadamente  $0,375$  micras ( $\mu\text{m}$ ) con una permeabilidad magnética de  $-20$  tal como se muestra en la figura 4B y tal como se describe en mayor detalle a continuación. A este respecto, la figura 4A ilustra que un metamaterial 20 configurado para generar un potencial de repulsión puede mostrar una frecuencia resonante  $\omega$  a una longitud de onda o intervalo de longitudes de onda dado.

A pesar de que el metamaterial 20 en la figura 4A se muestra como una disposición de varillas de plata que están separadas que tienen una forma en general cilíndrica, se contemplan una variedad de formas, configuraciones y tamaños alternativos. Por ejemplo, el metamaterial 20 puede estar compuesto por unas nanopartículas 26 que pueden proporcionarse en una variedad de disposiciones y que pueden configurarse en una variedad de formas incluyendo, sin limitación, esferas, prismas y otras formas ortogonales y que puede colocarse en una relación de



separación de unos con respecto a otros sobre un sustrato 32 o sobre la superficie. Las esferas, varillas, prismas u otras formas geométricas pueden disponerse en un patrón lineal o en un patrón de matriz o en cualquier otro patrón bidimensional y/o tridimensional adecuado que pueda aplicarse a un sustrato 32 o superficie. Además, los metamateriales 20 pueden fabricarse de cualquier número de diferentes materiales, incluyendo materiales metálicos y no metálicos y/o combinaciones de los mismos.

La figura 4C ilustra una disposición ordenada de nanoesferas 24 de diámetro "d" y dispuestas con una separación "s". El tamaño, la separación y la composición de material de las nanoesferas 24 puede configurarse para proporcionar una respuesta magnética resonante a un intervalo de frecuencias similar a la respuesta magnética resonante del metamaterial 20 de la figura 4A, caso en el que la respuesta del mismo se ilustra en la figura 4B tal como se describe a continuación. No obstante, el metamaterial 20 puede estar formado en cualquier configuración adecuada y en cualquier tamaño y forma y de cualquier material o combinaciones de los mismos que dé como resultado unas propiedades de permeabilidad y permitividad suficiente para establecer un potencial de repulsión.

El metamaterial 20 se configura preferiblemente de forma específica para tener un valor absoluto de permeabilidad de hasta aproximadamente 25 o más grande en las frecuencias de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz, a pesar de que se contemplan otras frecuencias. En una realización más preferible, el metamaterial 20 puede tener una permeabilidad de entre aproximadamente 5 y 15. El valor absoluto de permeabilidad es más grande que el valor absoluto de permitividad por un factor de hasta aproximadamente 10. Los parámetros del metamaterial 20 son preferiblemente de tal modo que una fuerza de repulsión  $\bar{U}$  entre el átomo/ molécula de un fluido próximo a la superficie se genera cuando  $U/kT = \bar{U} > 1$  tal como se describió anteriormente.

Haciendo referencia a la figura 4B, se muestra una representación gráfica de la parte real de la permeabilidad magnética  $Re(\mu)$  como función de la frecuencia omega  $\omega$  (rad/s) para ilustrar la respuesta magnética para el metamaterial a modo de ejemplo 20 de la figura 4A. La representación gráfica de la permeabilidad  $\mu$  frente a la frecuencia ( $\omega$ ) ilustra una frecuencia resonante a  $\omega = 5,03e15$  que coincide con una frecuencia resonante del fluido ubicado próximo o adyacente a la superficie del metamaterial 20. Tal como puede verse, la permeabilidad magnética  $\mu$  es abruptamente negativa a la frecuencia resonante  $\omega = 5,03e15$  que ilustra la frecuencia resonante  $\omega$  del metamaterial 20 a la longitud de onda  $\lambda$  de aproximadamente 0,375 micras ( $\mu\text{m}$ ).

Haciendo referencia a la figura 5A, se muestra un ejemplo de un metamaterial de índice negativo (NIM) en el que tanto la permitividad eléctrica como la permeabilidad magnética tienen unos valores negativos. El metamaterial 20 de la figura 5A comprende una celda unidad formada sobre un sustrato 32 y que tiene una disposición ordenada de nanotiras de plata acopladas 28 de acuerdo con una realización que se da a conocer en el presente documento. Las figuras 5A–5C se toman a partir de la referencia de Yuan que se menciona anteriormente y que se titula "A Negative Permeability Material at Red Light", página 1078. El espesor de ambas nanotiras de plata 28 se representa por "t", mientras que "d" representa un espesor del separador de alúmina 30 que puede comprender óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en una realización a modo de ejemplo. La célula en la figura 5A tiene una anchura "w" de entre aproximadamente 120–160 nm y más preferiblemente 140 nm, un espesor "t" de entre aproximadamente 32–38 nm y más preferiblemente 35 nm, una profundidad "d" de entre aproximadamente 37–43 nm y más preferiblemente 40 nm, y una periodicidad "p" de entre aproximadamente 280–320 nm y más preferiblemente 300 nm en una dirección x y es de una longitud infinita en la dirección y. Puede considerarse que las nanotiras de plata 28 son infinitas en y y periódicas en x con un periodo p de acuerdo con una orientación x, y, z, que se muestra en la figura 5A.

