

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 489 192**

51 Int. Cl.:

G01V 1/00 (2006.01)

E21D 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.03.2011** **E 11717330 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.05.2014** **EP 2542917**

54 Título: **Método de procesamiento y adquisición de señales sísmicas durante la construcción de un túnel**

30 Prioridad:

04.03.2010 IT PD20100064

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

01.09.2014

73 Titular/es:

**ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E DI
GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS (100.0%)
Borgo Grotta Gigante, 42c
34010 Sgonico (Trieste), IT**

72 Inventor/es:

**POLETTO, FLAVIO y
PETRONIO, LORENZO**

74 Agente/Representante:

RUO, Alessandro

ES 2 489 192 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

Método de procesamiento y adquisición de señales sísmicas durante la construcción de un túnel

5 **Campo de la invención**

[0001] La presente invención se refiere a un método de adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel.

10 **Técnica anterior**

[0002] La cabeza de corte de una máquina de perforación, indicada de aquí en adelante con el acrónimo TBM (del inglés, "Tunnel Boring Machine"), está provista en general con cortadores, que se distribuyen sobre su superficie. Estos cortadores son puntos en los que se ejerce una acción concentrada que rompe la roca y son los puntos principales de contacto del frontal de la TBM con la formación que se va a perforar.

[0003] La rotación continua de la cabeza de corte, que se presiona contra la formación mediante prensas hidráulicas (gatos hidráulicos), produce la pulverización de la roca y crea un sonido sísmico por las vibraciones que se generan en cada uno de estos puntos de contacto. Estas vibraciones se transmiten a la formación y se irradian como ondas sísmicas y acústicas. Más aún, estas vibraciones se transmiten también a la TBM en sí, en la que se propaga, excitando modos de vibración característicos. Las señales sísmicas se generan también por la fricción de la superficie lateral de la TBM contra la roca que la rodea, durante el avance de la cabeza de la TBM bajo la acción de las prensas hidráulicas.

[0004] La operación de la TBM también produce otros sonidos/vibraciones, por ejemplo el de los motores, bombas hidráulicas y sistemas mecánicos para la retirada del material de roca pulverizado producido por la perforación.

[0005] Los métodos conocidos para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas mientras se perfora en el túnel se indican generalmente con el acrónimo inglés TSWD.

[0006] Éstos utilizan el sonido sísmico producido por la máquina de perforación/excavación para la investigación y caracterización del frente de roca sobre el que la máquina ha de trabajar, para detectar a tiempo obstáculos inesperados en el recorrido de perforación y anticipar situaciones críticas dado que puede haber riesgos técnicos así como riesgos posibles para la integridad del túnel en sí, para el personal, así como riesgos económicos de los costes de las operaciones de reparación a consecuencia de un incidente.

[0007] Estos métodos usan típicamente mediciones de referencia, también denominadas mediciones piloto, adquiridas por medio de sensores montados sobre la TBM para el registro del sonido en el "origen", y ser así capaz de identificarlo y usarlo como "señal", producida por la cabeza de la TBM durante la perforación, junto con las mediciones sísmicas adquiridas con geófonos y/o acelerómetros, o bien insertados/fijos directamente en/sobre la roca o bien instalados/situados sobre la TBM de modo que se acople a la roca, o al exterior. Estas mediciones piloto y sísmicas se correlacionan entre sí y se procesan por métodos conocidos para obtener sismogramas que se pueden interpretar mientras se perfora. Estos sismogramas se producen en puntos fijos o a intervalos regulares de avance del frente de excavación y se usan para la obtención de perfiles sísmicos en el túnel y para procesamiento de imágenes sísmicas, acústicas, sónicas y ultrasónicas, construcción estructural y mapas estratigráficos para predicción de la formación a ser perforada y para caracterización de la roca ya perforada.

[0008] Los métodos conocidos de análisis sísmico mientras se perforan túneles usan sensores pilotos que registran unidas las señales producidas aleatoriamente por puntos sin identificar del frente de perforación sobre la cabeza de la TBM. De ese modo, los datos adquiridos en estos métodos son la suma de las señales recibidas desde varias posiciones de la cabeza de corte y producen resultados sísmicos promediados en el espacio.

[0009] Así, se obtiene un efecto de filtro paso bajo para las frecuencias, es decir un efecto del filtrado paso alto para las longitudes de onda de la señal resultante.

[0010] Por esta razón, los componentes de la señal en la formación con longitudes de onda más pequeñas o del orden de magnitud del diámetro de la TBM pueden ser altamente atenuadas mediante interferencia. Especialmente con las máquinas TBM con grandes dimensiones radiales. Este efecto de filtrado paso bajo limita, de una manera no despreciable, la resolución temporal y espacial de la caracterización del frente de excavación y de ese modo limita la capacidad para obtener imágenes detalladas de objetos en el frente de, y alrededor de, el frente de excavación.

[0011] Por ejemplo, para la observación, con el criterio de resolución que adopta el límite de Rayleigh $\lambda d/4$, donde λd es la longitud de onda dominante, de un objeto inesperado por delante del frente de excavación, por ejemplo una falla, un cuerpo de roca, un obstáculo, una fundación, con un tamaño de 1 m, es necesario usar señales con una longitud de onda dominante $\lambda d \leq 4$ m. Por lo tanto, las señales con un ancho de banda adecuado deben contener incluso longitudes de onda menores. Con una TBM con un diámetro de 15 metros — incluso asumiendo que

produce señales con frecuencias del orden de magnitud de un millar de hercios— puede ser difícil obtener señales sísmicas que contengan dichas longitudes de onda e imágenes detalladas de estructuras geológicas con dimensiones de unos pocos metros cuando la señal del origen se promedia.

5 **[0012]** Son conocidos métodos que usan generadores y receptores de señales sobre la cabeza de la TBM. Estos sistemas acústicos sólo se pueden aplicar efectivamente con las TBM presurizadas, sin abordar el problema de la utilización de vibraciones de la excavación en sí, que están siempre disponibles mientras se perfora.

10 **[0013]** Otro sistema concibe el uso de sensores y acelerómetros de emisión acústica sobre la cabeza de la TBM para obtener información sobre las condiciones de los discos de la cortadora y las condiciones de la máquina de perforación. Sin embargo, este sistema no es capaz de proporcionar una información sísmica adecuada/detallada sobre las formaciones de roca por delante de la TBM.

15 **[0014]** Otro sistema utiliza fuentes de vibración activas con una técnica similar al Vibroseis, que encuentran aplicación con las TBM de un tipo particular denominado EPB por el acrónimo inglés de “Earth Pressure Balanced” o “presión de tierra equilibrada”, adecuado para la excavación en terrenos blandos de tipo arcilloso, limoso y arenoso. Con un sistema de ese tipo es difícil instalar geófonos a lo largo del recorrido del túnel perforado.

