

CONVERSIÓN Y GESTIÓN DE ENERGÍA DE FONDO DE POZO MEDIANTE EL USO DE UNA BOMBA DE DESPLAZAMIENTO AJUSTABLE DINÁMICAMENTE VARIABLE

CAMPO TÉCNICO

[0001] El aparato y métodos descritos en esta invención se refieren a la perforación de pozos y la navegación de precisión y colocación de trayectorias de pozo de perforación, incluyendo pozos para la producción de petróleo crudo hidrocarburo o gas natural. Más específicamente, el aparato y métodos descritos en esta invención se refieren a un conjunto de fondo de pozo perforación giratoria que es orientable y una sección de energía de desplazamiento positivo, que puede utilizarse independientemente o en combinación unos con otros.

ANTECEDENTES

[0002] Los sistemas de perforación direccionales giratorios se han utilizado en la perforación direccional de hidrocarburos. En general, estos sistemas han utilizado ya sea la tecnología "push-the-bit" o "point-the-bit". El tipo anterior de sistema descentra continuamente la broca en una dirección dada, mientras que el último cambia la dirección de la broca en relación con el resto de la herramienta. Ambos tipos de sistemas giratorios direccionales existentes ofrecen ventajas significativas, aunque ambos también sufren de ciertos inconvenientes, como se discute en más detalle a continuación.

[0003] Una descripción anterior para un aparato de perforación direccional giratoria y el método se remonta por lo menos a 1973 y se describe por Bradley en la Patente de los Estados Unidos No. 3.743.034 (en adelante "Bradley"). Esta descripción cubre un rango de temas, tales como el uso de una turbina de fondo de pozo impulsada por lodo o un motor eléctrico para accionar una bomba hidráulica de desplazamiento positivo, el uso de una junta universal para conectar dos ejes que puede estar arbitrariamente y continuamente articulados una con respecto a la otra, y el uso de pistones hidráulicos como accionadores para mantener continuamente una dirección deseada de desplazamiento que es constante con respecto a una referencia terrestre a medida que la herramienta está girando. Dado que Bradley precede a la aplicación comercial de microprocesadores de herramientas de fondo de pozo, que se basa en un enlace de telemetría de alta velocidad a la superficie utilizando tubería de perforación por cable donde los segmentos de conductor eléctrico aislado se construyen en cada junta del tubo de perforación (según lo descrito por Fontenot en

1970 en la Patente de los Estados Unidos No. 3.518.699) para llevar señales eléctricas a través de la tubería de perforación a la superficie con el fin de controlar la dirección de la herramienta. Bradley revela el control del ángulo de deflexión de la unidad de sesgamiento mediante la regulación de la duración del tiempo de apertura y cierre de las válvulas de control de pistón, las mismas válvulas que también controlan la dirección de perforación en esta configuración, para permitir que mayores o menores cantidades de líquido entren o salgan de los pistones cambiando así la amplitud del movimiento recíprocante de los pistones.

[0004] Algunos diseños anteriores de herramientas direccionales giratorias utilizan el lodo de perforación y la caída de presión a través de la broca para accionar el mecanismo de unidad de sesgamiento, independientemente de si se está utilizando la técnica point the bit, la técnica push the bit, o una combinación de las dos. Otros diseños anteriores de herramientas pueden utilizar una turbina de lodo para conducir un alternador eléctrico para generar la energía eléctrica para desplazar la broca y mantener el desplazamiento angular.

[0005] El aparato direccional giratorio que es el objeto de esta descripción resuelve un número de limitaciones operacionales asociadas con los sistemas giratorios direccionales existentes. Inicialmente, es importante tener en cuenta que esta descripción abarca dos invenciones distintas, y ambas se describen en más detalle a continuación - una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable y una articulación de bisagra que limita la articulación de la broca a un solo grado de libertad (en lugar de una junta universal con 2 o más grados de libertad), proporcionando deflexión bidireccional simétricamente coherente espacialmente en fase de la broca. Ambas invenciones se pueden utilizar juntas, pero cualquiera de las dos también se pueden utilizar independientemente de la otra. El término "en fase espacial" se refiere a la sincronización dinámica de un evento o acción relacionada con la articulación de la broca, cuando la herramienta está girando, con respecto a un punto de referencia terrestre fijo como la gravedad o el campo magnético de la tierra. La fase espacial se expresa en términos de la orientación de rotación instantánea (una cara de la herramienta) de una marca de referencia en la herramienta con respecto a la gravedad (cara de la herramienta de la gravedad) o el campo magnético de la tierra (cara de la herramienta magnética).

[0006] En primer lugar, con respecto a las ventajas de la bomba de desplazamiento de pistón axial dinámicamente variable, utilizar una bomba de desplazamiento positivo fija en el fondo de pozo para generar energía hidráulica sólo

funciona a través de un rango muy estrecho de caudales de flujo de lodo. Si la turbina está generando suficiente energía en el extremo inferior del rango de flujo, se estará generando energéticamente demasiada energía en el extremo superior del rango de caudal a menos que el rango de caudal admisible sea extremadamente estrecho, restringiendo así la capacidad del empujador de herramienta para optimizar los parámetros de perforación para la eficiencia y seguridad sin dañar la herramienta. El uso novedoso de una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable revelada en la presente resuelve este problema mediante la reducción de forma dinámica del desplazamiento de la bomba por cada revolución para mantener una energía constante a medida que aumenta el flujo de lodo, y dinámicamente el aumento de su desplazamiento por revolución a medida que se reduce el flujo de lodo. En segundo lugar, la amplitud de las deflexiones de brocas, ya sea estática u oscilatoria, se puede controlar mediante el ajuste adicional del desplazamiento por revolución de la bomba de desplazamiento dinámicamente variable, lo que permite controlar la amplitud de la articulación de brocas independiente del control de la dirección de la perforación cuando la herramienta está girando, si el objetivo es el de mantener un ángulo de desplazamiento de brocas constante independiente de la rotación o si la broca es un reciprocante en la misma frecuencia que la rotación del collar de perforación.

[0007] Tal como se utiliza en la presente, el término "bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable" se refiere a una bomba hidráulica con un cilindro giratorio, accionada por un eje de accionamiento, que se puede configurar con dos o más pistones, dispuestos simétricamente en el cilindro, que corresponde a una dirección que es paralela al eje de rotación del bloque de pistón cilíndrico. La estructura de esta bomba se describe con más detalle en las siguientes secciones de esta revelación. Un extremo de cada pistón puede terminar con una "copa zapata" que contacta y se desliza sobre la cara de una placa oscilante. El plato oscilante no está conectado al eje de accionamiento. En cambio, la placa oscilante está montada sobre un eje independiente, cuya línea central es ortogonal a, pero se cruza con, la línea central del eje de transmisión. Cuando la cara de la placa oscilante es perpendicular al eje del eje de accionamiento, se conoce como ángulo de la placa oscilante de "cero grados." En esta posición de la placa oscilante, según gira el bloque de cilindros, los pistones no son recíprocos y el desplazamiento de la bomba es cero. A medida que el ángulo de inclinación de la placa oscilante se incrementa en cierto ángulo θ , los pistones comienzan a ser recíprocos, aumentando el desplazamiento de la bomba de

acuerdo con la ecuación $Q = Q_o * \sin(\theta)$, donde $Q_o = [Q_{MAX}/\sin(\theta_{MAX})]$, donde Q_{MAX} es el desplazamiento práctico máximo de la bomba por cada revolución del eje de accionamiento en el máximo ángulo de la placa oscilante práctica θ_{MAX} . El otro extremo de los pistones está conectado a los puertos de fluido hidráulico "A" y "B" de la bomba. Dependiendo de si el ángulo de la placa oscilante es positivo o negativo, "A" será la salida y "B" de la entrada, o "A" será la entrada y "B" la salida, respectivamente. El ángulo de la placa oscilante puede ser controlado por un accionador eléctrico o un accionador hidráulico a través de un enlace que está conectado a la placa oscilante. La posición de la placa oscilante se puede medir por un LVDT ("transformador diferencial variable lineal") o un potenciómetro simple. En una realización preferida, el ángulo de la placa oscilante se controla de forma dinámica por un módulo de control de la dirección.