La figura 5B es una gráfica que ilustra partes reales de la permitividad  $\epsilon'$  ( $Re(\mu)$  se muestra con trazo continuo) y la permeabilidad  $\mu'$  ( $Re(\omega)$  se muestra con trazo discontinuo) para la célula que se describe anteriormente de la figura 5A. Al representar de forma gráfica la permitividad  $\epsilon'$  ( $Re(\mu)$ ) y la permeabilidad  $\mu'$  para la célula, las constantes ópticas de la plata a granel se usan para las nanotiras 28 y el índice de refracción del sustrato 32 es 1,52. Tal como puede verse, la célula muestra una respuesta magnética (la permeabilidad  $\mu'$ ) negativa y una respuesta eléctrica (la permitividad  $\epsilon'$ ) negativa a una longitud de onda de aproximadamente 825 nm. No obstante, la célula muestra una respuesta magnética positiva lo bastante grande en relación con el valor absoluto de respuesta de permitividad a unas longitudes de onda de entre aproximadamente 825 nm y 850 nm de tal modo que un potencial de repulsión puede resultar. Tal como se indica anteriormente, una respuesta de este tipo es ilustrativa de una de una variedad de respuestas que muestran diferentes metamateriales, que puede dar como resultado una diferencia lo bastante grande entre la permeabilidad y la permitividad para generar un potencial de repulsión tal como el potencial de van der Waals  $U_A$  que se describe anteriormente. A este respecto, una amplia variedad de metamateriales que tienen una variedad de disposiciones estructurales alternativas y construidas de una variedad de composiciones de material alternativas con diferentes propiedades de material, puede dar como resultado una respuesta de permitividad y permeabilidad negativa (o positiva) en una variedad de longitudes de onda alternativas, de tal modo que la diferencia entre los valores absolutos de la permeabilidad y la permitividad es suficiente para establecer un potencial de repulsión.

La mitad izquierda de la figura 5C ilustra una sección actual real después de la fabricación de la celda unidad simulada de la figura 5A. La célula de la figura 5C tiene una forma en sección transversal trapezoidal con una anchura de debajo  $w_b$  y una anchura de arriba  $w_t$  y se forma sobre el sustrato 32 y que tiene una disposición ordenada de nanotiras de plata acopladas 28 separadas por un separador de alúmina 30 compuesto por óxido de

aluminio ( $Al_2O_3$ ). La mitad derecha de la figura 5C muestra que las líneas de campo B totales que se extienden entre las nanotiras inferior y superior 28 son opuestas al campo H incidente a la resonancia magnética. Las líneas de campo B representan la densidad de flujo magnético y el campo H representa la intensidad de campo magnético del campo magnético.

5 Para un metamaterial fabricado de acuerdo con cualquiera de las realizaciones según se da a conocer anteriormente o fabricado de otro modo, el metamaterial tiene una alta permeabilidad magnética (en valor absoluto) y una permitividad eléctrica baja (en valor absoluto). De forma más específica, el metamaterial tiene preferiblemente un valor absoluto de la permeabilidad magnética  $\mu(\omega)$  de hasta aproximadamente 25 (es decir,  $-25 \leq \mu(\omega) \leq 25$ ) a pesar de que el valor absoluto de la permeabilidad magnética puede ser más grande que 25. El metamaterial tiene una permitividad eléctrica que es más grande que un valor absoluto de la permitividad eléctrica del metamaterial por hasta un factor de aproximadamente 10 o más alto y a unas frecuencias preferiblemente en el intervalo de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz, a pesar de que se contemplan otras frecuencias.

15 Con tales parámetros, el metamaterial puede ser suficiente para generar la fuerza de repulsión entre el metamaterial sobre la superficie y el fluido que fluye por encima de la superficie. En una realización, el metamaterial puede configurarse como un añadido que puede unirse a una superficie tal como una superficie externa o superficie exterior de un ala de aeronave. No obstante, el metamaterial puede aplicarse a una variedad de superficies diferentes y para diferentes aplicaciones y usando un mecanismo de acoplamiento diferente y no se limita únicamente a la aplicación a través de unión a vehículos aéreos o álabes de turbina para reducir la resistencia viscosa de un fluido que pasa sobre los mismos.