Sumario de la invención

20 **[0015]** El propósito de la presente invención es proporcionar un método para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel que sea capaz de permitir una investigación y caracterización más detallada del frente de roca sobre el que ha de trabajar una TBM.

25 **[0016]** La presente invención se refiere a un método para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel, de acuerdo con la reivindicación 1.

30 **[0017]** El presente método concibe el uso de una pluralidad de sensores piloto adecuadamente distribuidos sobre la cabeza de la máquina de perforación preferiblemente con un sensor cerca de cada cortador de la cabeza de la TBM, con la finalidad de identificar tan precisamente como sea posible el punto o puntos de generación de la señal/sonido sísmico producido por la interacción de la TBM con la roca.

35 **[0018]** Las señales detectadas se comparan entonces con al menos un registro obtenido a una distancia adecuada por medio de al menos un geófono o por medio de un sensor de vibración sobre la máquina en sí para detectar las señales de vibración sísmica que se propagan a través de la roca que se reflejan y/o refractan dentro de ella.

40 **[0019]** El uso de varios sensores mejora grandemente la detección de los orígenes de la señal acústica, pero cuando la cabeza de la TBM es muy rígida, las señales de vibración se propagan sobre ella con cortos retardos, de modo que las señales generadas por los cortadores que están al menos próximos tienden a solaparse y detectarse juntos por los sensores respectivos.

45 **[0020]** Ventajosamente, la presente invención describe un método para el aislamiento en la señal acústica registrada por cada sensor de las contribuciones de los cortadores próximos, de modo que sea capaz de atribuir, con la mayor certeza y precisión, la posición del origen del sonido sobre el frente de roca para la caracterización de dicho frente de roca.

50 **[0021]** Con más detalle, la presente invención consigue el objetivo anteriormente mencionado agrupando juntos los sensores situados sobre la cabeza de la TBM en grupos variables de sensores y mediante la correlación y/o deconvolución de las señales registradas por al menos un geófono con la señal registrada por cada grupo.

[0022] Ventajosamente, sólo son tomadas en consideración las señales detectadas por los sensores cuyos cortadores respectivos están en contacto con una parte predefinida del frente de roca.

55 **[0023]** Esta agrupación variable hace posible relacionar las señales detectadas por cada grupo de sensores en turnos con los registros realizados por medio del dicho al menos un geófono.

[0024] Cuando un cortador ya no está en contacto con dicha parte predefinida del frente de roca, la señal detectada por él no es tomada en consideración para la caracterización de dicha parte del frente de roca.

60 **[0025]** Más precisamente, durante una parte del avance de la TBM, se considera un volumen del frente de roca virtualmente particionado en volúmenes parciales.

65 **[0026]** Se prefiere que dichos volúmenes parciales obtenidos con dicho particionado virtual sean prismas con una superficie enfrentada a la cabeza de la TBM y paredes laterales perpendiculares a ella. Más aún, se prefiere que cada volumen tenga dimensiones de modo que pueda asemejarse a un punto de origen contenido en unos pocos metros o incluso menos con la finalidad de la presente invención.

5 **[0027]** Para implementar este procedimiento, las mediciones de la señal registrada por el geófono y de las señales de los sensores de la TBM se relacionan entre sí temporalmente, y se relacionan también temporalmente con las mediciones de los parámetros instantáneos de la excavación/perforación, incluyendo avance, ángulo de rotación, velocidad de penetración (ROP), velocidad de rotación (RPM) y empuje.

[0028] Para esta finalidad, el método concibe las siguientes etapas

- 10 - particionado virtual de un volumen predefinido del frente de roca enfrentado a la cabeza de la TBM en partes del volumen en las que cada una tenga una superficie enfrentada a una parte de la cabeza de la TBM,
- identificación del grupo de sensores que pasan, durante la rotación-traslación de la TBM, a través de uno de dichos volúmenes parciales,
- 15 - transformación de los sistemas de referencia y de cantidades del vector opcional a partir de un sistema de movimiento de referencia asociado con la cabeza de la TBM a un sistema fijo o referencia integral con dicho volumen del frente de roca y
- comparación (correlación y/o deconvolución) entre la señal o señales sísmicas registradas por el o los geófonos y las señales piloto detectadas por el grupo de sensores que pasan a través de dicho volumen parcial.

20 **[0029]** Las primeras dos etapas descritas anteriormente corresponden a una definición adecuada de ventanas de señales multicanal registradas sobre la cabeza de la TBM para obtener al menos una traza independiente para cada volumen parcial perforado por la TBM.

25 **[0030]** Estas operaciones se repiten para todas las partes del frente de roca hasta que la última está completamente caracterizada y hasta que la TBM haya pasado a través del volumen completo del frente de roca, después de lo cual comienza de nuevo desde el inicio.

[0031] Dicho sistema de movimiento de referencia tiene un eje de coordenadas de referencia asociado con el eje de rotación de la TBM.

30 **[0032]** La señal resultante obtenida siguiendo dicha operación de correlación y/o de deconvolución es del tipo de impulso compatible con sismogramas y se caracteriza por una relación señal/ruido más alta, permitiendo así un procesamiento posterior de dicha señal resultante mediante técnicas adicionales de análisis y consecuentemente una caracterización más fiable y precisa del frente de roca.

35 **[0033]** De acuerdo con una realización preferida de la invención, cuando la distribución de las herramientas de corte sobre la cabeza de la TBM no es uniforme, o cuando la acción de excavación no se aplica con fuerzas igualmente distribuidas, o si el particionado virtual de dicho volumen predefinido del frente de roca no es igual, entonces las señales detectadas por el sensor o sensores que pasan a través de cada volumen parcial pueden ser adecuadamente ponderadas, también en base a los parámetros posicionales y/o dinámicos de la operación de perforación.

[0034] Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones preferidas de la invención, que forman parte integral de la presente descripción.

45 **Breve descripción de los dibujos**

50 **[0035]** Las características y ventajas adicionales de la invención se harán más claras a partir de la descripción detallada de las realizaciones preferidas, pero no exclusivas, de un método para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel, descrito con finalidades de ilustración y no exhaustivamente, con la ayuda de los dibujos adjuntos en los que:

La Fig. 1 muestra una vista lateral de una TBM de diámetro DT con la cabeza de rotación y los recorridos de propagación de las señales sísmicas,

55 la Fig. 2 muestra un volumen parcial virtual fijo con relación a la formación de roca situado en el frente de la TBM y atravesado por esta última,

la Fig. 3 muestra los componentes en el sistema de coordenadas (R, X, T) sobre la rotación de la TBM y en el sistema de coordenadas (X, Y, Z) integral con la formación de roca,

la Fig. 4 muestra dos puntos separados en el frente de la TBM en los que se producen las señales Si y Sj.