[0008] En tercer lugar, el uso de una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable permite el control variable instantánea y continuamente de la severidad de pata de perro del pozo en las secciones curvas sin tener que puntear el exceso de líquido de alta presión de vuelta al tanque. Para las herramientas que utilizan el lodo de perforación y la caída de presión a través de la broca para accionar las superficies de control de dirección, el accionamiento es típicamente de todo o nada. En esos casos, no es posible accionar parcialmente la deflexión de la broca. Al permitir el accionamiento parcial de la deflexión de brocas, se puede conseguir una granularidad más fina de ajuste de la dirección y mantenerse durante la perforación.

[0009] La segunda invención revelada en la presente se refiere a una articulación de bisagra que limita la articulación de la broca con respecto a la herramienta a un solo grado de libertad. Como se explicará en la discusión que sigue, la limitación de la articulación de la broca a un solo grado de libertad con relación a un punto fijo de la herramienta y utilizando el método de deflexiones bidireccionales simétricas coherentes espacialmente en fase con relación a un punto de referencia terrestre fija, para controlar la dirección de la perforación, permite el uso de un solo eje de bisagra en lugar de dos grados de libertad de junta universal para fijar la broca a la parte inferior de la herramienta de perforación orientable giratoria. A partir del nuevo método que se requiere para dirigir el pozo se obtiene un beneficio pleno de la mecánica simplificada de la herramienta de perforación orientable giratoria novedosa conocida como "deflexión bidireccional simétrica coherente espacialmente en fase" de la broca. Esto se explicará en más detalle más adelante en esta revelación. La bisagra limita el movimiento de la broca a un solo grado de libertad. Sin embargo, se requieren

dos grados de libertad con el fin de dirigir un pozo hacia un objetivo previsto. En la invención de esta revelación, el segundo grado de libertad es proporcionado por la rotación de la herramienta de perforación orientable giratoria durante la perforación.

[0010] Un BHA o "conjunto de fondo de pozo" describe la sección inferior o de fondo de la sarta de perforación que termina con la broca y se extiende hacia arriba en el pozo hasta el punto justo por debajo del extremo inferior de la tubería de perforación. Además de la broca, el BHA puede estar compuesto de cualquier número de collares de perforación para el peso añadido o collares de propósito especial que pueden o no pueden incluirse tal como, pero no limitado a: estabilizadores, subescariadores, motores de lodo de desplazamiento positivo, *bent subs*, collares de perforación instrumentados para la medición de diversos parámetros de formación y ambientales (para la determinación, versus profundidad y tiempo, de la mezcla y volumen de fluidos en la formación o litología de formación o formación y propiedades mecánicas de fondo de pozo o inclinación y acimut de pozo) o herramientas direccionales giratorias, tal como el sujeto de esta revelación. Los componentes que forman parte de un BHA dado se seleccionan para optimizar la eficacia de perforación y la colocación y geometría del orificio del pozo.

[0011] El momento o la puesta en fase espacial de las deflexiones de brocas se controla de modo que, para un observador que es estacionario con respecto a la tierra, la broca se deflexiona en forma recíproca en la misma dirección por cada 180° de rotación de BHA. A la inversa, a un observador que gira con la herramienta, es decir, es estacionario con respecto a la herramienta, para cada rotación de 360 grados de la herramienta, se observa una deflexión de la broca positiva hacia una marca de referencia fija (una "línea de marcado") seguido por una deflexión de broca negativa lejos de la marca de referencia de la línea de marcado, los dos eventos de deflexión separados por 180° de rotación de la herramienta.

[0012] Otros beneficios de la utilización de un solo grado de libertad de la articulación con relación a un punto fijo en el collar se explicarán adicionalmente en la revelación a continuación. Aunque no es una realización preferida de la invención, debe entenderse que una bomba de desplazamiento dinámicamente variable hidráulica también se podría utilizar para controlar las herramientas de fondo de pozo que no sean la herramienta direccional giratoria descrita anteriormente, incluyendo, pero no limitado a un sistema más convencional con múltiples accionadores y un pivote con múltiples grados de libertad de articulación para mantener continuamente un ángulo de articulación de la broca en una dirección particular que se fija con

respecto a la tierra o para controlar la velocidad de rotación en sentido contrario de un conjunto geoestacionario para mantener una orientación fija del conjunto geoestacionario con respecto a la tierra a medida que gira la herramienta.

SÍNTESIS

[0013] Un objetivo de un aspecto de la presente invención es proporcionar una nueva herramienta de perforación orientable giratoria controlada dinámicamente, conectada de forma roscada a un componente de accionamiento de giro como el eje de salida de un motor de lodo o una sarta de perforación giratoria que es impulsada por una tabla giratoria o la parte superior de accionamiento de un equipo de perforación, que permite la perforación direccional de secciones seleccionadas del pozo, ya sea curva o recta, por precisión de la dirección de la perforación de pozo hacia un objetivo bajo la superficie. La herramienta de perforación direccional giratoria será capaz de perforar más allá de la zapata de carcasa, perforar la curva y el orificio de drenaje para la profundidad objetivo y "alcance" objetivo con la inclinación especificada y el acimut, en una sola operación de brocas, lo que minimiza el tiempo de equipo para completar el pozo.

[0014] Uno de los problemas que este aspecto de la presente invención intenta abordar es reducir al mínimo la complejidad mecánica de una herramienta de perforación orientable giratoria controlada dinámicamente. En una realización preferida, esto se logra mediante el uso de la unión de articulación más simple de la disposición de broca al extremo inferior del collar de perforación direccional giratorio, es decir, una bisagra simple. El conjunto de brocas incluye la broca unida al extremo inferior de un eje de la broca de articulación. Unir el extremo superior del eje de brocas al collar de perforación por medio de una unión de bisagra simple limita la articulación del conjunto de brocas a un solo grado de libertad con respecto a una referencia del sistema de coordenadas fijado, y que gira con, el collar de perforación direccional giratoria (el "sistema de coordenadas de la herramienta"). Durante las operaciones de dirección activa, el eje largo del conjunto de brocas está reciprocamente, bidireccionalmente, y simétricamente deflexionado en la misma frecuencia que la rotación del collar de taladro direccional giratorio por medio de un único accionador bidireccional que gira con el collar de taladro direccional giratorio. La simplificación mecánica puede estar derivada de la aplicación de cálculo de una plataforma de navegación geoestacionaria-virtual de 9 ejes opcional compuesta por sensores que están empaquetados en una cámara física que se fija a, y gira con, el collar de taladro direccional giratorio, eliminando de este modo cualquier conjunto mecánico o aparato geoestacionario y/o casi geoestacionario que contra-gire con respecto al collar de perforación direccional giratoria pero que es de otro modo una parte del BHA orientable giratorio. La eliminación de la necesidad de un montaje mecánico

geoestacionaria y/o casi geoestacionario elimina la necesidad de auxiliares para la rotación de las conexiones eléctricas (por ejemplo, anillos de deslizamiento), sellos de presión, y cojinetes.

[0015] Una diferencia entre la realización descrita anteriormente del aparato de herramienta de perforación orientable giratoria descrito en la presente y otras herramientas de perforación giratorios direccionales es que un eje de la broca bidireccional y repricocante está conectado mecánicamente a la parte inferior del collar de perforación direccional giratoria por medio de un único eje de articulación que transmite el torque y el peso del collar de taladro direccional giratorio al eje de la broca y a la broca. Este diseño contrasta con las mecánicas más complejas de unión y de actuación que se requieren para soportar dos o más grados de libertad de la articulación de herramientas que de forma continua point-the-bit en una dirección dada con respecto a una referencia terrestre a medida que la herramienta direccional giratoria gira, por ejemplo: juntas ranuradas de bolas, juntas homocinéticas, o juntas universales con varios accionadores independientes. Para las herramientas de push-the-bit que continuamente descentran la broca en una dirección dada, se requieren múltiples accionadores y/o superficies de control y la capacidad de mantener la ubicación de centrado de broca durante la perforación puede estar limitada por el número y la colocación de los accionadores configurados.

