

MEMORIA DESCRIPTIVA DE LA PATENTE DE INVENCION

Sobre:

**“MÉTODO DE MEDICIÓN NO LINEAL PARA MEDIR
DEFORMACIONES MECÁNICAS DE MATERIALES Y
ESTRUCTURAS”**

Solicitada por:

Comisión Nacional de Energía Atómica

con domicilio en Av. Del Libertador 8250, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

&

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

con domicilio en Godoy Cruz 2290, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Inventores:

Julio César BENÍTEZ

Germán Roberto FERNÁNDEZ

Diego Fernando GROSZ

Nicolás Martín LINALE

Alexis Cristian SPARAPANI

Por el plazo de:

20 años

MÉTODO DE MEDICIÓN NO LINEAL PARA MEDIR DEFORMACIONES MECÁNICAS DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

- [1] La presente invención es una Solicitud de Patente Adicional a la Solicitud de Patente de Invención Argentina N° 20210102993 presentada el 28 de octubre de 2021, que se refiere a un método de medición no lineal para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras.

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

- [2] El campo técnico al cual pertenece la presente invención es el de estudio del comportamiento de los materiales, a través de la medición e identificación de deformaciones mecánicas de materiales y estructuras usando medios ópticos.

ESTADO DE LA TÉCNICA

- [3] El monitoreo de la salud de las grandes estructuras civiles (también conocido en inglés como “Structural Health Monitoring” o por sus siglas “SHM”) como puentes, edificios, tuberías de gas, etc., puede implementarse a partir de sensores de fibra óptica.
- [4] El área de los sensores ópticos ha sido una de las más importantes en el campo de la fotónica en las dos últimas décadas. En particular, los sensores distribuidos resultan adecuados para el monitoreo de grandes infraestructuras ya que permiten, con un único cable de fibra óptica y solo un interrogador, disponer de una vasta cantidad de puntos de medición distribuidos en toda la estructura. Este tipo de sensor proporciona información relativa a la temperatura y la deformación mecánica (también conocida en inglés como “strain”) de cada punto de la fibra, permitiendo la estimación de otras magnitudes físicas asociadas como, por ejemplo, la presión. Los sensores distribuidos de fibra óptica se basan en una modulación de la intensidad y/o de la frecuencia del campo eléctrico que se propaga en la fibra y en la utilización

de un esquema de detección síncrona, con la cual es posible determinar la posición en la que se produce una perturbación. En forma general, una modificación de la geometría de la fibra óptica produce un cambio detectable en las propiedades ópticas de los pulsos que se propagan en ella.

- [5] Otro sensor óptico utilizado en la industria para medir los parámetros físicos anteriormente nombrados, en forma puntual o distribuida, son las redes de Bragg basadas en fibra óptica (también conocidas en inglés como “Fiber Bragg Gratings” o por sus siglas “FBG”). El mismo tiene como objetivo poder detectar los corrimientos que sufre la longitud de onda de Bragg en función de los parámetros físicos a la cual se encuentra sometida la “FBG” (temperatura, deformación longitudinal, presión, radiación, etc.).
- [6] Como antecedente más relevante de la presente invención se tiene la patente N° [US8886001B2](#). Allí se describe un sensor óptico formado a partir de una guía de ondas óptica que tiene, al menos, un núcleo rodeado de una cubierta (más conocido en inglés como “cladding”) y una porción en forma de “D”. La deformación axial o de compresión a lo largo de la sección transversal en forma de “D” puede determinarse midiendo el cambio de polarización de la luz a la salida del sensor. Adicionalmente, puede disponerse una capa que responda a una magnitud física que se desee medir en la parte plana del sensor. El índice de refracción de la capa cambia y/o la capa aplica una tensión sobre el sensor en respuesta a cambios en la magnitud física de interés. Los cambios producidos en el índice de refracción de la capa alteran las propiedades de la luz a la salida del sensor, las cuales pueden medirse en función del tiempo y correlacionarse con el valor de la magnitud física que se desea conocer.
- [7] En dicho antecedente, se destaca que se remueve una sección del “cladding” de la guía de ondas óptica. No obstante, a diferencia del dispositivo de la presente invención, el sensor de dicho antecedente está formado por una sección en forma de “D”, la que, además, no se “decora” o recubre con un material de características ópticas sustantivamente diferentes. Por otra parte, dicho sensor se utiliza para medir una deformación axial o compresión, al igual que la presente invención, pero el principio de transducción es totalmente