60 La Fig. 5 muestra un ejemplo de datos artificiales, series temporales de muestras digitales aleatorias, que simulan la adquisición continua de señales por 12 sensores situados sobre la TBM.

[0036] Los mismos números de referencia y las mismas letras de referencia en los dibujos identifican los mismos elementos o componentes.

65 **Descripción detallada de una realización preferida de la invención**

[0037] Con referencia a la Fig. 1, mientras se perfora se emiten las señales S1 y S2 desde dos puntos diferentes sobre la cabeza de la TBM en donde se sitúan los sensores P1 y P2.

5 [0038] P1 y P2 también reciben las señales producidas por S2 y S1, respectivamente. Cada una de éstas recorre al menos una distancia mínima d_{H12} a través de dicha cabeza de la TBM.

10 [0039] Dichas señales se propagan también en la roca con longitudes de recorrido $dD1$ y $dD2$ al menos tan lejos como a un punto D en el frontal de la TBM. D puede representar un cuerpo con diferentes propiedades acústicas con relación a la roca circundante, es decir puede representar un elemento difractante o reflectante. G1 – G8 representan geófonos que reciben la señal sísmica desde S1 y S2 directamente a través de los recorridos $d11$ – $d81$, etc., y la señal difractada o reflejada por D de acuerdo con las longitudes de recorrido $d1D$ – $d8D$ respectivas.

15 [0040] Con referencia a la Fig. 2, la TBM gira con una velocidad angular ω , por ejemplo con un sentido de rotación contrario a las agujas del reloj para un observador que mire a la cabeza de la TBM desde el frente de roca. Un volumen parcial puede delimitarse por ejemplo por los ángulos $\theta1$ y $\theta2$, por los radios R_{min} y R_{max} y por las posiciones de avance axial XA y XB.

20 [0041] Dicho volumen parcial se puede asemejar a un origen localizado distribuido en dicho volumen y es atravesado periódicamente por los sensores colocados a una distancia radial desde el eje de rotación R entre R_{min} y R_{max} , véase la Fig. 3.

25 [0042] Con referencia a la Fig. 4, H_{ii} es la respuesta al impulso de la TBM para una señal de impulso S_i medida por P_i en la posición adyacente a S_i , mientras que H_{jj} es la respuesta al impulso de una señal S_j medida en P_j , de donde H_{ij} es la función de transferencia para una señal S_j medida por P_i .

30 [0043] Con referencia a la Fig. 5, las ordenadas muestran el tiempo de escucha en segundos. Cada traza corresponde a la señal de un sensor durante una única revolución de la TBM. El trazado en el centro representa el resultado de la exclusión de las señales registradas por los sensores en el exterior de un volumen parcial, por ejemplo el mostrado en la Fig. 2. En consecuencia, las trazas mostradas son el resultado de selección de los intervalos de tiempo que corresponden al tránsito de cada sensor respectivo en dicho volumen parcial.

[0044] El trazado de la derecha representa la concatenación de las trazas representadas en el trazado del centro.

35 [0045] Ventajosamente, dicho trazado se refiere específicamente a un volumen parcial sobre el frente de roca. Una vez que se obtiene dicho trazado, se puede relacionar con los trazados registrados por uno o más geófonos mediante operaciones de correlación cruzada y/o deconvolución. Esta relación es, en una primera aproximación, independiente del desplazamiento de la cabeza de la TBM.

40 [0046] Ventajosamente, la invención puede proporcionar, como resultado final, sismogramas mientras se perfora, para la predicción de obstáculos y para la obtención, mediante procesamiento de los sismogramas usando métodos conocidos, imágenes acústicas en el frente de, y alrededor de, la TBM.

45 [0047] El tiempo máximo de representación de los sismogramas depende de la posición de los orígenes, la posición del (de los) geófono(s), las propiedades del subsuelo y la máxima distancia cubierta por las ondas que deseamos observar, tal como se muestra en la Fig. 1.

50 [0048] Si por ejemplo un origen S y un sensor sísmico G están en o cerca de la TBM, y si por ejemplo deseamos ver la difracción/reflexión de un cuerpo D que esté situado a una distancia de 100 m por delante del frente de excavación, el recorrido de ida y vuelta de las señales sísmicas difractadas/reflejadas se halla para ser de aproximadamente $100 + 100 = 200$ metros. Si la señal se propaga en la formación de roca a una velocidad de 2000 metros/segundo, los sismogramas se deben registrar/representar durante al menos 0,1 segundos.

55 [0049] Si pretendemos también registrar llegadas sucesivas debidas a múltiples recorridos adicionales, entonces estos sismogramas deben tener una duración más larga, por ejemplo de 0,5 segundos.

[0050] Los sismogramas obtenidos por el método de acuerdo con la presente invención se obtienen comenzando a partir de registros multicanal de sonidos/señales aleatorias, que se convierten usando técnicas de correlación y/o deconvolución en señales del tipo impulso que se pueden asemejar a los sismogramas.

60 [0051] La determinación de los tiempos de observación de los sonidos/señales de vibración originales a partir de los que se obtienen los sismogramas para procesamiento de las imágenes finales depende de la dimensión axial del volumen que se seleccione entre una distancia axial mínima XA y una distancia axial máxima XB tal como se ilustra en la Fig. 2 y a partir de la velocidad de penetración ROP de la TBM. El tiempo total de adquisición en el geófono y en los sensores de la TBM cubre el tiempo de recorrido axial de dicho volumen parcial por los sensores sobre la TBM y por ello de dicha cabeza de la TBM. Este tiempo de escucha, igual a $(XB-XA)/ROP$ horas, si la distancia X se expresa en metros y ROP en m/h, puede ser del orden de minutos o incluso horas. La profundidad $(XB-XA)$ del

volumen seleccionado se determina en el diseño del sondeo con la intención de mejorar la relación señal/ruido (S/N), mediante la selección de una profundidad suficiente, en sintonía con la resolución requerida/deseada.

5 **[0052]** Por ejemplo, para una TBM que avance con una ROP de 24 m por día, obtenemos un progreso de 1 m por hora. Si dicho volumen de frente de roca está a una profundidad de 1 metro, un tiempo de observación del geófono es 1 hora. Entonces las señales piloto y las señales en los geófonos se registran continuamente por ejemplo durante una hora o durante intervalos de tiempo contiguos cuya suma es igual, por ejemplo, a una hora.