[0016] El método de la dirección de un pozo en una dirección particular con respecto a la gravedad o el norte magnético se lleva a cabo mediante el control de la fase espacial de dichas deflexiones recíprocantes simétricas coherentes de dicho eje de la broca con respecto a cualquiera de las caras de herramienta de gravedad (GTF) o cara de herramienta magnética (MTF), a medida que la herramienta gira. (Una GTF instantánea de cero grados se corresponde con el punto en que una marca de referencia en la herramienta, conocida como "línea de marcado", está orientada hacia la parte superior del pozo de sondeo. Una GTF instantánea de 180° se corresponde con el punto en que la línea de marcado se orienta hacia el fondo del pozo de sondeo. Similarmente para MTF, una MTF instantánea de cero grados se corresponde con el punto en que la línea marcada que se orienta hacia el norte magnético; y una MTF instantánea de 180° se corresponde con el punto en que la línea de marcado está orientada hacia el sur magnético. En el caso de un pozo de sondeo perfectamente vertical, el valor de GTF es indeterminado. Y de manera similar para MTF, en el caso en que el acimut de orificio es hacia el norte o hacia el sur y la inclinación del fondo de pozo de sondeo es igual a la inmersión local del campo magnético de la tierra,

entonces el valor de MTF es indeterminado). Esto permite a la broca eliminar preferencialmente la formación en un lado particular de la perforación ("la parte frontal"), mientras elimina menos formación en el lado opuesto del pozo de sondeo ("la parte trasera") con el fin de cambiar la dirección del pozo hacia una inclinación objetivo y/o acimut con el propósito de perforar pozo de sondeo curvado y/o recto progresivamente hacia un objetivo geométrico o geológico deseado o para perforar en forma activa los pozos de sondeo verticales. Este método permite un diámetro de pozo de sondeo que se agranda ligeramente de cero a aproximadamente 5 por ciento del diámetro nominal de la broca en las secciones curvas, lo que reduce las fuerzas de fricción y las concentraciones de esfuerzos mecánicos en el BHA y otros elementos tubulares a medida que se deslizan o rotan por la pata de perro, lo que resulta en menos fricción en la sarta de perforación y por lo tanto más peso y torque en la broca mientras está en la curva y por debajo de la curva. El ligero aumento del pozo de sondeo durante las operaciones de dirección durante la perforación de una sección curvada es un resultado directo del movimiento de giro de la broca mientras la herramienta está girando. Esto se explicará en detalle en la discusión de las FIGS. 7C y 7D, a continuación. La deflexión de la broca durante las operaciones de dirección aumenta el diámetro de corte efectivo de la broca en un pequeño porcentaje en la dirección preferencial de dirección. Al mismo tiempo que el material adicional está siendo retirado preferentemente de la "parte frontal" del orificio en la dirección en que se dirige la herramienta, se elimina menos material de la "parte posterior" del orificio, lo que resulta en una trayectoria de pozo de sondeo curvada con un diámetro de pozo de sondeo ligeramente ampliado. Otra ventaja del método novedoso revelado en la presente es que durante las operaciones de dirección, mientras está en la curva, se añade energía de corte mecánica adicional a la broca a medida que se lleva a cabo la perforación. Esto es debido al movimiento adicional impartido a la broca como un resultado de las operaciones de dirección. Los otros métodos que mantienen una orientación descentrada o en ángulo constante de la broca de perforación a medida que gira la herramienta no añaden ninguna energía de corte adicional a la broca. En términos prácticos, la energía de corte mecánica adicional proporcionada a las brocas 12 resulta en una perforación más rápida en la curva y una mayor eficiencia global de perforación.

[0017] El uso del método de movimientos recíprocos simétricos coherentes en fase espacial de la broca para la perforación direccional está en contraste directo con los sistemas tradicionales de point-the-bit que mantiene de forma continua un

ángulo de desplazamiento dado del eje de brocas de rotación con respecto al eje de rotación de BHA y un dato terrestre fijo que es independiente de la rotación de la herramienta de perforación orientable giratoria cuando el collar está girando durante las operaciones de dirección, lo que requiere la articulación mecánica y de accionamiento con dos o más grados de libertad. Además, el uso de deflexiones reciprocantes simétricas coherentes bidireccionales en fase especial de la broca está en contraste directo con los sistemas tradicionales push-the-bit que mantienen continuamente un desplazamiento lateral paralelo constante del eje de brocas de rotación con respecto al eje de rotación de BHA y un dato terrestre fijo que es independiente de la rotación de la herramienta de perforación orientable giratoria cuando el collar está girando durante las operaciones de dirección, lo que requiere el accionamiento mecánico con dos o más grados de libertad para generar continuamente fuerzas de lado de descentramiento en una dirección dada.

[0018] Algunas realizaciones de la invención utilizan una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable accionada por lodo de perforación que regula la energía de entrada variable y/o fluctuante disponible de una turbina accionada por lodo de perforación y también regula la velocidad de flujo de salida del fluido hidráulico a presión a la carga en respuesta a la demanda de energía de los accionadores de la unidad de sesgo para controlar instantáneamente y continuamente la fuerza de deflexión y la amplitud de deflexión de las reciprocaciones bidireccionales simétricas coherentes del eje de la broca y la broca de perforación. El término "unidad de sesgo" describe que la sección de la herramienta direccional giratoria que "sesga" o dirige la herramienta en una dirección dada. La unidad de sesgo se compone de la broca, medios de accionamiento y control para descentrar o articular la broca, un collar, opcionalmente uno o más centralizadores, y una fuente de energía. La salida de la bomba impulsa un único pistón hidráulico bidireccional con un eje de fuerza que está orientado ortogonalmente tanto al eje de la bisagra y el eje de rotación del BHA, que acciona dichas reciprocaciones simétricas coherentes en fase espacial del eje de la broca y la broca a efectos de dirigir el pozo de perforación en dicha dirección seleccionada. Durante las operaciones de dirección activa, la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable permite el control de variación continua de la amplitud de dichas deflexiones reciprocantes simétrica coherentes de dicho conjunto de brocas con el fin de controlar la severidad de pata de perro (tasa de curvatura) de dicho cambio de dirección de pozo y para controlar dinámicamente las fuerzas de dirección laterales aplicadas a la broca responsiva a las propiedades mecánicas de la

formación, la dinámica de corte y la salud de la broca, la rotación inicial detectada de deslizamiento-atascamiento y/o para permitir la rotación de deslizamiento-atascamiento hasta un límite preestablecido.

[0019] En una realización de la herramienta, la amplitud y puesta en fase espacial de dichas reciprocaciones de brocas coherentes son controladas por un conjunto de microcontrolador y/o microprocesador de herramienta a bordo de fondo de pozo. Este conjunto puede tener diferentes configuraciones que pueden incluir un microcontrolador y/o microprocesador, memoria, memoria no volátil, canales de entrada/salida, varios sensores de navegación, y/o programación almacenada en la memoria que el conjunto ejecuta cuando está en funcionamiento. El conjunto de microcontrolador y/o microprocesador de herramienta a bordo de fondo de pozo genera las señales de control de dirección en respuesta a cualquiera de las superficies que genera comandos u órdenes algorítmicas autónomas derivadas de los parámetros de navegación adquiridos en el fondo de pozo, o una combinación de estos. Así, la herramienta de perforación orientable giratoria de esta invención es dinámicamente ajustable mientras la herramienta se encuentra dentro del pozo durante la perforación y cambia de manera controlable la inclinación y el acimut de la trayectoria del pozo como se desee. La puesta en fase espacial de dicha reciprocaciones coherentes se controla independientemente, separada de la amplitud de las reciprocaciones, mientras se hace girar para perforar el pozo progresivamente en una dirección dada. A la inversa, la amplitud de dichas reciprocaciones se puede ajustar dinámicamente independientemente del ajuste de fase espacial de dichas reciprocaciones, para aumentar de forma continua y progresiva o disminuir la velocidad de curvatura de la perforación de pozo para lograr la trayectoria prevista de perforación de pozo y para optimizar la calidad y suavidad del fondo de pozo. En una realización de la presente invención, durante las operaciones de dirección, el ciclo de trabajo de cada una de las válvulas individuales que operan el accionador hidráulico es 50%, es decir, el tiempo de encendido de cada válvula es aproximadamente igual al tiempo de apagado. Además, las válvulas están fuera de fase con respecto a la otra. Cuando una válvula está en ON, la otra válvula está en OFF. Cuando una válvula está en la transición de OFF a ON, la otra válvula está en la transición de ON a OFF. A medida que la herramienta gira, la sincronización de las señales de control de la válvula con respecto a GTF o MTF controla la dirección espacial donde la herramienta está perforando, pero no la amplitud de las articulaciones de brocas. En cambio, el control del ángulo de la placa oscilante de la bomba de desplazamiento de pistón axial dinámicamente

variable controla la amplitud de las articulaciones de brocas. Este método para controlar de forma independiente la amplitud de las articulaciones por separado de la sincronización de las articulaciones de la broca cuando la herramienta está girando resulta en un movimiento de broca suave y repetible, independientemente de la amplitud de las articulaciones. Este método debe ser contrastado con el método descrito por Bradley que dará lugar a movimientos repentinos en bloques y brocas cuando la herramienta intenta mantener un ángulo de deflexión constante de la broca en una dirección constante con respecto al eje de rotación de la herramienta. Bradley revela la variación del ciclo de trabajo de las válvulas individuales que operan cada uno de los accionadores hidráulicos para controlar la amplitud de las articulaciones de brocas simultáneas con el control de la temporización de cada válvula de encendido y apagado para controlar la dirección donde la herramienta está perforando.