diferente debido a que las deformaciones aplicadas en la sección en forma de “D” producen un cambio en el estado de polarización de la luz guiada. Mientras que, en la presente invención, la unidad de detección opera produciendo variaciones de la absorción (detección lineal) y del coeficiente no lineal (detección no lineal) al experimentar un esfuerzo mecánico, axial y/o de compresión, debidas a que el modo transversal eléctrico modifica su penetración en el material de recubrimiento. Además, la presente invención permite discriminar el tipo de esfuerzo mecánico experimentado (axial o compresión), un problema no contemplado en el antecedente US8886001B2.

- [8] La patente N° [CN103335741A](#) describe un sensor de temperatura de fibra óptica basado en grafeno, que se caracteriza porque en una sección de la fibra óptica, se establece un área de 1 a 3 cm de longitud como área de detección, cuyo “cladding” se retira parcialmente; la distancia más corta entre el revestimiento de fibra óptica y una interfaz de núcleo de fibra es de 1 a 3 μm ; se deposita una película de grafeno de reducción-oxidación en el área de detección de la fibra óptica, con un espesor de 10-30 μm . De acuerdo con la invención, se utiliza un efecto de absorción de luz termotrópica del grafeno para fabricar el sensor de temperatura y, por lo tanto, el sensor de temperatura tiene las ventajas de una alta velocidad de respuesta y alta sensibilidad.
- [9] En concreto, en dicho sensor se remueve un porcentaje del “cladding”, dicha sección removida se recubre con un material 2D (óxido de grafeno) y se utiliza para medir temperatura. Además de que la principal diferencia física de la presente invención es que se remueve la totalidad del “cladding”, el principio de transducción de dicho antecedente es totalmente diferente al de la presente invención debido a que los cambios de temperatura generan cambios en el efecto no lineal (Efecto Raman) que se produce por la interacción de la luz y el material 2D. En cambio, el dispositivo de la presente invención opera sobre el principio de las variaciones en la absorción (detección lineal) y el coeficiente no lineal (detección no lineal) producidas por los cambios en la penetración del modo propagante en el material de recubrimiento.

- [10] Por último, la patente N° [CN103868887A](#) describe un sensor de fibra óptica cónico basado en película de grafeno, el cual es de estructura simple, de tamaño pequeño y de alta sensibilidad, y se puede utilizar para realizar detecciones en línea y para el análisis en tiempo real de trazas de gases, líquidos, elementos químicos y ADN en los campos de la biología, la química, las ciencias médicas, etc.
- [11] Al igual que en los antecedentes mencionados anteriormente, existen diferencias tanto en la geometría como en el principio de funcionamiento, lo cual requiere un método de uso diferente. Ningún antecedente dentro del estado de la técnica resuelve el problema de medición de deformaciones mecánicas, axiales y/o de compresión, ni discrimina entre uno u otro esfuerzo mecánico.

OBJETO DE LA INVENCION

- [12] El objeto de la presente invención es un método de medición no lineal para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras, que utiliza el dispositivo de la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993, donde dicho método comprende los siguientes pasos: a) Ubicar al menos uno de dichos dispositivos de detección óptica en un material o estructura; b) Iluminar a dichos dispositivos con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (conocido por sus siglas en inglés, "OTDR", que hacen referencia a "Optical Time Domain Reflectometer") con pulsos de luz de intensidad, duración y longitud de onda conocidas; c) Ajustar el rango dinámico y la resolución de dicho "OTDR" hasta detectar el evento de cada una de dichas unidades de detección; d) Obtener la traza del "OTDR"; e) Monitorear variaciones en tiempo real en la absorción de los eventos del paso c); f) Iluminar a dichos dispositivos con una fuente de luz pulsada de intensidad, duración de pulso y longitud de onda conocidas; g) Medir el ancho espectral del pulso del paso f) a la salida de dichos dispositivos; h) Correlacionar la información obtenida mediante la medición distribuida lineal en dicho paso e) con la información no lineal del ancho espectral obtenida en dicho paso g); i) Obtener la magnitud de las

deformaciones mecánicas de dicho material o estructura; y j) Utilizar el ancho espectral de dicho paso g) y discriminar el tipo de esfuerzo aplicado a dicho material o estructura entre tracción y compresión.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[13] Para mayor claridad y comprensión del objeto de la presente invención, se presentan las siguientes figuras de un ejemplo de realización del método de la presente invención:

[14] Figura 1: Esquema del método de medición no lineal, del ejemplo de realización, que utiliza el dispositivo de detección óptica con unidades de detección con un segmento cada una.