25 La presente divulgación puede incluir también un método de reducción de la resistencia viscosa de un fluido que se mueve más allá de una superficie tal como por la aplicación de un metamaterial a la superficie. El método puede incluir la etapa de generar una fuerza de repulsión entre la superficie y el fluido usando un metamaterial tal como un metamaterial de índice negativo aplicado a o que se dispone de otro modo sobre la superficie. La etapa de generación puede incluir invertir la fuerza de Casimir–Polder–Lifshitz entre el material de índice negativo y los átomos/ moléculas del fluido. La etapa de generación puede también comprender invertir la fuerza de van der Waals entre el material de índice negativo y los átomos/ moléculas del fluido.

30 A este respecto, la etapa de generación puede incluir generar la fuerza de repulsión usando el metamaterial que tiene preferiblemente una respuesta magnética resonante relativamente fuerte (es decir,  $-25 \leq \mu(\omega) \leq 25$ ) para unas frecuencias en la región de  $10^{14}$  a  $10^{16}$  Hz en combinación con una respuesta de resonancia eléctrica relativamente débil a estas frecuencias tal como se describe anteriormente. La etapa de generación puede incluir además generar la fuerza de repulsión usando un metamaterial que tiene parámetros que dan como resultado un potencial de repulsión normalizado de por lo menos 1,0. El metamaterial puede caracterizarse por una variedad de diferentes parámetros incluyendo, pero sin limitarse a,  $(\omega_{Pm}, \omega_{Tm}, \gamma_m)$  y  $(\omega_{Pe}, \omega_{Te}, \gamma_e)$ , en los que:  $\omega_{Pm}$  y  $\omega_{Tm}$  son las frecuencias magnéticas fijas del metamaterial;  $\gamma_m$  es la ganancia (/pérdida) de absorción magnética del metamaterial;  $\omega_{Pe}$  y  $\omega_{Te}$  son las frecuencias eléctricas fijas del metamaterial; y  $\gamma_e$  es la ganancia (/pérdida) de absorción eléctrica del metamaterial tal como se describe anteriormente.

45 En una realización adicional, la divulgación puede incluir un método de reducción de la resistencia viscosa entre la superficie y el fluido formando un metamaterial a izquierdas y aplicando el metamaterial a la superficie, tal como uniendo un añadido a la misma o aplicando a, o integrando en, la superficie el metamaterial usando cualquier medio adecuado. El método puede comprender además mover la superficie en relación con el fluido en el que el metamaterial genera la fuerza de repulsión entre el metamaterial y el fluido.

50 La etapa de formar el metamaterial puede incluir evaluar la polarizabilidad de estado fundamental de un átomo/ molécula en el orden de no desvanecimiento más bajo de la teoría de perturbación que se da en una forma de desarrollo en serie tal como se describe anteriormente. La etapa de formar el metamaterial puede comprender la determinación de la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica necesarias para efectuar una inversión de la fuerza de atracción entre el fluido y la superficie, caso en el que la fuerza de atracción puede ser la fuerza de van der Waals.

55 Modificaciones y mejoras adicionales de la presente divulgación pueden ser evidentes para los expertos en la técnica. Por lo tanto, se pretende que la combinación particular de las partes que se describen y se ilustran en el presente documento represente sólo ciertas realizaciones de la presente divulgación y no se pretende que sirvan como limitaciones de realizaciones o dispositivos alternativos dentro del alcance de la divulgación.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema para reducir la resistencia viscosa de un fluido sobre una superficie, que comprende:

5 un metamaterial (20) que tiene una respuesta de permeabilidad magnética a un intervalo de frecuencias; en el que:

10 el metamaterial (20) está adaptado para disponerse sobre la superficie; y en el que el valor absoluto de la permeabilidad magnética es más grande que el valor absoluto de la permitividad eléctrica; y la permeabilidad magnética es suficiente para generar una fuerza de repulsión entre la superficie y el fluido para reducir la resistencia viscosa del fluido sobre la superficie.

15 2. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que:

las frecuencias se encuentran dentro del intervalo de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz.

3. El sistema de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que:

20 la permeabilidad magnética tiene un valor absoluto de hasta aproximadamente 25.

4. El sistema de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que:

25 el valor absoluto de permeabilidad magnética se encuentra dentro del intervalo de entre aproximadamente 5 y 15.

5. El sistema de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que:

30 el valor absoluto de la permeabilidad magnética es más grande que el valor absoluto de la permitividad eléctrica por un factor de hasta por lo menos 10.

6. El sistema en cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 5, en el que:

35 la fuerza de repulsión se representa por  $\tilde{U}$  y es más grande que 1, calculándose la fuerza de repulsión  $\tilde{U}$  de acuerdo con la fórmula:

$$\tilde{U} = U/kT > 1$$

40 en la que U representa el potencial de van der Waals, k representa la constante de Boltzmann y T representa la temperatura en Kelvin.

7. El sistema de cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 6, en el que:

45 la superficie está compuesta por al menos una de una superficie aerodinámica y una superficie hidrodinámica.

8. El sistema de acuerdo con la reivindicación 7, en el que:

50 la superficie aerodinámica comprende por lo menos uno de un ala de aeronave, una superficie de cola, una superficie de control, un fuselaje, una pala de hélice, un álabe de turbina.