[0020] Las herramientas de perforación orientables giratorias pueden depender de acelerómetros, magnetómetros y giroscopios para proporcionar información de navegación para la dirección de pozos subterráneos para la producción de petróleo y gas o la inyección de agua y/o vapor. Estos sensores de navegación pueden ser empaquetados en un conjunto secundario dentro de la herramienta de perforación orientable giratoria que contra-gira con respecto al collar de perforación de modo que los sensores mantienen una relación estacionaria con respecto a la tierra, a menudo referido como una "plataforma geoestacionaria". Sin embargo, el concepto de un contador de rotación de la plataforma geoestacionaria trae consigo cierta complejidad mecánica accesoria en términos de juntas, cojinetes y anillos colectores, así como un medio de control y el mantenimiento de la rotación en sentido contrario con tasas variables de rotación de BHA y la inercia mecánica significativa de la plataforma geoestacionaria. Bradley US 3.743.034 sugiere el uso de una "referencia inercial" montada directamente a una cámara en el collar de perforación giratorio - en este caso, "una referencia tal como el centro de una (sic) plataforma giroscópica gimbal," empaquetada en la sección de articulación de la herramienta que se encuentra por debajo de la conexión de junta universal - para determinar en qué dirección está apuntando la broca. Una "referencia inercial" es, por definición, una referencia no giratoria o geoestacionaria. Por lo tanto, montando el giroscopio por gimbal en una carcasa giratoria, el giroscopio es una referencia de facto geoestacionaria que mantiene una orientación constante de la plataforma giroscópica con respecto a la tierra por el momento angular del giroscopio.

[0021] En una realización de la presente invención, acelerómetros y magnetómetros se empaquetan y giran con la herramienta que comprende una "plataforma de navegación no inercial giratoria". Uno de los beneficios de depender de una plataforma de navegación giratoria en lugar de una plataforma de navegación inercial geoestacionaria es que los errores de alineación de montaje físico de los sensores de navegación, específicamente los acelerómetros y magnetómetros se pueden minimizar o anular para mejorar la precisión de las mediciones, con el resultado de que la colocación de la perforación será indicada por el cliente. Hay por lo menos dos fuentes de errores de desalineación mecánica cuando se utilizan acelerómetros y magnetómetros. La primera es la falta de alineación del dispositivo dentro de su paquete, y el segundo es la falta de alineación del montaje del paquete a una placa de circuito impreso o un chasis en la herramienta. Los errores de desalineación mecánica afectan a la ortogonalidad relativa de cada uno de los ejes de sensibilidad de los sensores. Los acelerómetros pueden verse afectados además por efectos centrípetos cuando no están montados con precisión en el eje de la herramienta de rotación. Para algunos sistemas micro-electro-mecánicos de doble eje ("MEMS"), la ortogonalidad relativa de los ejes se determina por el proceso litográfico utilizado para fabricar el dispositivo, lo que resulta en una ortogonalidad casi perfecta, eliminando virtualmente una fuente de error cuando se compara con los dispositivos de eje único montados ortogonalmente. Los errores causados por la falta de alineación pueden ser importantes, cuando se dirige activamente un pozo vertical o cuando la inclinación (basculación) de la perforación es, por definición, muy cercana a cero grados o cuando la inclinación del fondo de pozo está cerca de ser horizontal. Cuando se perfora un pozo vertical de forma activa, la inclinación es típicamente especificada como dentro de aproximadamente 1 grado de la vertical. Por ejemplo, para una profundidad objetivo de 10000 pies, la parte inferior de la sección del pozo vertical no se debe desplazar lateralmente más de 175 pies en cualquier dirección con relación a la plataforma de perforación en la superficie o el punto de entrada submarina en el fondo del mar. Para las mediciones transversales de la gravedad y el campo magnético hecho con una plataforma de navegación de rotación, los errores de desalineación y desplazamiento eléctrico ocurren en DC, mientras que las mediciones de interés tienen la misma frecuencia de AC que la velocidad de rotación de la herramienta. Además, las diferencias de ganancia o de sensibilidad entre dos canales transversales ortogonales causadas por desalineación de montaje pueden ser fácilmente corregidas dinámicamente por la normalización de la amplitud de las

mediciones de corriente alterna de un canal con relación al otro para mejorar la precisión de las mediciones. Además, para la medición del campo magnético transversal, habrá una pequeña corrección necesaria para compensar el efecto de piel electromagnética de AC que es proporcional a la frecuencia de rotación. La corrección de fase podría ser de máximo 15 ° y la corrección de amplitud podría ser de máximo 2,6 dB. El efecto es repetible y se puede derivar empíricamente como una función de la frecuencia y de la temperatura. Para las medidas axiales de la gravedad y el campo magnético hecho con una plataforma de navegación de rotación, los errores de desalineación se producen a una frecuencia igual a la velocidad de rotación de la herramienta. La amplitud de la señal de error de AC dará una indicación cuantitativa de la desalineación axial para permitir un pequeño factor de corrección que debe aplicarse a la componente continua de la medición. El filtrado de paso bajo adecuado de las señales de error de corriente alterna eliminará el error. Para la señal magnética axial, no se necesita compensación por efecto de piel electromagnética ya que el componente axial del campo magnético está en DC independientemente de si el collar está girando o no. Sin embargo, el uso de una plataforma de navegación de rotación no elimina la necesidad de desplazamiento de DC y caracterización térmica de ganancia de los dispositivos axiales y caracterización térmica de ganancia de los dispositivos transversales.

[0022] Supóngase, por ejemplo, en un pozo vertical que se perfora con una plataforma de navegación geoestacionario que los acelerómetros x, y, y z están mal alineados por un pequeño ángulo arbitrario en una dirección arbitraria con respecto a un sistema de coordenadas cartesiano fijo a la herramienta. Por lo tanto, al realizar una medición estática, cuya adquisición puede tardar varios minutos, la desalineación de los acelerómetros con respecto al eje de la herramienta afectará a la precisión de la prueba e introducirá una fuente de error en la trayectoria del pozo a menos que sean correctamente calibrados y contabilizados. Considérese que los acelerómetros se montan típicamente ortogonalmente entre sí con respecto a un sistema cartesiano de coordenadas que gira con la herramienta, con el eje z orientado de manera que apunte hacia el fondo de pozo hacia la broca a lo largo del eje de rotación del BHA. Otros dos ejes transversales están etiquetados como "x" e "y", y forman un sistema de coordenadas diestro con "z" para que $\mathbf{i}_x$ dividido $\mathbf{i}_y$ es igual a $\mathbf{i}_z$, donde $\mathbf{i}_x$, $\mathbf{i}_y$, e $\mathbf{i}_z$, son los vectores unitarios correspondientes a sus respectivos ejes cartesianos unidos a la herramienta. Mientras gira, el error de desalineación se comporta de manera diferente para los sensores transversales x e y que donde lo hace para los sensores del eje z.

Para los sensores transversales, la sensibilidad principal es ortogonal al eje de rotación que produce una señal de AC con una frecuencia igual a la frecuencia de rotación y una amplitud proporcional al valor del ángulo de inclinación del fondo de pozo. El error de desalineación transversal produce una pequeña sensibilidad de vector en la dirección z a lo largo del eje de la herramienta. Por lo tanto, la respuesta de error de sensor transversal causada por la desalineación es independiente de la rotación de la herramienta, es decir, se trata de un desplazamiento de DC. El uso de la superposición, la señal total del sensor transversal es la señal de AC principal con un pequeño desplazamiento de DC superpuesto sobre esta. Para los sensores axiales, se aplica lo contrario, el error de desalineación produce una pequeña sensibilidad de vector transversal al eje de la herramienta. El uso de la superposición, la señal total del sensor axial es la señal principal de DC que es proporcional a la gravedad de la tierra por el coseno del ángulo de inclinación más una pequeña señal de error de AC de desalineación superpuesta sobre esta. Sin embargo, el error de desalineación de un sensor axial es simplemente cancelado por el promedio de las muestras durante un número entero de rotaciones de BHA.