10 **[0053]** El tiempo total para el paso transversalmente a través de una parte de dicho volumen del frente de roca entre los ángulos de rotación θ_1 y θ_2 se ilustra en la Fig. 2 por un sensor integral con la cabeza de la TBM puede ser más corto, incluso si los intervalos de tiempo de travesía durante revoluciones sucesivas se distribuyen a lo largo de la amplitud del tiempo de observación, que es de 1 hora, es decir durante el avance de la TBM entre XA y XB. El tiempo de tránsito transversal para una única revolución está limitado por la velocidad de rotación RPM dado que la apertura angular del volumen parcial es fijo, y para una única revolución es igual a $(\theta_2 - \theta_1) * 60 / (2\pi * \text{RPM})$ segundos si el ángulo θ se expresa en radianes y RPM en revoluciones por minuto. Dado que el tiempo de tránsito de una única revolución es inversamente proporcional a las RPM mientras que el número de revoluciones realizado en un intervalo de tiempo dado es proporcional a RPM, se deduce que el tiempo total del tránsito transversal obtenido con todas las revoluciones que realiza la TBM entre XA y XB no depende de RPM, sino solamente de la apertura angular relativa $(\theta_2 - \theta_1) / 2\pi$ y del tiempo de tránsito axial total, que está limitado por la velocidad de penetración ROP dado que los límites de avance axial se fijan para el volumen seleccionado.

15 **[0054]** Si, por ejemplo, dicho volumen parcial comprende una superficie enfrentada a la cabeza de la TBM que define un sector angular de 30 grados, es decir $1/12$ de 360° , entonces el tiempo de travesía del sensor es de $60 \text{ min} / 12 = 5$ minutos.

25 **[0055]** Este resultado es un tiempo suficientemente largo, y se puede usar para mejorar la relación S/N, si se compara con el tiempo para un único tránsito de travesía del sensor de la TBM en el mismo volumen parcial seleccionado.

30 **[0056]** La definición de un trazado piloto compuesto por la sucesión de registros de los sensores que gradualmente atraviesan dicho sector circular permite el alargamiento adicional del tiempo de observación, haciéndolo ampliamente consistente con el comportamiento del frente de roca. Si la velocidad de rotación de la TBM es de 10 rev/min, (RPM) = 1 revolución cada 6 segundos. Un doceavo de la revolución será recorrido (en el tránsito individual) en 0,5 segundos. Por lo tanto tenemos una ganancia en el tiempo de escucha de (300 segundos = 5 min) $300 / 0,5 = 600$ veces con relación a la escucha limitada a solamente un tránsito en el sector.

35 **[0057]** Si consideramos la relación (señal coherente)/(ruido aleatorio), ésta mejora con la raíz cuadrada del número de muestras en el tiempo, obteniendo una mejora de $\sqrt{600} \approx 25$ veces en términos de S/N.

40 **[0058]** Ventajosamente, el tiempo de escucha de las señales generadas en un volumen de roca parcial, a través del que pasa la cabeza de la TBM, se puede incrementar adicionalmente si en lugar de únicamente un sensor, se usan varios sensores, que pasan a través periódicamente, uno tras el otro como en la Fig. 2, que muestra dos sensores con radios R_i y R_j incluidos en el sector circular entre los ángulos θ_1 y θ_2 y entre los radios R_{min} y R_{max} y que definen dicho volumen parcial.

45 **[0059]** Con una distribución suficiente de sensores que pasan a través de cada volumen parcial, este tiempo de escucha se incrementa hasta que alcanza el límite del tiempo de escucha total en el intervalo de avance entre XA y XB. En este caso la S/N mejora en $\sqrt{7200} \approx 85$ para el ejemplo considerado.

50 **[0060]** Por estas razones es aconsejable referirse a un grupo de sensores que pasan a través de un volumen parcial, en lugar de a un único sensor, aunque dicho grupo puede comprender uno o más sensores.

55 **[0061]** Las señales registradas por los sensores que no pasan a través de un primer volumen parcial se descartan inicialmente. Se usarán posteriormente para los intervalos de tiempo en los que pasan a través de un segundo volumen parcial, a continuación un tercero, etc.

[0062] Dada la posición angular y axial de la cabeza de la TBM, los canales de registro se seleccionan automáticamente a partir de la pluralidad de canales, estando asociado cada canal con un sensor respectivo.

60 **[0063]** Tras la obtención de al menos una traza piloto como concatenación de canales adecuadamente en ventana, similar al mostrado para el trazado a la derecha de la Fig. 5, se usa un proceso de correlación cruzada y/o deconvolución de dicha traza con una señal continua de uno o más geófonos, incluso si ambas señales se registran y distribuyen en un intervalo de tiempo de una hora.

[0064] De ese modo, la cabeza de la TBM, de acuerdo con la presente invención, está provista con un cierto número de cuchillas o cortadores. Cada cuchilla es un punto de origen S.

5 **[0065]** Preferiblemente, se fija un sensor piloto P, que corresponde a cada cuchilla. Dicho sensor P es capaz de medir las componentes de vibración, aceleración y/o fuerza, en una o más direcciones, incluyendo la axial PX, radial PR y tangencial PT, como se muestra en la Fig. 3.

10 **[0066]** Se debería observar que las componentes radial y tangencial giran con la TBM. Cada uno de estos tres componentes registra una señal. Por lo tanto un sensor triple detecta tres señales a la vez.

15 **[0067]** Otra razón para el uso de varios componentes sobre la TBM es que es útil para la caracterización de las propiedades de emisión del origen. De hecho se está interesado tanto en las señales que se propagan en la formación como ondas de presión, comúnmente denominadas ondas P, típicamente más influenciadas por la presencia de fluidos, y las ondas de corte, comúnmente denominadas ondas S, menos influenciadas por la presencia de fluidos, así como las ondas convertidas, superficiales y guiadas.

20 **[0068]** Todas estas ondas se asocian en una forma compleja con los componentes del origen, y las mediciones de los componentes PX, PR, PT pueden ser ventajosas para el procesamiento e interpretación de las señales sísmicas de la TBM.

25 **[0069]** Cuando avanza la TBM, produce señales, cuya posición del origen es conocida, y se recogen mediciones con sensores sísmicos en el túnel y/o exterior del túnel para la obtención, con métodos conocidos de procesamiento, de perfiles sísmicos del túnel (perfiles sísmicos horizontales) que hacen posible crear secciones sísmicas e imágenes "mientras se perfora" de la formación a ser perforada por delante del frente de excavación, y la obtención de información geofísica a lo largo y alrededor del túnel.

[0070] Con relación a los sensores en el túnel, estos se pueden colocar en contacto con la formación y/o se pueden disponer en varias formas.

30 **[0071]** En la parte frontal de la TBM, estos sensores que se están moviendo, dado que giran junto con la TBM en sí, pueden acoplarse por ejemplo a la formación con varias soluciones, por ejemplo brazos móviles, mediciones de presión (por ejemplo con hidrófonos) en el fluido con las TBM presurizadas.