9. El sistema en cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 8, en el que:

55 el metamaterial (20) se configura de tal modo que la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica del metamaterial (20) tienen unos valores negativos.

10. El sistema en cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 1–9, en el que:

60 el metamaterial (20) está compuesto por una disposición ordenada de nanopartículas (26) formadas sobre la superficie.

11. Un método de reducción de la resistencia viscosa de un fluido que se mueve en relación con una superficie, que comprende:

65 producir un movimiento relativo entre la superficie y el fluido; y generar una fuerza de repulsión entre la superficie y el fluido incorporando un metamaterial (20) en la superficie; y

teniendo el metamaterial el valor absoluto de su permeabilidad magnética más grande que el valor absoluto de su permitividad eléctrica.

5 12. El método de acuerdo con la reivindicación 11, en el que:  
la etapa de generación incluye generar la fuerza de repulsión a partir del metamaterial (20) que tiene una respuesta de permeabilidad magnética a un intervalo de frecuencias de entre aproximadamente  $10^{14}$  y  $10^{16}$  Hz.

10 13. El método de cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 11 o 12, en el que:  
la fuerza de repulsión se establece seleccionando el metamaterial (20) para tener un valor absoluto de permeabilidad magnética de hasta por lo menos 25.

15 14. El método de cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 11 a 13, en el que:  
la fuerza de repulsión se establece seleccionando el metamaterial (20) para tener una permeabilidad magnética en valor absoluto que es más grande que el valor absoluto de la permitividad eléctrica por un factor de hasta por lo menos 10.

20 15. El método en cualquiera de acuerdo con las reivindicaciones 11 a 14, en el que:  
la fuerza de repulsión del metamaterial (20) se establece seleccionando el metamaterial (20) para tener un potencial de repulsión U que es más grande que 1, calculándose la fuerza de repulsión  $\tilde{U}$  de acuerdo con la fórmula:

$$\tilde{U} = U/kT > 1$$

25 30 en la que U representa el potencial de van der Waals, k representa la constante de Boltzmann y T representa la temperatura en Kelvin.