[15] Figura 2: Gráfico del coeficiente no lineal relativo, $\Delta\gamma$, en función de los diferentes tipos de deformación (tracción y compresión), ϵ , para fibras con y sin material de recubrimiento (con tres capas de grafeno). Las líneas punteadas no son mediciones sino guías auxiliares.

[16] Figura 3: Gráfico del ancho espectral normalizado a los valores obtenidos de la fibra óptica sin "cladding" y sin material de recubrimiento. En este caso, los cambios en el coeficiente no lineal de la fibra cubierta con grafeno permiten la detección de deformaciones por transducción por el aumento del ancho espectral.

[17] Referencias en las Figuras:

(100) Dispositivo de detección óptica

(101) Guía de ondas óptica

(102) Núcleo

(103) "Cladding"

(104) Unidad de detección

(105) Material de recubrimiento

(200) Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo ("OTDR")

- (300) Fuente de luz pulsada
- (400) Acoplador óptico
- (500) Analizador de espectro óptico

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

[18] A continuación, se describe el método propuesto de la presente invención, que utiliza el dispositivo de detección óptica de la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993:

Descripción del método:

[19] El método de medición no lineal para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras comprende los siguientes pasos:

- a) Ubicar al menos uno de dichos dispositivos de detección óptica en un material o estructura;
- b) Iluminar a dichos dispositivos con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo ("OTDR") con pulsos de luz de intensidad, duración y longitud de onda conocidas;
- c) Ajustar el rango dinámico y la resolución de dicho "OTDR" hasta detectar el evento de cada una de dichas unidades de detección; esto es, que pueda detectar la absorción adicional producida por el o los segmentos que estén cubiertos por material de recubrimiento;
- d) Obtener la traza del "OTDR"; esto es, la absorción en función de la distancia;
- e) Monitorear variaciones en tiempo real en la absorción de los eventos del paso c);
- f) Iluminar a dichos dispositivos con una fuente de luz pulsada de intensidad, duración de pulso y longitud de onda conocidas, capaz de producir una respuesta no lineal de los segmentos cubiertos con dicho material de recubrimiento de dichas unidades de detección;
- g) Medir el ancho espectral del pulso del paso f) a la salida de dichos dispositivos;

- h) Correlacionar la información obtenida mediante la medición distribuida lineal (que permite identificar claramente la ubicación espacial de cada unidad de detección) en el paso e) con la información no lineal (ancho espectral) de dicho paso g), lo cual permite aumentar la sensibilidad;
- i) Obtener la magnitud de las deformaciones mecánicas de dicho material o estructura (esfuerzo de tracción y/o compresión), en cada segmento cubierto con material de recubrimiento de dichas unidades de detección de dichos dispositivos; y
- j) Utilizar el ancho espectral de dicho paso g) y discriminar con mayor sensibilidad entre esfuerzos mecánicos de tracción y de compresión en dichos dispositivos;

donde el paso f) puede llevarse a cabo después de los pasos b), c), d) y e) indistintamente; y

donde el paso f) puede llevarse a cabo al mismo tiempo que el paso b).

EJEMPLO DE REALIZACIÓN

[20] Para el método de medición no lineal descrito en la presente invención, se llevó adelante el siguiente ejemplo de realización:

[21] Se utiliza el dispositivo de detección óptica (100) para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras, reivindicado en la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993, que comprende:

- una fibra óptica convencional monomodo como guía de ondas óptica (101);
 - grafeno como material de recubrimiento (105);
- donde dicha fibra óptica (101) tiene una estructura geométrica de dos cilindros concéntricos, que comprende un núcleo (102) de sílice rodeado por un “cladding” (103);
- donde dicha fibra óptica (101) comprende un tramo que se denomina unidad de detección (104);

donde dicha unidad de detección (104) comprende un segmento, al que se le ha removido dicho “cladding”, y donde dicho núcleo de dicho segmento está cubierto por una película de dicho grafeno (105);
donde la absorción lineal de dicho grafeno (105) es 7 órdenes de magnitud mayor que la absorción lineal de dicha fibra óptica (101);
donde el índice de refracción no lineal de dicho grafeno (105) es 7 órdenes de magnitud mayor que el índice de refracción no lineal de dicha fibra óptica (101); y
donde el coeficiente no lineal de dicho segmento cubierto con dicho grafeno (105) es aproximadamente un 60% mayor que el coeficiente no lineal de dicha fibra óptica (101).