35 **[0072]** Para las señales sísmicas registradas con estos sensores piloto, es deseable llevar a cabo una transformación del sistema de coordenadas. En particular desde el sistema de rotación integral con la TBM a un sistema fijo de referencia, integral con el volumen del frente de roca por delante de la TBM.

40 **[0073]** Con relación al(a los) geófono(s), estos se pueden instalar en la formación en una posición fija, por ejemplo uno o más geófonos, con sensores únicos con uno o más componentes, o una matriz de sensores para registrar los diversos campos de ondas que se propagan a lo largo del túnel, como se muestra en la Fig. 1.

45 **[0074]** En general, la geometría de los receptores en el túnel se adaptará para una mejor utilización de la cobertura con todos los orígenes dispuestos sobre el frente de excavación. La posición de los receptores sobre la TBM en sí parece ser la mejor para la geometría de la medición sísmica próxima al frente de excavación, pero es más difícil de implementar. Durante la excavación, la TBM avanza, empujada por los gatos, y gira. Para llevar a cabo el procesamiento de las mediciones de acuerdo con el método de la presente invención es esencial medir, en sincronía con las mediciones sísmicas, los parámetros principales de la perforación, tal como la velocidad de rotación RPM, la posición angular instantánea $\theta(t)$ de la cabeza giratoria, su empuje axial, su avance a lo largo del eje de excavación.

50 **[0075]** La velocidad de rotación RPM se expresa típicamente en revoluciones por minuto, y la velocidad angular instantánea es

$$\omega(t) = \frac{2\pi RPM(t)}{60} \quad (1)$$

55 **[0076]** Cuando gira la cabeza de la TBM, las cuchillas y los pilotos que son integrales con ella también giran. Las mediciones mientras se perfora se refieren por lo tanto a dos sistemas de coordenadas, uno giratorio con componentes axial, radial y tangencial (X, R, T) integrales con la TBM, y uno fijo con componentes axial, transversal-horizonta y vertical (X, Y, Z) integrales con la formación de roca, véase la Fig. 3. La posición instantánea de un punto móvil de emisión donde se puede encontrar el punto de origen S es

$$(X, Y, Z) = (X, R \cos\theta, R \sin\theta) \quad (2)$$

donde X representa el avance de la TBM, R es el radio y $\theta=\theta(t)$ es la posición angular instantánea del punto móvil sobre la cabeza de la TBM.

5 **[0077]** De acuerdo con la presente invención, se calculan los componentes de las señales registradas sobre la cabeza de la TBM dados en el sistema fijo de referencia con relación a la formación. Para los componentes de la señal piloto P con relación al punto del origen S , se usan las siguientes transformaciones desde el sistema móvil de referencia al sistema fijo:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = M(\theta) \begin{pmatrix} P_x \\ P_R \\ P_T \end{pmatrix} \quad (3)$$

10 donde:

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ 0 & \text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

15 **[0078]** Es preferible que un sensor piloto esté, tanto como sea posible, en contacto próximo con la cuchilla respectiva que está cortando en la roca, de modo que mida predominantemente la señal de vibración generada por dicha cuchilla.

20 **[0079]** En esta forma es posible determinar el retardo de la señal piloto en sí, cuando ésta se detecta en la proximidad inmediata del origen y por lo tanto su retardo es prácticamente cero o en cualquier caso despreciable y/o se puede determinar con buena precisión.

25 **[0080]** Por ello, en la TBM hay N puntos de origen y cada uno de dichos puntos, identificado con el índice $i=1, \dots, N$, produce, durante la fractura de la roca, una señal aleatoria S_i y se supone que las señales de los diversos puntos son estadísticamente independientes entre sí.

30 **[0081]** Estas señales se superponen en los campos de ondas irradiados en la formación, pero también en las señales registradas sobre la TBM.

35 **[0082]** Para la función de transferencia indicada por H_{ij} para una señal S_j medida por P_i , dicha función representa un filtro. En consecuencia, la función H_{ij} representa la respuesta al impulso de la TBM para la señal emitida y medida en uno y el mismo punto i -ésimo. La señal piloto medida en el punto i -ésimo se puede expresar en el campo de las frecuencias de las transformadas de Fourier como una función de las señales de origen como

$$P_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} S_j + \alpha_i T_M \quad (5)$$

40 donde α_j son coeficientes y T_M representa un término común a todos los sensores debido al ruido mecánico o a la señal producida por la percusión sincrona del frontal completo de la TBM sometido al empuje axial de los gatos.

45 **[0083]** En forma de matriz la relación entre las señales de origen y las señales piloto se convierte en

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_N \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{pmatrix} T_M \quad (6)$$

donde H es la matriz que caracteriza la respuesta al impulso de la TBM dada por

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & \dots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1} & \dots & H_{NN} \end{pmatrix} \quad (7)$$

45 **[0084]** Ahora, (6) puede reescribirse como

$$\begin{pmatrix} \hat{P}_1 \\ \vdots \\ \hat{P}_N \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

donde $\hat{P}_i = P_i - \alpha_i T_M$ representa el vector de las señales piloto de las que se ha eliminado la “desviación” de la señal TM síncrona. Cuando las señales locales generadas por los orígenes de puntos individuales son dominantes en la medición P con relación a la señal síncrona del frontal completo, los coeficientes α_i son despreciables y podemos suponer que $\hat{P}_i \approx P_i$. Cuando los coeficientes α_i no son despreciables, para aplicar eficientemente el método es importante eliminar tanto como sea posible la señal (ruido) común (síncrona) TM . Esta señal (ruido) se puede estimar con mediciones suplementarias sobre los gatos o sobre la estructura de la TBM. Esto se puede usar también con los propósitos de TSWD en la aproximación en la que la TBM es un punto de origen, es decir se puede usar con métodos de TSWD convencionales que son ya conocidos. Una estimación comparativa aproximada puede obtenerse con la suma

$$\sum_i P_i = T_M \sum_i \alpha_i + \sum_{ij} H_{ij} S_j \quad (9)$$

observando que la relación de amplitud RMS entre el primer y el segundo término del segundo miembro de la ecuación precedente se incrementa según \sqrt{N} , y que, con un número adecuado de mediciones piloto, el segundo término puede convertirse en relativamente despreciable. La señal TM puede estimarse también con el uso conjunto de mediciones suplementarias y técnicas de independencia estadística.

[0085] Pueden obtenerse mediciones suplementarias opcionales mediante los sensores colocados en posiciones de empuje o próximos a otras fuentes de ruido mecánico.