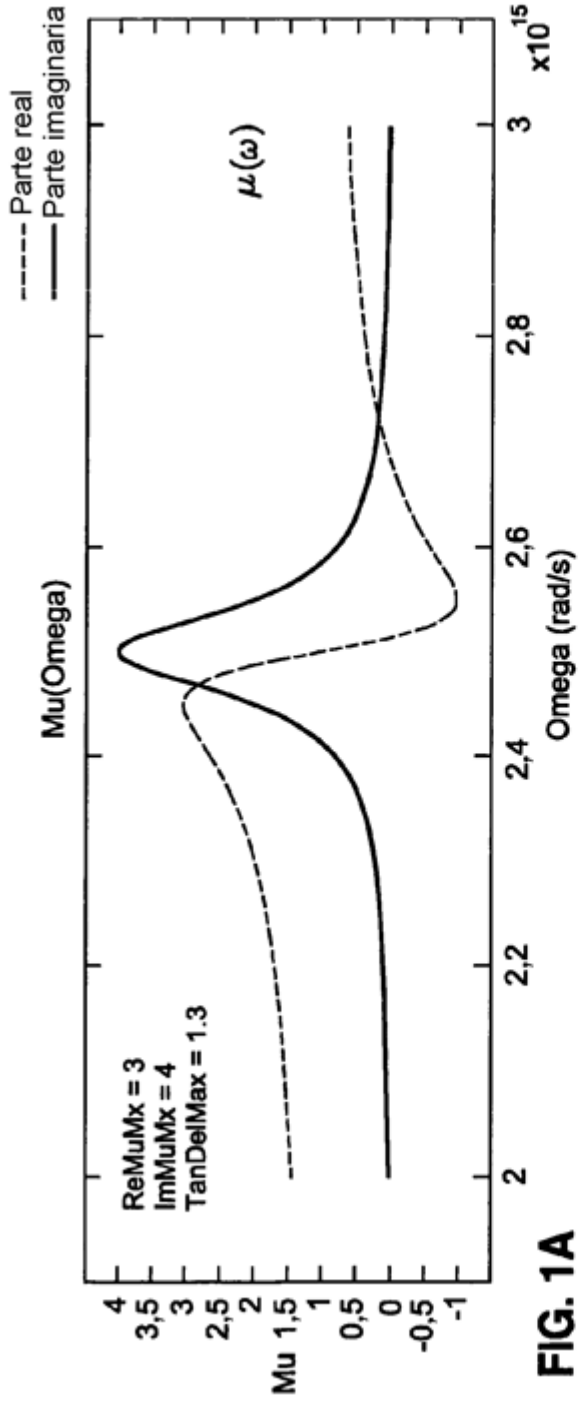


FIG. 1A

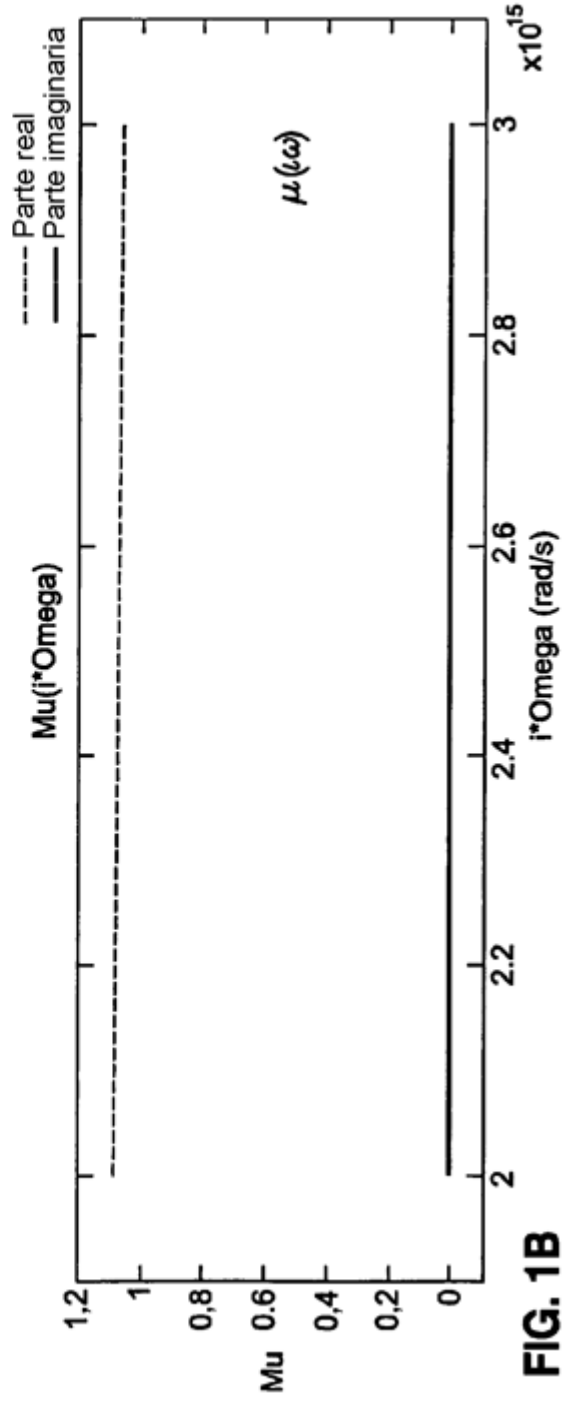


FIG. 1B

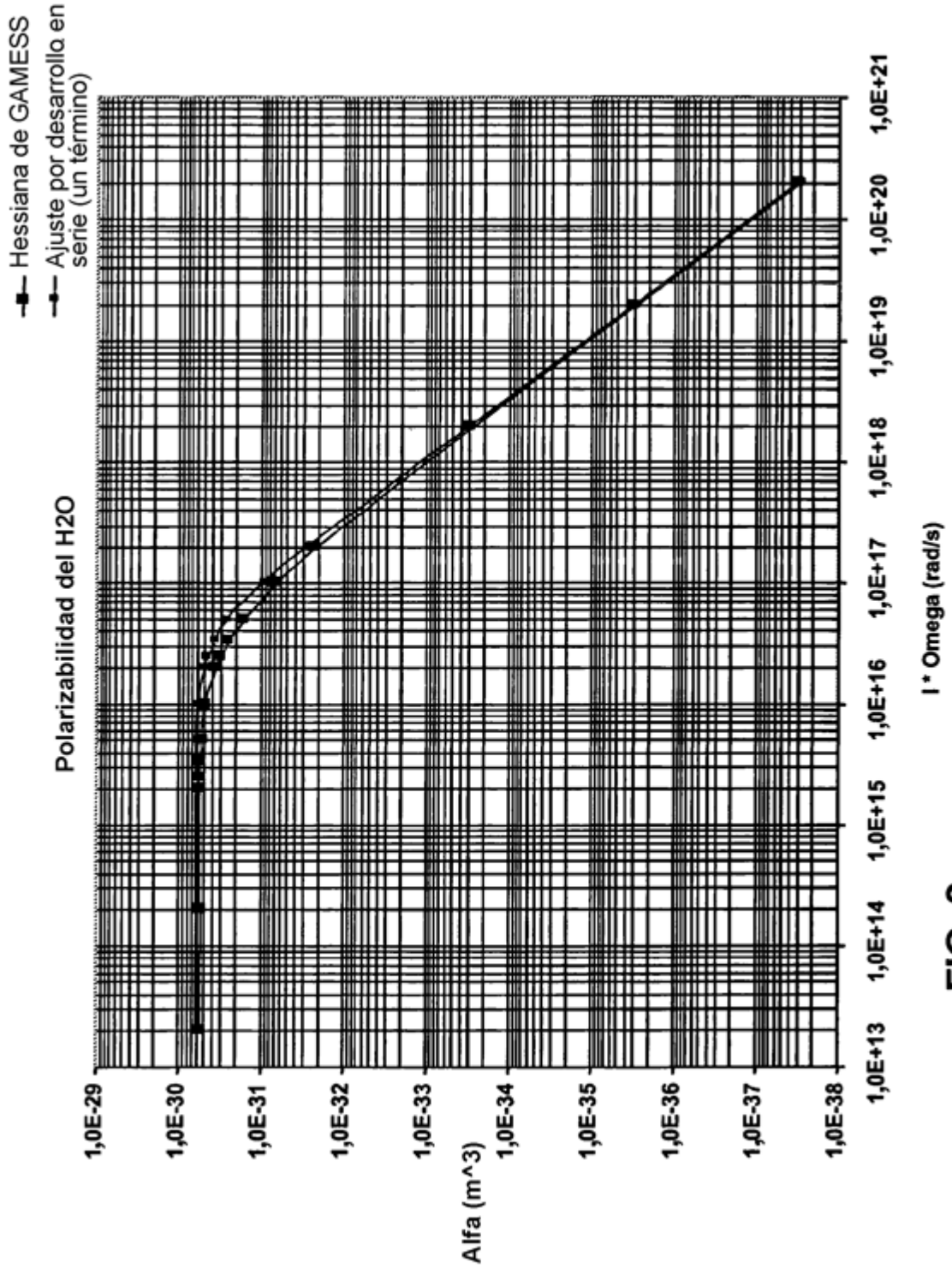