[22] En la Figura 1 se observa un esquema de un ejemplo de realización del método de medición no lineal, en el que se utiliza el dispositivo de detección óptica (100) descrito anteriormente, donde el mismo comprende los siguientes pasos:

- a) Ubicar el dispositivo de detección óptica (100) en el material con 25 unidades de detección (104), con un segmento cada una, separadas entre sí de manera equidistante;
- b) Iluminar a dicho dispositivo (100) con un “OTDR” (200) con pulsos de luz de intensidad, duración y longitud de onda conocidas, para el presente ejemplo, con una intensidad que provea un rango dinámico de medición entre 30 y 50 dB, pulsos de algunas decenas de nanosegundos de duración y longitud de onda de 1550 nm;
- c) Ajustar el rango dinámico y la resolución de dicho “OTDR” (200) hasta detectar el evento de cada una de dichas unidades de detección (104); esto es, que pueda detectar la absorción adicional producida por los segmentos que estén cubiertos por grafeno (105);
- d) Obtener la traza del “OTDR” (200);
- e) Monitorear variaciones en tiempo real en la absorción de los eventos del paso c);
- f) Iluminar a dicho dispositivo (100) con una fuente de luz pulsada (300) de intensidad, duración de pulso y longitud de onda conocidas, para el presente ejemplo, un pulso gaussiano de 75 kW de 100 fs “FWHM” (por

sus siglas en inglés, que hacen referencia a “Full Width Half Maximum”, o ancho a media altura) y longitud de onda de 1530 nm, a través de un acoplador óptico (400);

g) Medir el ancho espectral del pulso del paso f) a la salida de dicho dispositivo (100) con el analizador de espectro óptico (500);

h) Correlacionar la información obtenida mediante la medición distribuida lineal (que permite identificar claramente la ubicación espacial de cada unidad de detección) en el paso e) con la información no lineal (ancho espectral) de dicho paso g), lo cual permite aumentar la sensibilidad;

i) Obtener la magnitud de las deformaciones mecánicas de dicho material (esfuerzo de tracción y/o compresión), en cada segmento cubierto con grafeno (105) de dichas unidades de detección (104); y

j) Utilizar el ancho espectral de dicho paso g) y discriminar con mayor sensibilidad entre esfuerzos mecánicos de tracción y de compresión en dicho dispositivo (100).

[23] En la Figura 2 se muestra la variación relativa del coeficiente no lineal, $\Delta\gamma$, en función de los diferentes tipos de deformación (tracción y compresión), ε , para fibras ópticas con un segmento con material de recubrimiento y fibras ópticas sin material de recubrimiento. Los resultados se obtuvieron mediante simulaciones numéricas. A continuación, se detalla el método utilizado.

[24] Se modeló una fibra óptica sin “cladding” y sin material de recubrimiento y otra fibra óptica sin “cladding” pero con un segmento cubierto con una película de tres capas de grafeno (cada capa tiene un espesor $\approx 0,3$ nm), para diferentes esfuerzos mecánicos aplicados. Se obtuvo la distribución del modo transversal eléctrico correspondiente utilizando el algoritmo de diferencias finitas en el dominio del tiempo (o por sus siglas en inglés, “FDTD”, que hacen referencia a “Finite Difference Time Domain”). Conociendo el perfil del modo se calcula el coeficiente no lineal de acuerdo con la siguiente Ecuación 1:

$$\gamma_0 = \frac{\omega_0}{c} \frac{\iint n_2(x, y) |F(\omega_0, x, y)|^4 dx dy}{(\iint |F(\omega_0, x, y)|^2 dx dy)^2}$$

donde $F(\omega_0, x, y) \propto n(x, y)S(\omega_0, x, y)$, $n(x, y) = 1,4682$ es el índice de refracción lineal, $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ es el índice de refracción no lineal y $S(\omega_0, x, y)$ es la distribución del modo que depende de la frecuencia, que se encuentra evaluado en la longitud de onda central $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$.