[0023] En el caso de un fondo de pozo vertical de manera tal que el eje z de la herramienta está alineado con precisión con el vector de gravedad de la tierra, es decir, cuando el ángulo de inclinación es de cero grados, los acelerómetros transversales x e y no tendrá ningún componente de corriente alterna, sólo un pequeño desplazamiento de sensor de DC. Cuando la amplitud de AC de los acelerómetros transversales es cero, se confirma que el pozo es vertical. Cuando el pozo comienza a desviarse de la dirección vertical, es decir, cuando se inicia la inclinación del pozo, la amplitud de AC de los acelerómetros transversales x e y comienza a aumentar, donde la amplitud es proporcional a la cantidad de la inclinación. El acelerómetro del eje z orientado axialmente mide el coseno del ángulo de inclinación por la gravedad de la tierra y dado que el coseno del ángulo de inclinación es bastante insensible a pequeños cambios en el ángulo de inclinación cuando el acelerómetro axial está alineado con el vector de gravedad de la tierra, no es adecuado para el control de perforación vertical. En la práctica, para el caso en que el eje de la herramienta de rotación está inclinado en un ángulo con respecto al vector de gravedad de la tierra, los acelerómetros transversales se pueden utilizar de forma dinámica para cuantificar la inclinación del fondo de pozo hasta aproximadamente 75 ° de ángulo de inclinación mediante el uso de la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal de AC de los acelerómetros transversales. Por encima de

aproximadamente 75 °, la señal de DC a partir del acelerómetro "eje Z" se debe utilizar para una medición dinámica de la inclinación del pozo.

[0024] Cuando se utilizan los acelerómetros de forma dinámica a la velocidad de rotación del BHA, se utilizan técnicas de reducción de ruido de Gauss para disminuir los efectos de las aceleraciones causadas por choques y vibraciones aleatorias. Para mejores resultados, la respuesta de frecuencia de los acelerómetros de navegación debe ver su banda limitada por la física del dispositivo de manera que el dispositivo es inherentemente insensible a las perturbaciones de alta frecuencia y vibraciones que pueden ser grandes, saturando el dispositivo fuera de la banda de frecuencia de interés, afectando la precisión del dispositivo en la banda de interés. Se entiende que la "banda de frecuencia de interés" significa típicamente frecuencias por debajo de aproximadamente 2 o 3 veces la velocidad de rotación máxima del BHA. Además, la selección adecuada del dispositivo reducirá al mínimo los efectos de rectificación de vibración, teniendo en cuenta los beneficios de la filtración del ruido a realizar para el cálculo robusto de inclinación de basculación de pozo de sondeo, acimut de inclinación de pozo de sondeo, y GTF y MTF instantáneas de la herramienta.

[0025] Una realización de la presente invención se basa en una plataforma geoestacionaria virtual completamente autónoma con mediciones de autocorrección y autocalibración para generar las señales y el tiempo requeridos para dirigir dinámicamente la herramienta de perforación orientable giratoria en una dirección deseada con respecto a un punto de referencia terrestre o de objetivo. Tres acelerómetros ortogonales, tres magnetómetros ortogonales, y tres giroscopios de velocidad ortogonal están dispuestos en la herramienta para cubrir un amplio rango de condiciones de perforación, ángulos de inclinación de pozo de sondeo, y casos en los que el campo magnético de la tierra está distorsionado por carcassas cercanas al orificio o por si la trayectoria de perforación de fondo de pozo se extiende de norte-sur o sur-norte y la inclinación de basculación del fondo de pozo está dentro de unos pocos grados de coincidencia con el ángulo de inclinación local del campo magnético de la tierra. Estos 9 ejes se combinan dinámicamente a través de un amplio rango de velocidades de rotación de BHA de cero RPM hasta varios cientos de RPM. Las salidas "geoestacionarias" de la plataforma virtual de rotación geoestacionaria son inclinación de basculación de pozo de sondeo y acimut de inclinación de pozo de sondeo. Las salidas instantáneas o dinámicas son GTF, MTF, el ángulo local entre GTF y MTF (Ángulo X), y la frecuencia de rotación instantánea. Estas 6 salidas se

utilizan para controlar la temporización de los accionadores que desvían dinámicamente la broca y hacen a la herramienta giratoria dirigir el pozo en una dirección particular que se fija con respecto a la tierra.

[0026] En una realización, la plataforma geoestacionaria virtual puede incluir un conjunto de microcontrolador y/o microprocesador de plataforma geoestacionaria virtual separada ("VGPMa") o se puede utilizar el microcontrolador y/o conjunto de microcontrolador de otro sistema, tal como el conjunto direccional giratorio como descrito con anterioridad. El VGPMa, si está configurado, puede tener diferentes configuraciones que pueden incluir un microcontrolador y/o microprocesador, memoria, memoria no volátil, entrada/salida de canales, diversos sensores, y/o programación almacenada en la memoria que el montaje ejecuta cuando está en funcionamiento. Además, como se discute en el párrafo anterior, la plataforma geoestacionaria virtual puede ser configurada con sensores que incluyen: tres acelerómetros ortogonales, tres magnetómetros ortogonales, y tres giroscopios de velocidad ortogonal, donde todos proporcionan entrada a VGPMa o sistema de procesamiento sustituto, tal como el conjunto direccional giratorio. El sistema de procesamiento de estos datos de entrada del sensor procesa esta información para calcular la localización y determinar los posibles errores de desalineación. Opcionalmente, los datos del sensor y/u otros datos pueden ser almacenados en la memoria.

[0027] Los giroscopios de velocidad referenciados en esta realización no se utilizan para la navegación inercial; no son los giroscopios de búsqueda del norte que serían necesarios para la dirección inercial ni se montan por gimbal. Miden velocidades de rotación del BHA a lo largo de cada eje de la herramienta de un sistema de coordenadas para la determinación de los parámetros relativos a la dinámica y cinemática de perforación. El giroscopio del eje z mide la velocidad de rotación instantánea de la herramienta alrededor del eje z para identificar y corregir el movimiento de atascamiento-deslizamiento y zonas de interferencia magnética. Los giroscopios del eje x y eje y dan una indicación del movimiento de la herramienta en respuesta a golpes y vibraciones durante la perforación. Es decir, si el movimiento del BHA debido al choque es de traslación, entonces los giroscopios x e y no leerán ninguna rotación relativa. Sin embargo, si los giroscopios x e y detectan un componente rotacional de movimiento de BHA que se correlaciona con los acelerómetros de eje y eje x respectivamente, entonces significa que la respuesta de la herramienta a impactos y vibraciones incluye cabeceo y guiñada en el orificio y que el movimiento incluye un componente pendular. Este movimiento podría identificar una

falsa indicación de la inclinación del fondo de pozo de modo que pueda ser debidamente identificado como la herramienta de la inclinación en el orificio y no la inclinación del orificio.

[0028] La instrumentación y procesamiento electrónico para el control de la dirección de herramientas incorpora múltiples sensores de realimentación, sensores de navegación y un conjunto de microcontrolador y/o microprocesador para el procesamiento de las entradas combinadas de varios sensores para dirigir la herramienta basada en las entradas de los sensores, los parámetros de control pre-programados, y/o las entradas de control adicionales comunicadas desde la superficie o en otros sistemas de fondo de pozo. En una realización, la adquisición de la señal, la reducción de ruido, y el procesamiento de corrección de error dinámico permite el cálculo exacto en tiempo real de las mediciones instantáneas de la cara de herramienta y velocidades de rotación de BHA y parámetros de la trayectoria del pozo geostático si la herramienta está girando o se encuentra estática, eliminando así la necesidad de una plataforma geoestacionaria o casi geoestacionaria para los sensores de navegación, y permitiendo correcciones inmediatas e instantáneas del curso del pozo sin interrupción y transparentes para el proceso de perforación. Además, es una técnica bien conocida colocar dos mediciones similares separadas por un espaciado conocido, por ejemplo, la inclinación, para calcular y controlar la severidad de pata de perro instantánea dinámicamente para que los ajustes de preferencia a la tasa de acumulación se puedan hacer en la marcha sin interrumpir las operaciones de perforación y de dirección giratoria, y sin tener que llevar a enlace descendente información profundidad de y/o ROP de la superficie y sin una superficie generada de comandos. Además o alternativamente, se pueden utilizar medidores de deformación para determinar la severidad de pata de perro con base en la amplitud de la flexión totalmente invertida del collar de perforación a medida que gira en o a través de la sección curvada del pozo.