[0086] Es importante usar un número adecuado de sensores piloto para obtener una estimación completa de la respuesta del sistema. Para conseguir las señales de origen independientes es necesario determinar H y calcular

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} \hat{P}_1 \\ \vdots \\ \hat{P}_N \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0087] La operación de determinación de H puede llevarse a cabo por varios métodos, que se pueden usar por separado o conjuntamente. H puede medirse directamente con impulsos de ensayo impartidos y registrados en todos los puntos de origen. Una estimación de la solución de la ecuación (10) se puede calcular también usando los datos registrados, con la suposición de que las señales S_i son estadísticamente independientes entre sí, es decir que

$$S_i S_i^* = \delta_{ij} \quad (11)$$

Suponiendo por simplicidad señales de amplitud unidad, donde δ_{ij} es la función delta de Kronecker y el asterisco “*” representa el complejo conjugado. La ortogonalización y estimación de los vectores se obtiene con un método del tipo

$$\begin{pmatrix} \hat{S}_1 \\ \vdots \\ \hat{S}_N \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} \hat{P}_1 \\ \vdots \\ \hat{P}_N \end{pmatrix} \quad (12)$$

donde \hat{S} es una estimación de S para la que tenemos $S \cong \hat{S}$, donde Q es una matriz de modo que el producto de Q y su conjugada traspuesta Q^T es la recíproca de la matriz de covarianza cruzada CP del vector de los pilotos \hat{P} , es decir

$$CP = \begin{pmatrix} \hat{P}_1 \hat{P}_1^* & \dots & \hat{P}_1 \hat{P}_N^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{P}_N \hat{P}_1^* & \dots & \hat{P}_N \hat{P}_N^* \end{pmatrix} = \frac{I}{QQ^T} \quad (13)$$

donde I es la matriz identidad. La ecuación (13) se calcula verificando que los vectores ortogonales obtenidos con la ecuación (12) son representativos de las mediciones independientes en los varios puntos. Alternativamente, es posible también trabajar con métodos de separación estadística (ciegos) si las señales estadísticamente

independientes en los diversos puntos de origen tienen distribuciones mutuamente diferentes, no gaussianas.

[0088] Bajo condiciones adecuadas, se supone, por el principio de reciprocidad, que la matriz H es simétrica, es decir igual a su traspuesta, es decir

$$H = H^T \quad (14)$$

en cuyo caso es suficiente calcular solamente la semi-matriz triangular superior. Más aún, en presencia de propiedades de simetría constructiva de la TBM, puede ser suficiente calcular un número más pequeño de términos relativos a la matriz compleja, por ejemplo solamente para algunas posiciones angulares si la estructura de la TBM tiene propiedades periódicas.

[0089] Se observa que el grado de separación de las señales S, que puede obtenerse de la inversión de dicha matriz, puede depender de la frecuencia de la señal, dado que las señales en las frecuencias bajas son relativamente menos sensibles a las características locales de la TBM y son separables.

[0090] Una vez que se han obtenido las señales independientes S en los diversos puntos de la TBM, se calcula su posición instantánea con la ecuación (2) y opcionalmente sus componentes orientados con las ecuaciones (3) y (4).

[0091] Así, las señales piloto se expresan en ventanas en relación al paso de los sensores respectivos a través de un volumen parcial predefinido, para identificar la señal en una zona de emisión que es fija con relación a la formación, es decir en el interior de dicho volumen parcial.

[0092] La correlación C de la señal registrada por el geófono en G con las señales piloto S obtenidas desde los sensores distribuidos sobre la cabeza de la TBM se puede expresar en el dominio de las frecuencias f de Fourier como

$$C = GS^* \quad (15)$$

[0093] En realidad el origen S emite la señal en posiciones que varían continuamente con relación a la formación durante la rotación. El componente instantáneo de la señal detectada viene dado en un sistema fijo de referencia. O se supone aproximadamente que un sensor que pasa a través de un volumen parcial predefinido del frontal o formación de roca está próximo y las coordenadas medias del sensor en el volumen se usan para establecer los componentes de la señal detectada en el sistema fijo de referencia.

[0094] Preferiblemente, se puede considerar un particionado en base a sectores angulares enfrentados a la cabeza de la TBM que varía con el radio, en el que el origen se distribuye en arcos claramente cortos limitados a intervalos radiales adecuados para representar, como una buena aproximación, un punto de origen para los propósitos de análisis de la presente invención. Con referencia a la Fig. 1, en la que el cuerpo de difracción D se ilumina por las señales emitidas por la TBM, se debería observar, véase la Fig. 2, que el sector angular, $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$, dentro del volumen, se mantiene relativamente fijo a la formación. El origen se localiza periódicamente en dicho sector angular a intervalos de tiempo

$$t_1 + nT_R \leq t \leq t_2 + nT_R \quad (16)$$

donde n es un entero y T_R es el periodo de rotación dado por

$$T_R = \frac{2\pi}{\omega} \quad (17)$$

donde

$$\begin{aligned} t_1 &= t(\theta_1) \\ t_2 &= t(\theta_2) \end{aligned} \quad (18)$$

[0095] En otras palabras, la correlación (y/o deconvolución) usa la señal de origen s, donde s en minúsculas es la señal en el tiempo y S en mayúsculas es la Transformada de Fourier correspondiente en las frecuencias, modificada en el tiempo, para seleccionar solamente la señal en ventanas de tiempo que corresponden a la localización del origen en el arco de emisión, calculando

$$\tilde{s} = \begin{cases} s & t_1 + nT_R \leq t \leq t_2 + nT_R \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (19)$$

[0096] En el dominio de la frecuencia, se obtiene la señal correlacionada

$$\tilde{C} = G\tilde{S}^* \quad (20)$$

5 **[0097]** Por ejemplo, si la velocidad de rotación de la TBM es de 10 revoluciones por minuto, $T_R = 6$ segundos y se
 10 recorre un arco de 30 grados en 0,5 segundos. Por lo tanto se usan 0,5 segundos de datos cada 6 segundos de
 grabación. Sin embargo, donde lo permiten las condiciones de simetría, el arco de emisión se puede cubrir por
 diversos puntos de origen S_k con radios claramente similares, con R_k entre R_{min} y R_{max} , que de vez en cuando,
 alternativamente, se sitúan dentro del mismo sector angular fijo de emisión. En este caso, el tiempo de medición útil
 de la señal de origen se puede incrementar hasta que se cubre el tiempo completo en el que tiene lugar la emisión
 de la señal continua. Se obtiene

$$\tilde{s} = \sum_k \tilde{s}_k \quad (21)$$

15 **[0098]** Es preferible para el cálculo que las ventanas de tiempo indicadas esquemáticamente en la ecuación (19)
 sea realizado por medio de rampas para evitar efectos “de timbre” introducidos por el truncado de los datos digitales
 generados. Un ejemplo de la suma (21) con datos sintéticos para un único periodo de rotación se muestra en la Fig.
 5, en la que la traza que representa la señal \tilde{s} (ecuación 21) y una fuente ideal asociada con el volumen se obtiene
 colocando en sucesión las trazas de los sensores que gradualmente pasan a través de un volumen parcial
 predefinido.