- [25] Usando la Ecuación 1 y el perfil del modo LP_{01} obtenido por medio de la “FDTD”, calculamos la variación relativa del coeficiente no lineal de acuerdo con la siguiente Ecuación 2:

$$\Delta\gamma = 10 * \log\left(1 - \frac{\gamma(\varepsilon)}{\gamma_0}\right)$$

- [26] La unidad de detección presenta una diferencia en la sensibilidad dependiendo del tipo de esfuerzo (tracción/compresión).
- [27] La diferencia entre las variaciones relativas del coeficiente no lineal producidas por cada uno de los esfuerzos es de 0,15 dB, cuando el segmento se somete a los 10 mε. Por lo tanto, la discriminación entre el tipo de esfuerzo mecánico usando la magnitud del coeficiente no lineal es mayor que aquella producida por la correspondiente magnitud lineal (absorción lineal).
- [28] En la Figura 3 se muestra el ancho espectral para un pulso de las características descritas anteriormente, inyectado en un segmento de 5 mm, normalizado al obtenido en la fibra sin “cladding” y sin material de recubrimiento. En este caso, los cambios en el coeficiente no lineal de la fibra óptica sin “cladding”, cubierto con una película de tres capas de grafeno, permiten la detección de la deformación mediante la transducción a un aumento en el ancho espectral.
- [29] Si no se aplica ningún esfuerzo mecánico en el segmento de la unidad de detección, se observa que el ancho espectral es 1,5 veces mayor al que se obtiene al propagar el pulso por un segmento sin “cladding” y sin material de recubrimiento.

- [30] Si se aplica un esfuerzo de compresión de 10 mε, éste provoca que el ancho espectral normalizado aumente 1,6 veces con respecto al ancho espectral a la salida de un segmento sin “cladding” y sin material de recubrimiento sometido al mismo esfuerzo.
- [31] Si se aplica un esfuerzo de tracción de 10 mε, éste provoca que el ancho espectral normalizado se incremente 1,8 veces con respecto al ancho espectral a la salida de un segmento sin “cladding” y sin material de recubrimiento sometido al mismo esfuerzo.
- [32] De esta manera, se tiene una diferencia de ancho espectral relativo de 12,5% entre ambos esfuerzos mecánicos, lo que permite su discriminación. Esta diferencia entre los factores de ancho espectral producidos por la compresión y la tracción de, aproximadamente, 0,5 dB representa un significativo incremento en la sensibilidad de discriminación comparada con la del método lineal ($\approx 0,03$ dB).

A continuación, sigue 1 reivindicación.

REIVINDICACIONES

Habiendo descripto y especificado la naturaleza y alcance de la presente invención, y siendo la misma una Solicitud de Patente Adicional a la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993 presentada el 28 de octubre de 2021, se declara reivindicar como invención de exclusivo derecho y propiedad:

1) Un método de medición no lineal para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras, que utiliza el dispositivo de la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993, que comprende los siguientes pasos:

- a) Ubicar al menos uno de dichos dispositivos de detección óptica en un material o estructura;
- b) Iluminar a dichos dispositivos con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo con pulsos de luz de intensidad, duración y longitud de onda conocidas;
- c) Ajustar el rango dinámico y la resolución de dicho reflectómetro óptico en el dominio del tiempo hasta detectar el evento de cada una de dichas unidades de detección;
- d) Obtener la traza del reflectómetro óptico en el dominio del tiempo; y
- e) Monitorear variaciones en tiempo real en la absorción de los eventos del paso c);

que está **caracterizado porque** además comprende los siguientes pasos:

- f) Iluminar a dichos dispositivos con una fuente de luz pulsada de intensidad, duración de pulso y longitud de onda conocidas;
- g) Medir el ancho espectral del pulso del paso f) a la salida de dichos dispositivos;
- h) Correlacionar la información obtenida mediante la medición distribuida lineal en dicho paso e) con la información no lineal del ancho espectral obtenida en dicho paso g);
- i) Obtener la magnitud de las deformaciones mecánicas de dicho material o estructura en cada uno de los segmentos cubiertos con material de recubrimiento de las unidades de detección de dichos dispositivos; y

j) Utilizar el ancho espectral de dicho paso g) y discriminar el tipo de esfuerzo aplicado a dicho material o estructura entre tracción y compresión;
donde dicho paso f) puede llevarse a cabo después de dichos pasos b), c), d) y e) indistintamente; y
donde dicho paso f) puede llevarse a cabo al mismo tiempo que dicho paso b).