[0029] Además, en una realización, la instrumentación electrónica y de control de la herramienta de perforación orientable giratoria se puede combinar con un canal de enlace descendente desde la superficie a la herramienta de fondo de pozo que permite la actualización de la herramienta y/o re-programación de la herramienta de la superficie a fin de establecer de forma adaptativa o cambiar los valores objetivo deseados de acimut de fondo de pozo y la inclinación sin dejar de girar y/o dirigir. Además de la instrumentación de navegación necesaria, en una realización, la herramienta puede incorporar instrumentación para diversas mediciones de evaluación

de formación, tales como el promedio y/o cuadrante de detección de rayos gamma natural, resistividad de formación multi-profundidad, densidad y porosidad de neutrones, porosidad sónica, imágenes de resistividad de fondo de pozo, detección por búsqueda y registro, medición del calibre de ultrasonidos de diámetro de pozo, y mecánica de perforación. La memoria no volátil electrónica, en una realización de la electrónica de a bordo de la herramienta, es capaz de registrar y/o retener y/o registrar y transmitir, o simplemente transmitir en tiempo real o con un retraso utilizando la memoria tampón, un conjunto completo de pruebas de pozo y otros datos para permitir la capacidad de dirección geológica de modo que la herramienta de perforación orientable giratoria se pueda emplear eficazmente para la perforación de todas las secciones de pozo con un diámetro dado. Cuando se localiza por debajo de un motor de lodo de desplazamiento positivo, los datos en tiempo real de la herramienta direccional giratoria pueden ser transmitidos por telemetría de forma inalámbrica de salto corto a una herramienta receptora remota adecuada situada encima del motor de lodo y luego transmitidos por telemetría a la superficie a través de impulsos de lodo, electro magnética ("EM"), u otra telemetría que pueda existir. En una realización, la energía eléctrica para el control y la operación de las válvulas de solenoide y la instrumentación, adquisición, y electrónica por telemetría de salto corto se proporcionan por las baterías de fondo de pozo, o un alternador alimentado por una turbina de lodo, o una combinación de los dos. Además, el sistema puede ser alimentado por otros sistemas de generación de energía de fondo de pozo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[0030] La FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva lateral de una sarta de brocas de perforación giratoria desplegada que tiene un conjunto de fondo de pozo ("BHA").

[0031] Las FIGS. 2A y 2B ilustran una realización de una herramienta de perforación orientable giratoria y muestran dos vistas laterales ortogonales de la unión de broca a la herramienta de perforación orientable giratoria.

[0032] La FIG. 2C ilustra una realización de la broca de la herramienta de perforación orientable giratoria mostrada en las FIGS. 2A y 2B desde la perspectiva de un observador que mira hacia la broca de orificio superior y define un sistema de coordenadas cartesiano para referencia.

[0033] Las FIGS. 3A-1, 3B-1, 3C-1, y 3D-1 ilustran una realización de una herramienta de perforación orientable giratoria y muestran una secuencia de vistas laterales ortogonales de la unión de broca a la herramienta de perforación direccional giratoria a medida que la herramienta está disminuyendo dinámicamente de ángulo.

[0034] Las FIGS. 3A-2, 3B-2, 3C-2, y 3D-2 ilustran una realización de una herramienta de perforación orientable giratoria y muestran la broca de la herramienta de perforación orientable giratoria mostrada en las FIGS. 3A-1, 3B-1, 3C-1, y 3D-1, respectivamente, desde la perspectiva de un observador que mira hacia la broca de fondo de pozo y define un sistema cartesiano de coordenadas de referencia.

[0035] Las FIGS. 4A-4B muestran una vista en perspectiva lateral en corte que ilustra la estructura interna de una realización de la herramienta de perforación orientable giratoria y muestran dos vistas del movimiento alternativo de la broca y el eje de la broca.

[0036] La FIG. 5 muestra una sección ampliada del accionador de brazo de palanca de la herramienta de perforación orientable giratoria mostrada en las FIGS. 4A-4B.

[0037] Las FIGS. 6A-6B muestran una vista en perspectiva lateral que ilustra la estructura interna de una realización de la herramienta de perforación orientable giratoria y muestran dos puntos de vista de la operación del mecanismo de bloqueo de brazo de palanca que se utiliza para bloquear la broca en la posición centrada cuando las direcciones de operación no están activas. La FIG. 6A está bloqueada. La FIG. 6B está desbloqueada.

[0038] Las FIGS. 7A-7D ilustran una realización para el accionamiento de la broca de una herramienta de perforación orientable giratoria.

[0039] Las FIGS. 8A-8D ilustran una realización del módulo de navegación para la plataforma geoestacionaria virtual.

[0040] La FIG. 9 ilustra una vista en perspectiva lateral de una sarta de herramienta direccional giratoria desplegada que tiene un conjunto de fondo de pozo ("BHA") configurado con una plataforma geoestacionaria virtual.

[0041] La FIG. 10 ilustra otra aplicación para la perforación de pozos de petróleo y gas y muestra una realización donde una salida de una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable puede estar conectada por una línea hidráulica a un motor hidráulico, formando de ese modo una transmisión hidráulica.

[0042] Las FIGS. 11A-11B ilustran otra realización de aplicación donde un eje de salida de un motor hidráulico puede ser configurada para conducir una válvula de lodo giratorio para la generación de telemetría de pulso de lodo.

[0043] La FIG. 12 ilustra una aplicación de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable en un sistema hidráulico reversible de bucle cerrado para el corte de núcleos laterales.

[0044] La FIG. 13 muestra el estado de la técnica utilizada para accionar una bomba de hueso de perro para el fluido de formación de muestreo.

[0045] La FIG. 14 muestra una realización que utiliza una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable en una configuración de bucle cerrado para controlar y accionar una bomba de hueso de perro.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES PREFERIDAS

[0046] Haciendo referencia a la FIG. 1, un pozo 10 se muestra siendo perforado por una broca giratoria 12 que está conectada en el extremo inferior de una sarta de perforación 14 que se extiende hacia arriba a la superficie, donde es conducida por la mesa giratoria 16 o una unidad de la parte superior 6 de una típica plataforma de perforación 8. La sarta de perforación 14 típicamente se compone de secciones de tubo de perforación 18 conectadas a un conjunto de fondo de pozo (BHA) 28 que tiene uno o más collares de perforación 20 conectado en el mismo para el propósito de la aplicación de peso a la broca 12. El pozo 10 de la FIG. 1 se muestra como teniendo una sección vertical o sustancialmente vertical superior 22 y una deflexión, curvada o sección inferior horizontal 24 que está siendo perforada bajo el control activo de la herramienta de perforación orientable giratoria mostrada generalmente en 26 que está construida de acuerdo con un aspecto de la presente invención. Como se describirá en detalle a continuación, la herramienta de perforación

orientable giratoria 26 está construida y dispuesta para hacer que la broca de perforación 12 perfore a lo largo de una trayectoria curva que está designada por la configuración de control de la herramienta de perforación orientable giratoria 26 de acuerdo con los principios descritos en la presente. El lodo de perforación se bombea por el interior de la sarta de perforación 14, fluye a través del BHA 28, y fuera de los jets en la broca 12, y vuelve a la superficie con los recortes de perforación en el espacio anular 30. El BHA 28 incluye una broca 12 conectada directamente a la parte inferior de la herramienta de perforación orientable giratoria de perforación controlada activamente 26. El BHA también puede incluir otras herramientas de perforación, tales como motores de lodo de desplazamiento positivo para controlar la velocidad de rotación y torque, y propulsores para el control de peso sobre la broca. Por otra parte, la disposición de estos componentes dentro de una sarta de perforación puede ser seleccionada por el personal de perforación con base en su experiencia y preferencia de acuerdo con una amplia variedad de características de perforación, tales como el radio de giro de la sección de pozo curvada siendo perforada, las características de la formación siendo perforada, las características del equipo de perforación que se emplean para la perforación, y la profundidad a la que se lleva a cabo la perforación. Dado que el número de posibles combinaciones y permutaciones de estos otros collares es grande, no se pueden enumerar en esta revelación. Basta decir que la colocación y disposición de estos componentes adicionales en la sarta de perforación con respecto a la herramienta de perforación direccional giratoria controlada de forma activa 26 no tiene injerencia sobre la construcción y principios de funcionamiento de la presente invención.