20 **[0099]** El particionado de la cabeza de la TBM y del volumen de formación de roca al que está enfrentado puede
 llevarse a cabo de acuerdo con varias formas dentro de la capacidad de un experto en la técnica, con el propósito de
 iluminar mejor elementos reflectantes o difractantes así como para la investigación de las señales transmitidas por
 delante y alrededor de la TBM.

25 **[0100]** Los elementos y características ilustrados en las diversas realizaciones preferidas se pueden combinar
 mientras permanecen dentro del alcance de protección de la presente solicitud.

REIVINDICACIONES

1. Método para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel que comprende las siguientes etapas:

- 5 disposición de uno o más sensores piloto (P1, P2, etc.) sobre la cabeza de una máquina de perforación (TBM),
disposición de uno o más sensores sísmicos (G1, G2, etc.) en contacto con una formación de roca a ser
perforada para registro de una señal sísmica reflejada y/o transmitida,
10 división virtual de la formación de roca a ser perforada en volúmenes parciales,
registro continuo de señales detectadas por medio de los sensores mencionados anteriormente (P1, P2,... G1,
G2,...)

caracterizado por que dicho método comprende adicionalmente las siguientes etapas:

- 15 creación de ventanas de tiempo de las señales piloto registradas por dichos sensores piloto (P1, P2, etc.) cuando
pasan a través de dichos volúmenes parciales predefinidos, para obtener al menos un trazado piloto
independiente para cada uno de dichos volúmenes parciales, relacionando dicho al menos un trazado piloto con
dicha señal sísmica reflejada y/o transmitida para la caracterización de la formación de roca a ser perforada.
- 20 **2.** Método de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** dichos sensores piloto son capaces de
detectar componentes de vibración, de aceleración y/o de fuerza de acuerdo con un primer sistema de referencia
asociado con la cabeza de la máquina de perforación, en el que un eje de coordenadas de referencia se asocia con
el eje de rotación de la máquina.
- 25 **3.** Método de acuerdo con las reivindicaciones precedentes, que comprende adicionalmente una etapa de registro
de parámetros instantáneos de la excavación/perforación, que incluye el avance y/o ángulo de rotación y/o velocidad
de penetración ROP y/o velocidad de rotación ROP y/o empuje.
- 30 **4.** Método de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende, cuando el avance y el ángulo de rotación de la
máquina de perforación son conocidos, una etapa adicional de asociación con dicha formación de roca, de un
segundo sistema de referencia integral con ella y realización de la transformación de coordenadas de dichos
componentes de vibración desde dicho primer sistema de referencia a dicho segundo sistema de referencia.
- 35 **5.** Método de acuerdo con las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** dicha etapa de relación de
dicho al menos un trazado piloto con dicha señal sísmica reflejada comprende una operación de correlación y/o
deconvolución entre dichas señales.
- 40 **6.** Dispositivo para la adquisición y procesamiento de señales sísmicas durante la perforación de un túnel que
comprende medios de procesamiento capaces de ejecutar las etapas descritas en una cualquiera de las
reivindicaciones precedentes.
- 45 **7.** Programa de ordenador que comprende medios para programas codificados adaptados para realizar las etapas
de las reivindicaciones 1 a 5, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.
- 45 **8.** Medio legible por ordenador que comprende un programa grabado, comprendiendo dichos medios legibles por
ordenador medios para programas codificados adaptados para realizar las etapas de las reivindicaciones 1 a 5,
cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