Ing. Edgardo S. ALANIZ

Agente de la Propiedad Industrial

Matrícula N° 2282

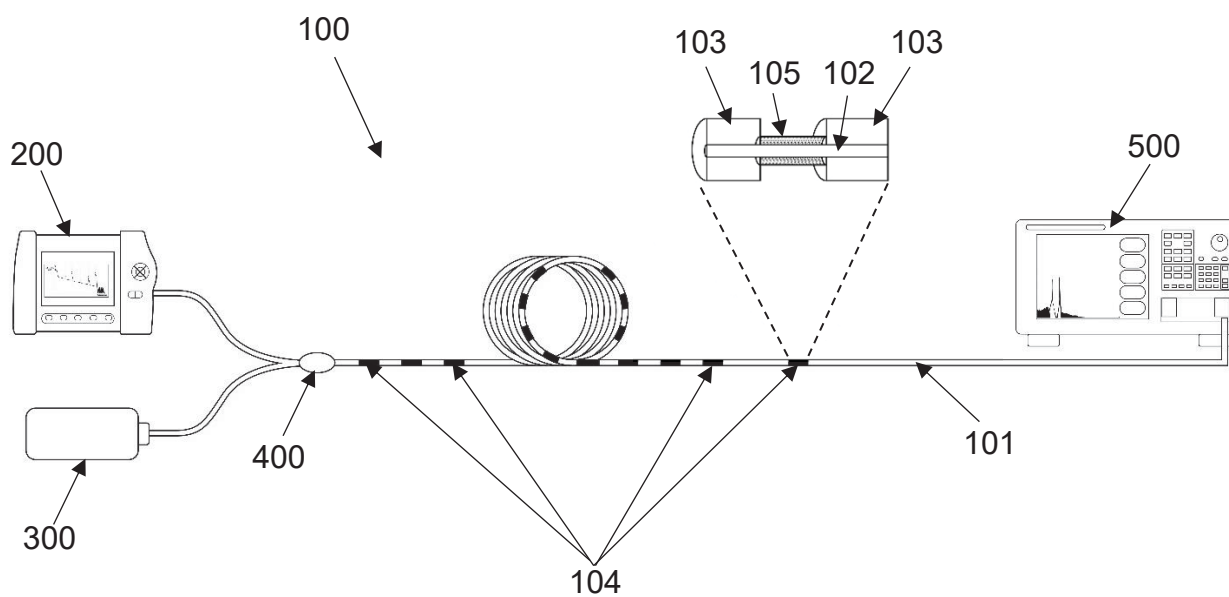


Figura 1

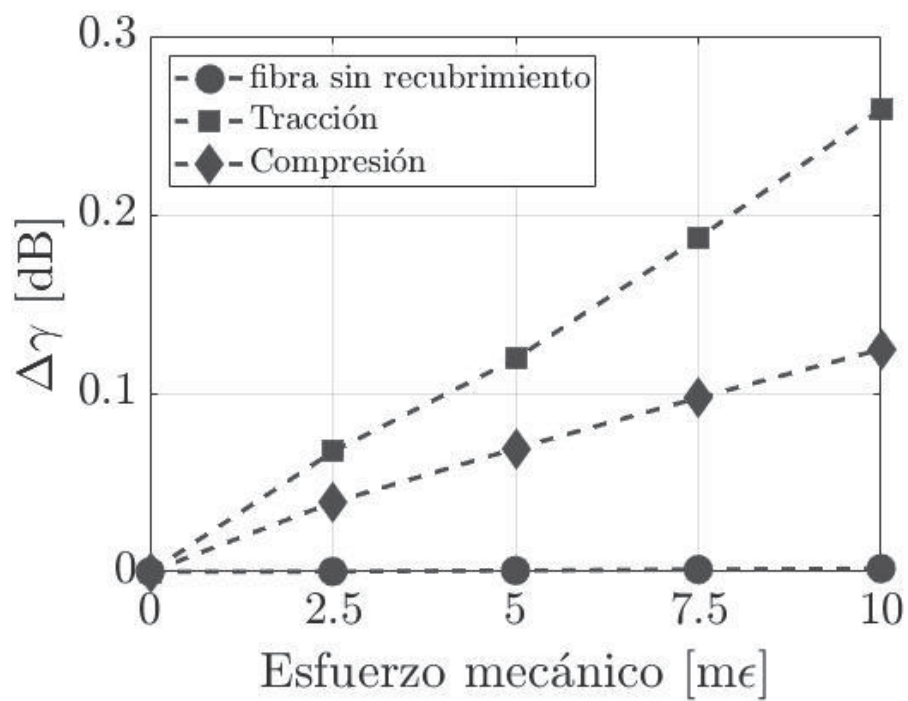


Figura 2

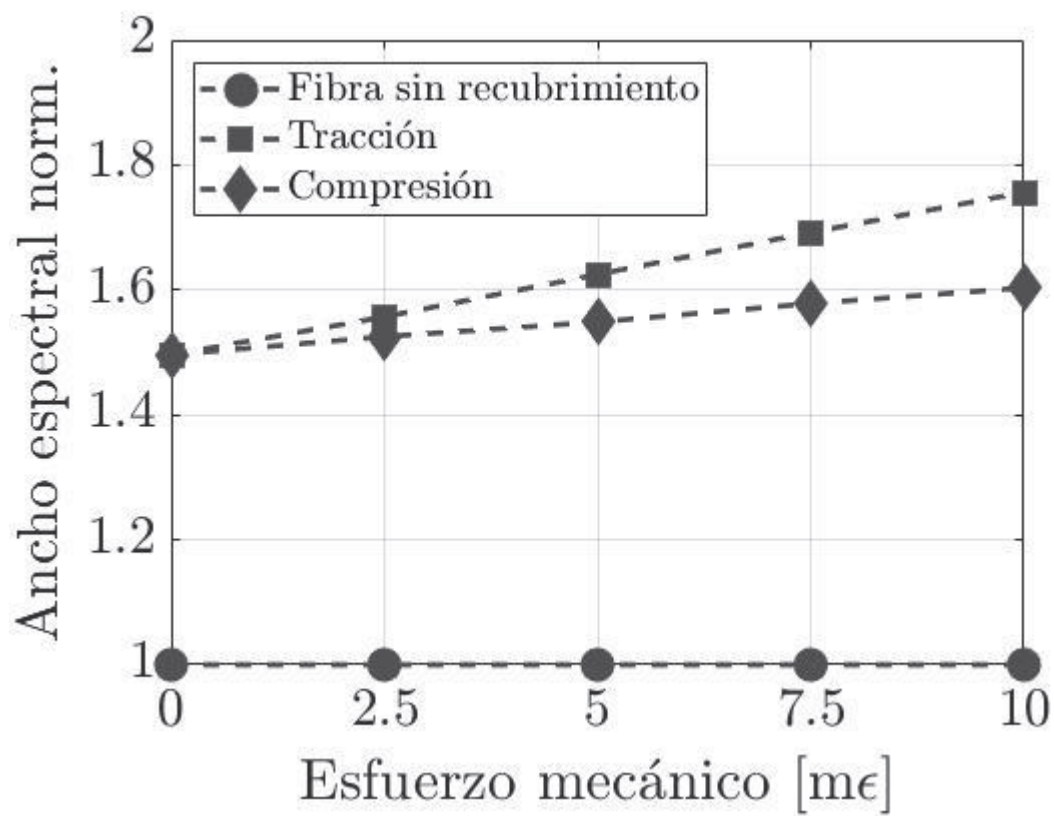


Figura 3

RESUMEN

Método de medición no lineal para medir deformaciones mecánicas de materiales y estructuras, que utiliza el dispositivo de la Solicitud de Patente Argentina N° 20210102993, que comprende pasos para la identificación de la ubicación espacial de las unidades de detección del o los dispositivos de detección óptica, caracterizado por los siguientes pasos: Iluminar a dichos dispositivos con una fuente de luz pulsada de intensidad, duración de pulso y longitud de onda conocidas; medir el ancho espectral del pulso del paso anterior a la salida de dichos dispositivos; correlacionar la información obtenida mediante los pasos para la identificación de la ubicación espacial con la información obtenida en la medición del ancho espectral; obtener la magnitud de las deformaciones mecánicas de dicho material o estructura; y utilizar el ancho espectral y discriminar el tipo de esfuerzo aplicado a dicho material o estructura entre tracción y compresión.