[0047] Las FIGS. 2A y 2B ilustran una realización de la herramienta de perforación giratoria direccional 26 ("RSDT") y muestran dos vistas laterales ortogonales de la unión de broca 12 a la RSDT. Un punto de referencia fijo en la RSDT denominado línea de marcado 7 puede o puede no estar visible marcado en el collar de perforación de la RSDT. Independientemente de si están visiblemente marcados o no, la línea de marcado se fija con respecto a y gira con las características mecánicas y electrónicas de la herramienta de perforación orientable giratoria y sirve como un punto de referencia espacial para los cálculos realizados por el sistema de dirección. Para esta discusión, será útil definir un sistema de coordenadas cartesiano de referencia tridimensional que se muestra en la FIG. 2C, desde la perspectiva de un observador que mira el fondo del pozo hacia la broca, que está unido a y gira con la herramienta de perforación orientable giratoria. El origen 203 del sistema de

coordenadas cartesianas de referencia es el punto de intersección de la línea central 50 de la RSDT y los ejes x e y. El eje x 204 pasa por el origen 203 y se cruza ortogonalmente con la línea de marcado 7. El eje 205 es ortogonal al eje x y paralelo al eje de articulación 5 de la articulación 3. De acuerdo con la nomenclatura industrial estándar, el eje z 206 que se muestra en las FIGS. 2A y 2B, es colineal con la línea central 50 de la RSDT y es positivo en la dirección hacia abajo del orificio a medida que aumenta la profundidad medida y negativo en la dirección del orificio con la disminución de la profundidad medida. La polaridad del eje y 205 se elige de manera que los ejes x, y, y z siempre forman un sistema de coordenadas diestro. Los vectores de unidad I_x , I_y , e I_z satisfacen las siguientes relaciones de productos de vectores: $I_x \times I_y = I_z$; $I_y \times I_z = I_x$; e $I_z \times I_x = I_y$. Haciendo referencia a la FIG. 2A, se puede definir un segmento de línea recta paralela al eje x que se extiende desde y es perpendicular a la línea central 50 de la RSDT y termina en la línea de marcado 7, formando un vector de orientación de la herramienta 60. Cuando la herramienta está girando en un fondo de pozo que no es vertical con respecto al campo gravitatorio de la tierra, se dice que el GTF instantáneo de la RSDT es de "0°" o "hacia arriba" cuando el componente vertical del vector de orientación de la herramienta 60 está apuntando en una dirección opuesta al vector de gravedad de la tierra. Por el contrario, cuando la herramienta está girando en una perforación de pozo que no es vertical con respecto al campo gravitatorio de la tierra, se dice que el GTF instantáneo de la RSDT es de "180°" o "hacia abajo" cuando el componente vertical de la orientación de la herramienta vector 60 está apuntando en la misma dirección que el vector de gravedad de la tierra.

[0048] Haciendo referencia de nuevo a la FIG. 2C, es útil definir un sistema de coordenadas cilíndrico de la herramienta que está unido y gira con la herramienta de perforación orientable giratoria. El eje z 206 sigue siendo la misma como se define para el sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. En cuanto a la vista de la sección transversal de AA en la FIG. 2A, los ejes x e y son reemplazados con radio r 210 y el ángulo θ (theta) 212. Cuando se describe un punto en la herramienta, su radio "r" es igual a $(x^2 + y^2)^{1/2}$. El ángulo θ se define en relación con la línea de marcado 7 y es de cero grados en la línea de marcado y positiva en la dirección hacia la derecha cuando se observa en la dirección de + z en la dirección de fondo del pozo.

[0049] Haciendo referencia a la realización de la RSDT que se ilustra en ambas FIGS. 2A y 2B, el conjunto de brocas está unido en el extremo inferior de la RSDT por medio de un conjunto de bisagra de un solo eje 5, compuesto de un yugo 41 que es preferiblemente integral con el collar de la herramienta de perforación

orientable giratoria 43, el eje de la broca 33 que se atornilla en la broca 12 en su extremo inferior y se acopla con el yugo 41 en su extremo superior, y un pasador de articulación 37 que encaja en el yugo 41 y el extremo superior del eje de la broca 33. Tal como se muestra en ambas FIGS. 2A y 2B, la orientación del eje de articulación 37 es paralela a la del eje y 205 del sistema de coordenadas cartesiano de referencia de la herramienta, por lo que es perpendicular tanto al vector de orientación de la herramienta 60 y a la línea central 50 de la RSDT. El vector de orientación de la herramienta 60 sería en la dirección de 0° en el sistema de coordenadas cilíndrico de la herramienta. La bisagra 5 permite que el eje de la broca 33 se articule con un solo grado de libertad con respecto al collar de la herramienta de perforación orientable giratoria 43 alrededor del eje de la bisagra 5 de articulación 3.

[0050] Esto es en contraste a los sistemas point-the-bit que emplean grados de libertad de múltiples pivotes omnidireccionales o juntas universales de modo que la deflexión de la broca se puede mantener constante con respecto a un sistema de coordenadas geoestacionario (un sistema de coordenadas que no gira con la herramienta, pero se hace referencia a la tierra) cuando la herramienta gira. Como se discutirá más adelante con más detalle, el cambio de la dirección de la perforación de pozo en una dirección particular por el uso de este aspecto de la presente invención se efectúa mediante las reciprocaciones bidireccionales simétricas coherentes en fase especial de los eje de la broca 33 y la broca de perforación 12 cuando gira la RSDT controlada activamente.

[0051] Un torque de aspas estabilizadoras 35 puede ser integral o puede estar soldado sobre el eje de la broca 33 a $\theta_{212} = 0^\circ$ y 180° en el eje de la broca, que se extiende por encima del pasador de bisagra 37 para mejorar la capacidad de dirección de la RSDT. Además, puede ser útil añadir un torque de aspas estabilizadoras de calibre completo justo por encima de la broca con las aspas centradas en $\theta_{212} = 90^\circ$ y 270° para mejorar aún más la capacidad de dirección de la RSDT. Una o más aspas estabilizadoras fijas 39 se puede colocar y montar sobre el diámetro exterior del collar de RSDT 43 por encima de la bisagra, según sea necesario para la estabilidad y capacidad de dirección de BHA. Las aspas estabilizadoras 39 puede ser rectas o curvas, cilíndricas o con forma de sandía, en consonancia con las tasas de incremento previstas y características de perforación de fondo de pozo deseadas mediante el personal de perforación.

[0052] Las "instantáneas" de la herramienta de las FIGS. 3A a 3D muestran una secuencia de 4 vistas de extremo lateral y terminal cuando la RSDT se está

haciendo girar y dirigir para el escenario donde el pozo está perdiendo ángulo, es decir, el "lado frontal" de la curva es hacia abajo. El collar de perforación por encima de la bisagra está etiquetada 43 y gira sobre la línea central de la herramienta 50. La orientación de GTF instantáneo de la herramienta en cada figura se identifica por la ubicación de la línea de marcado 7 y el vector de orientación de la herramienta 60. Por propósitos de claridad, la deflexión del eje de la broca es exagerada y las aspas estabilizadoras no se muestran.

[0053] La dirección de giro en cada figura es en sentido horario cuando se observa desde la superficie y se muestra por las flechas curvas que están etiquetadas con el símbolo "W" (omega). A medida que la RSDT gira, el eje de la broca 33 y la broca 12 se desvían con respecto a la línea central de la herramienta 50. Por conveniencia, los ejes del sistema de coordenadas cartesiano de referencia de la herramienta están superpuestos en cada imagen. El eje z 206 es colineal con la línea central de la herramienta 50. El eje x 204 y el eje y 205 son ambos transversales a la línea central de la herramienta 50. Para esta discusión, el origen del sistema de coordenadas de referencia 203 se muestra en la intersección del eje z 206, el eje x 204, y el eje de la bisagra de articulación 3. El eje de la bisagra de articulación 3 es colineal con el eje 205. La deflexión de la broca con respecto a la línea central 50 de la rotación RSDT está marcada por la letra griega delta (δ), que es el ángulo formado por el eje largo 85 del eje de la broca 33 y la línea central 50 de la RSDT. La convención de signos del ángulo δ es negativa cuando el eje de la broca 33 se deflexiona lejos de la línea de marcado 7 y es positiva cuando el eje de la broca 33 se deflexiona hacia la línea de marcado 7. Los ángulos GTF 0° , 90° , 180° y 270° están etiquetados en la vista por el extremo inferior de cada figura. Estos ángulos son fijos con respecto al vector de gravedad de la tierra y no giran con la herramienta.