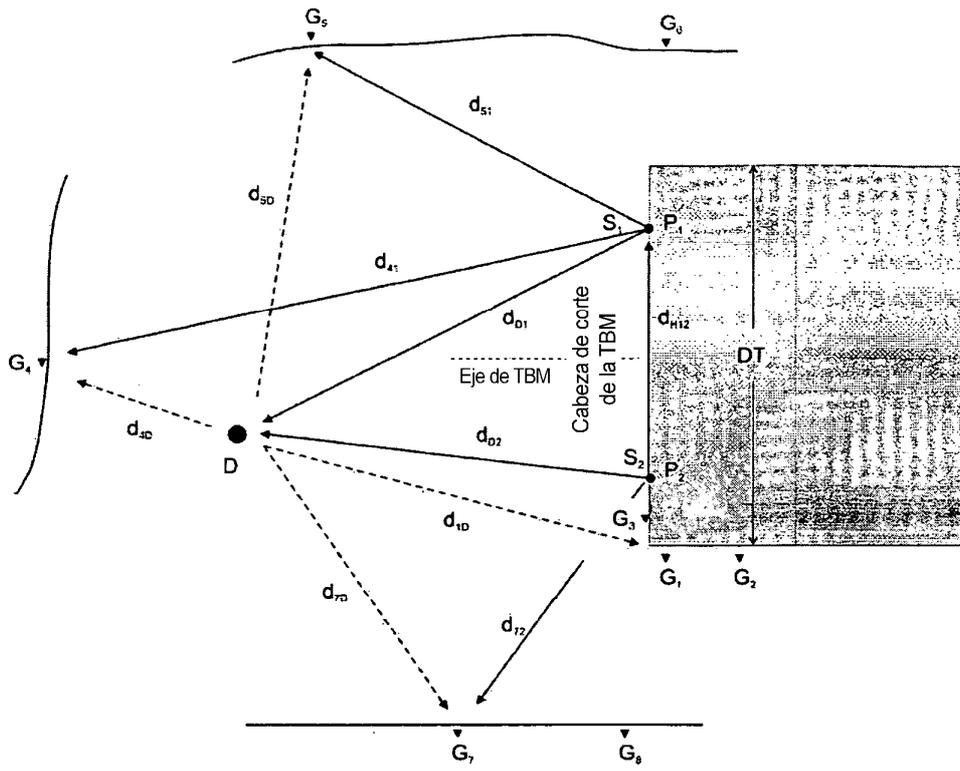


Fig. 1

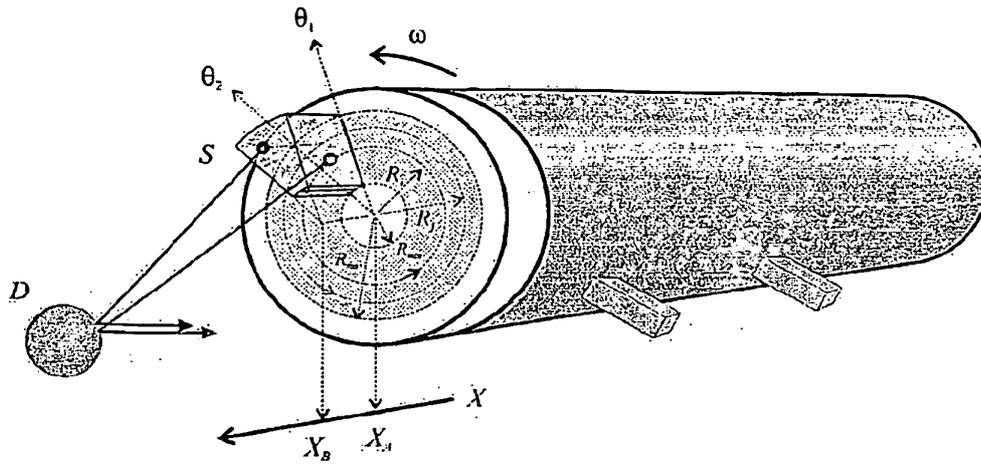


Fig. 2

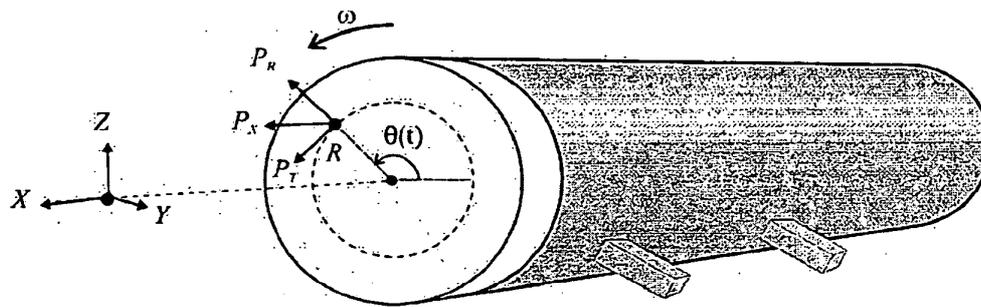


Fig. 3

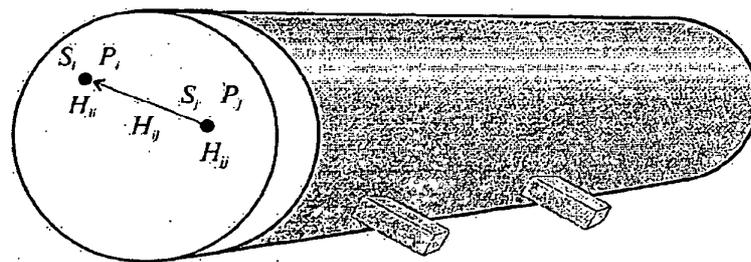


Fig. 4

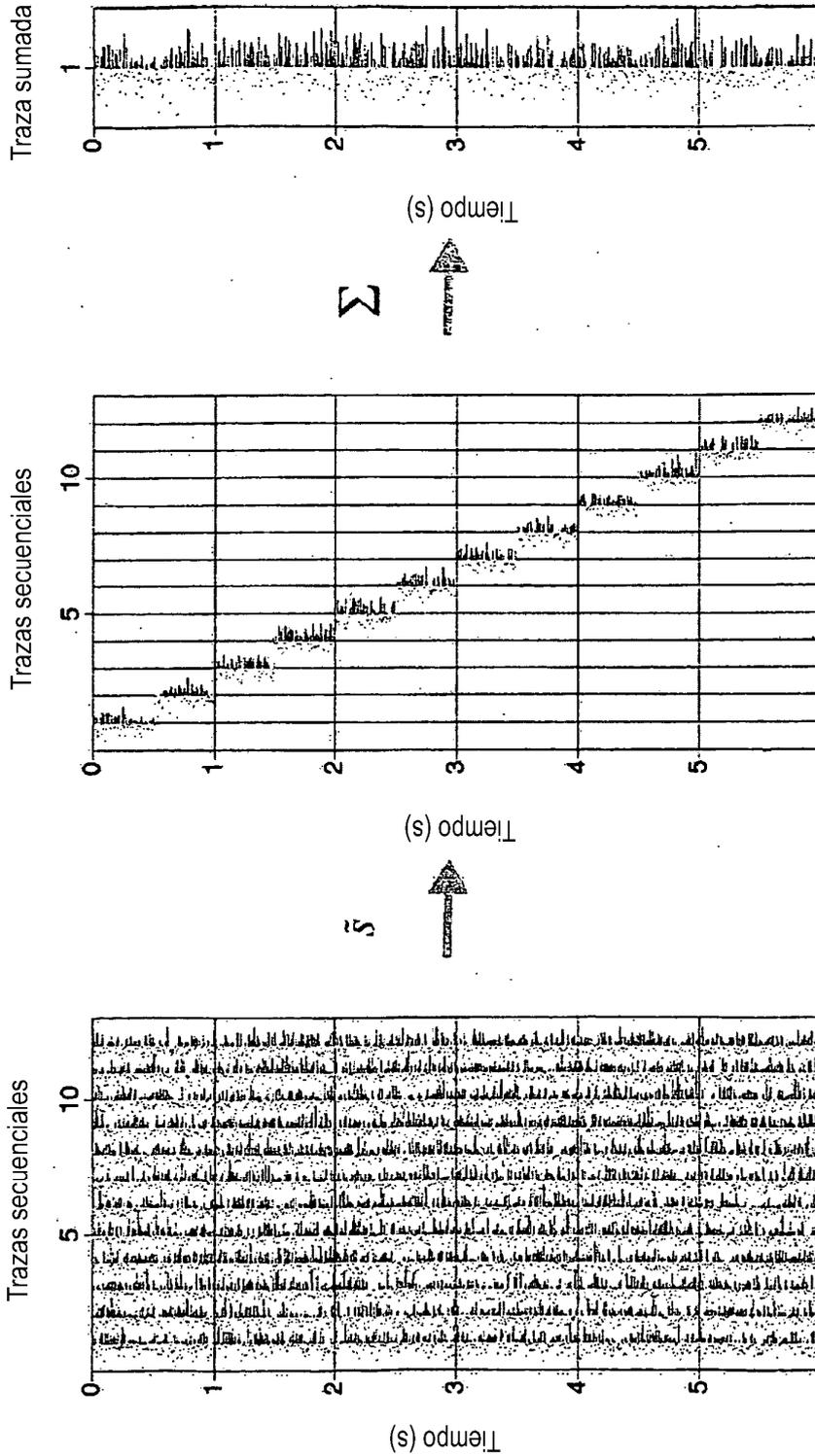


Fig. 5