FIG. 2

Optimización del potencial de repulsión del agua

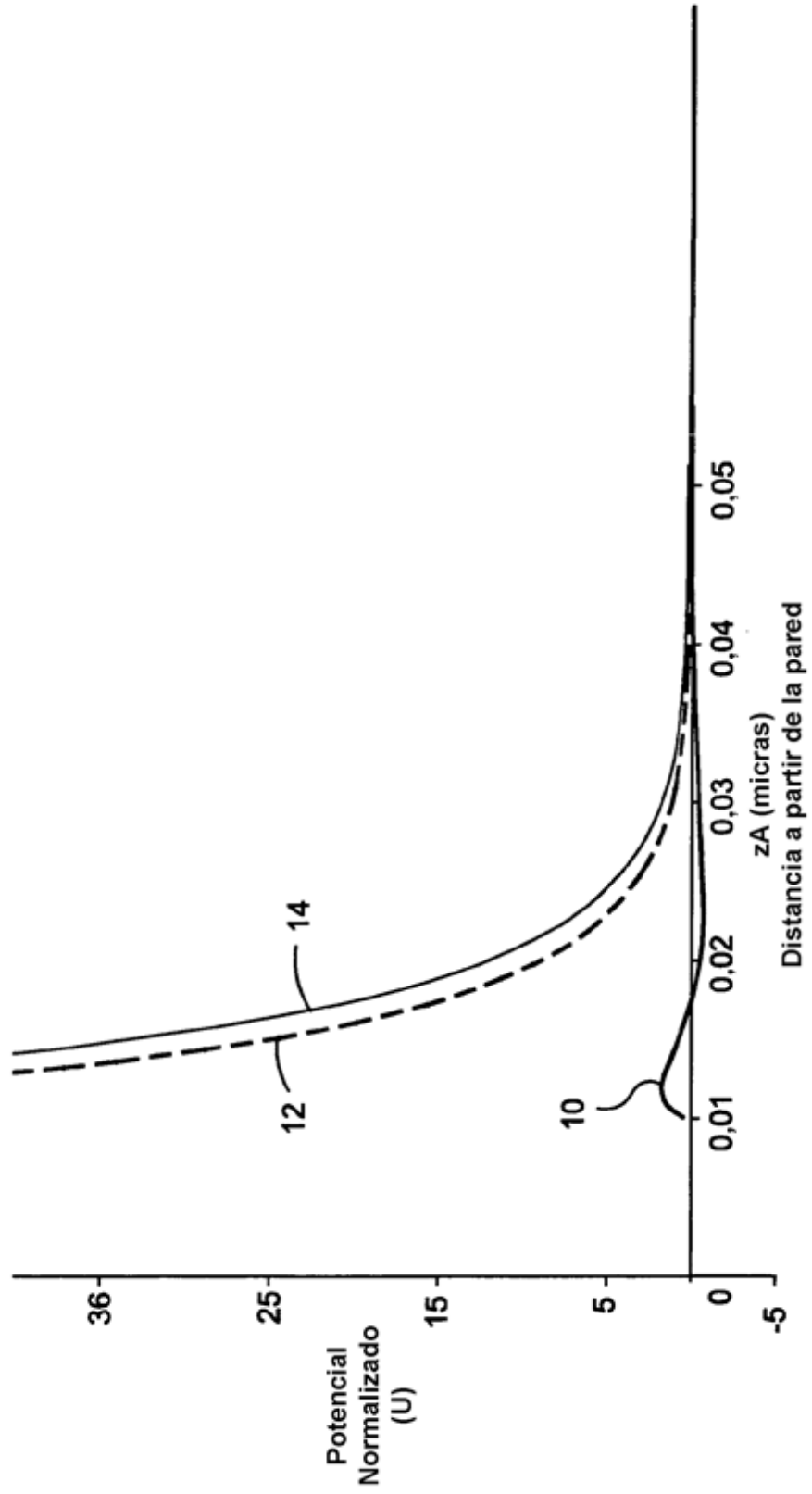


FIG. 3

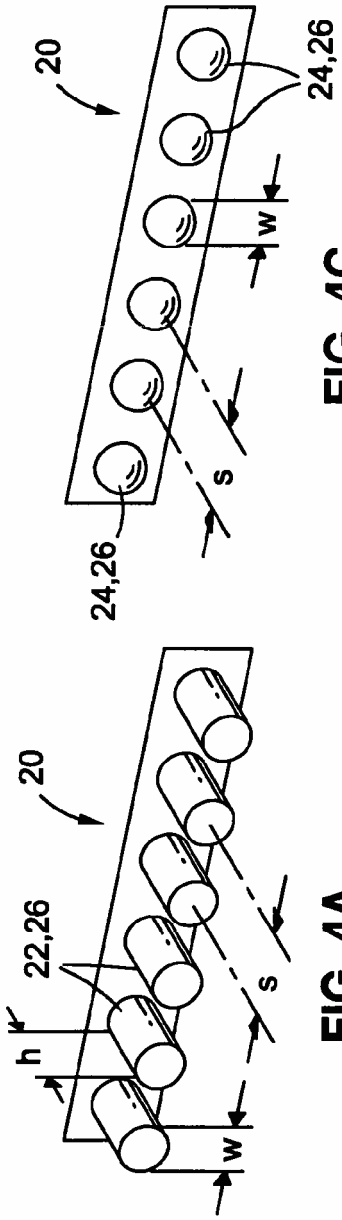


FIG. 4A

FIG. 4C

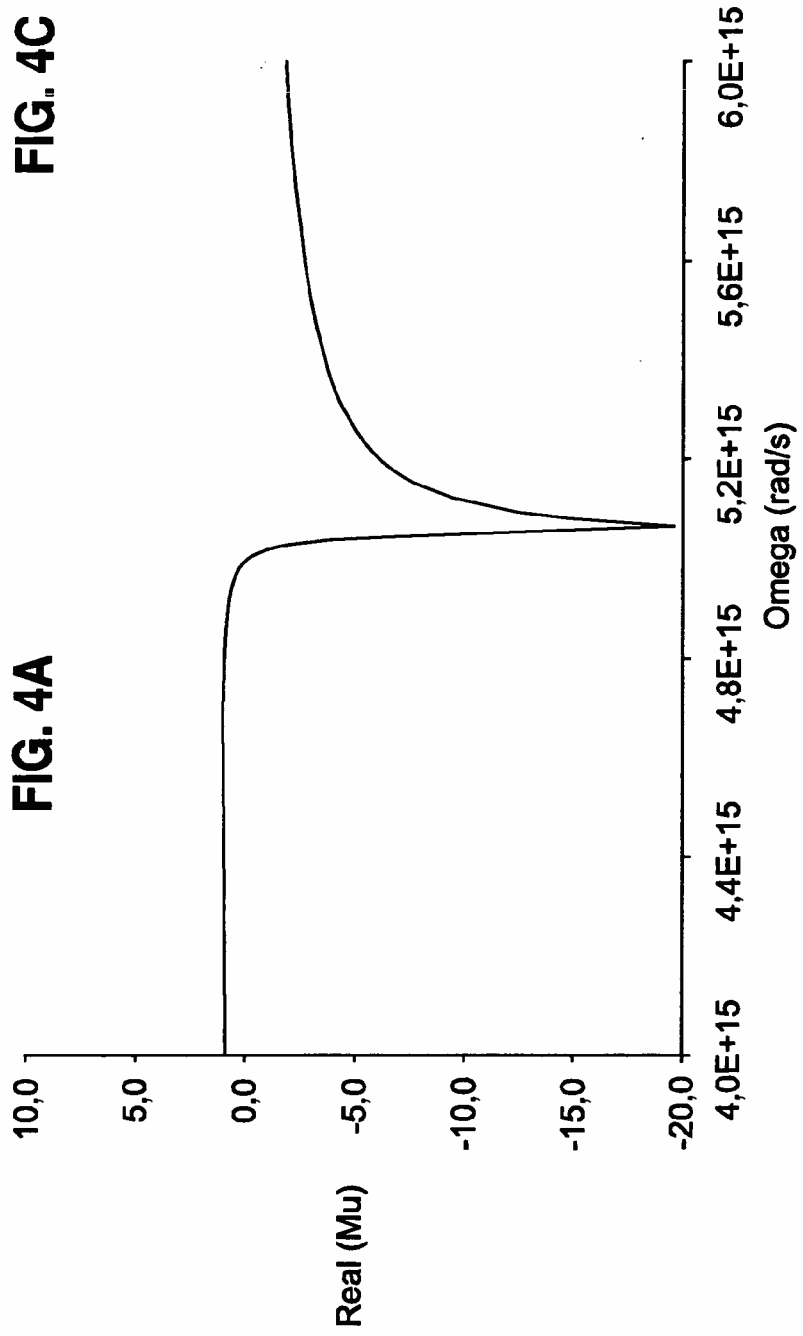


FIG. 4B



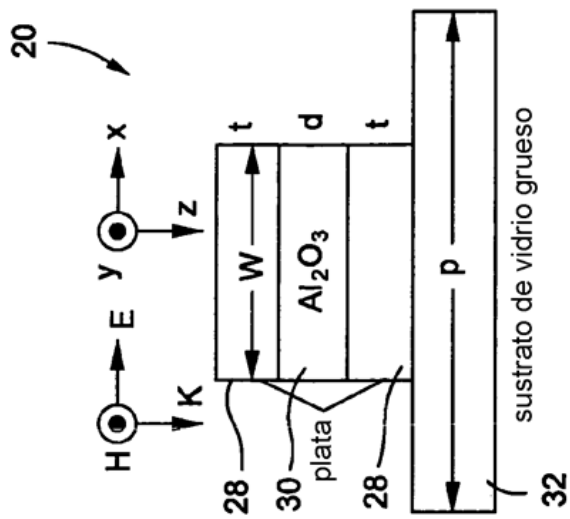


FIG. 5A

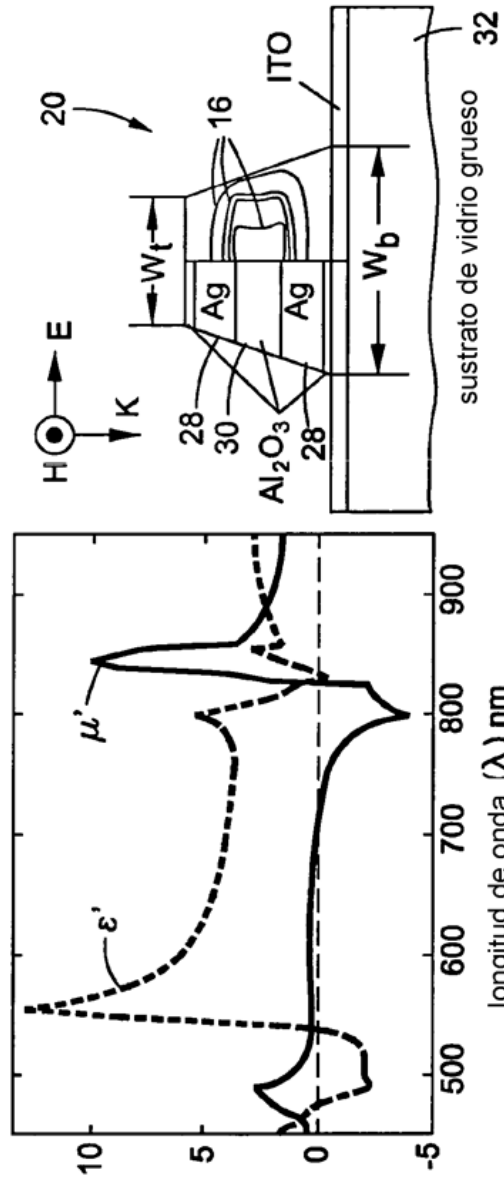


FIG. 5B

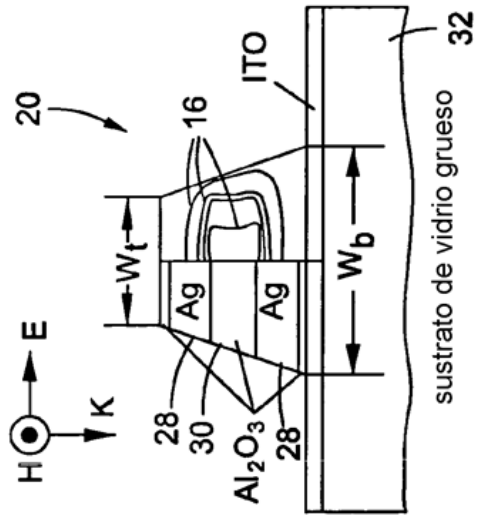


FIG. 5C