[0054] En la FIG. 3A, la línea de marcado 7 es "hacia arriba" y el GTF es 0° . En la FIG. 3C, la línea de marcado 7 es "hacia abajo", y el GTF es de 180° . Las direcciones de "derecha" e "izquierda" se definen desde la perspectiva del perforador, frente a las vistas de extremo que se muestran en las FIGS. 3B y 3D. En la FIG. 3B, la línea de marcado 7 está a 90° . Una GTF igual a 90° se conoce como "derecho", ya que las desviaciones de brocas en esa dirección harán que el pozo haga un giro a la derecha. Del mismo modo para la FIG. 3D, la línea de marcado 7 está a 270° , lo que se conoce como "izquierda", ya que las desviaciones de brocas en esa dirección hará que el pozo haga un giro a la izquierda. La FIG. 3A muestra el eje longitudinal 85 del eje de la broca 33 deflexionada lejos de la línea de marcado 7 por cierto ángulo

negativo δ , pero dado que la línea de marcado de GTF es de 0° , la broca de perforación 12 preferentemente elimina material en la parte baja del orificio. La instantánea en la FIG. 3C se toma después de que la RSDT se ha girado 180° desde su orientación en la instantánea en la FIG. 3A y muestra el eje largo 85 del eje de broca 33 desviado hacia la línea de marcado 7 por un ángulo positivo δ , pero dado que la línea de marcado de GTF es 180° (apuntando hacia abajo), la broca de perforación 12 elimina de nuevo preferentemente material en la parte baja del orificio.

[0055] Las instantáneas en las FIGS. 3B y 3D muestran el eje largo 85 del eje de broca 33 alineado con la línea central 50 de la RSDT. En esta posición, la broca 12 se pone en contacto momentáneo con el diámetro de la "parte trasera" del orificio y por lo tanto elimina menos material a partir del diámetro de la "parte trasera" del orificio durante las operaciones de dirección de lo que normalmente sería cuando se perfora en línea recta. Cuando la dirección se activa y la RSDT está girando, este movimiento recíproco simétrico de la broca 12 en la misma frecuencia que la rotación del BHA, sincrónicamente en fase respecto a la dirección espacial donde se dirigió el orificio del pozo es un aspecto único del método y aparato de la presente invención.

[0056] En una realización de la RSDT, los movimientos recíprocos de la broca 12 y el eje de broca 33 pueden ser accionados por el mecanismo mostrado en las FIGS. 4A y 4B. Un brazo de palanca 87 está unido al eje de la broca 33 en la bisagra 5 por una prolongación inferior 121 del brazo de palanca 87 que se acopla con un orificio central a través del medio del eje de la broca 33 que es ortogonal al eje pasador de la bisagra de articulación 3. Una junta de lodo elastomérica 91 en esta conexión se proporciona para evitar que el fluido de perforación se escape alrededor de la extensión del brazo de palanca 121 que se acopla a la bisagra 5. La extensión de brazo de palanca 121 incluye su propio orificio central que está abierto en el orificio central en el eje de la broca 33 para permitir el paso de lodo de perforación para alcanzar la broca 12 y las boquillas en la broca. En esta realización, el brazo de palanca 87 se compone de dos raíles paralelos y numerosos separadores y elementos de unión que están unidos a la extensión extremo inferior 121. En la FIG. 4A, dado que el brazo de palanca 87 se desplaza angularmente hacia la línea de marcado 7, la broca 12 y el eje de broca 33 se desplazan angularmente en la dirección opuesta fuera de la línea de marcado 7 por medio de la acción de la bisagra 5. Por el contrario, en la FIG. 4B, dado que el brazo de palanca 87 se desplaza angularmente lejos de la línea de marcado 7, la broca 12 y el eje de broca 33 se desplazan angularmente en la dirección opuesta hacia la línea de marcado 7 por medio de la acción de la bisagra 5.

En esta realización, el desplazamiento angular del brazo de palanca 87 es accionado por un conjunto de pistón de servo hidráulico 95, aunque otros medios podrían ser utilizados como un pistón de servo hidráulico axial con un enlace, un accionador eléctrico con o sin un enlace, o un pistón de lodo de perforación. Todas estas variaciones están dentro del alcance de esta invención. El desplazamiento angular de la broca 12 es igual y opuesto al desplazamiento angular del brazo de palanca 87 por medio de la acción de la bisagra. El desplazamiento angular máximo de la broca 12 está limitado por el desplazamiento angular máximo del brazo de palanca 87 que está limitado por el desplazamiento máximo del brazo de palanca de accionamiento del conjunto de pistón de servo 95.

[0057] La realización mostrada en las FIGS. 4A y 4B incluye una carcasa de componentes electrónicos 67 que contiene los sensores de navegación dinámicos y electrónica de adquisición situada entre los dos raíles paralelos del brazo de palanca 87. La línea central de la carcasa es colineal con la línea central 50 del collar 43 y está montada de forma fija al collar 43 por medio de soportes mecánicos 68. Las conexiones eléctricas se proporcionan por medio de un tubo de alambre 130 que se extiende desde una cámara electrónica superior (no mostrado) hasta el extremo inferior de las carcasas de componentes electrónicos 67. La carcasa gira con el collar y no contragira o corresponde con los movimientos del brazo de palanca 87. En esta realización, ninguna parte de la herramienta, mecánica o electrónica, contragira con respecto a la rotación de la RSDT, aunque tal contragiro de ciertos componentes no está prohibido por este aspecto de la presente invención.

[0058] La FIG. 5 muestra una vista detallada del conjunto de brazo de palanca 87 en accionamiento del conjunto de pistón de servo 95. Esta realización se muestra con dos pistones 106 hidráulicamente conectados en paralelo para reducir al mínimo el área de la sección transversal presentada al flujo de lodo a través de la RSDT, para equilibrar aún más las fuerzas en el adjunto de pivote 114 para el brazo de palanca 87, y para empaquetar convenientemente el conjunto en el volumen disponible. Se puede utilizar un solo pistón de servo, siempre que pueda alcanzarse la fuerza de accionamiento suficiente dados los límites de funcionamiento del sistema hidráulico, es decir, la velocidad de flujo máxima y la presión de salida mientras se ajusta el pistón del servo en el volumen disponible. Hay dos cámaras superiores 105 y dos cámaras inferiores 107. Las cámaras superiores 105 están conectadas hidráulicamente a la fuente de alimentación a través de giro hidráulico 113 y tubería hidráulica 109. Las cámaras inferiores 107 están conectadas hidráulicamente a la fuente de alimentación

a través de giro hidráulico 115 y los tubos hidráulicos 111. Cuando el fluido hidráulico de alta presión de la bomba (no mostrado) y las válvulas de control (no mostrado) está conectado a las cámaras de pistón inferior 107, y las cámaras de pistón superior 105 están conectadas al tanque/depósito de baja presión hidráulica 75 (no mostrado), entonces la carcasa del conjunto de pistón 95 se moverá hacia abajo, haciendo que el extremo del brazo de palanca se mueva hacia abajo lejos de la línea de marcado 7 y haciendo que la broca se deflexione hacia arriba hacia la línea de marcado 7. A la inversa, cuando el fluido hidráulico a alta presión de la bomba (no mostrado) y las válvulas de control (no mostrado) está conectado a las cámaras de pistón superior 105, y las cámaras de pistón inferior 107 están conectadas al tanque/depósito de baja presión hidráulica 75 (no mostrado), entonces la carcasa del conjunto de pistón 95 se moverá hacia arriba, haciendo que el extremo del brazo de palanca se mueva hacia arriba hacia la línea de marcado 7 y haciendo que la broca se deflexione hacia abajo lejos de la línea de marcado 7. Una vez que la deflexión angular máxima de la disposición de broca se ha determinado por el diseño, entonces la colocación del conjunto de pistón 95 con respecto al eje de articulación 3 (Figs. 4A y 4B) y el recorrido admisible del conjunto de pistón se pueden seleccionar para limitar el correspondiente desplazamiento angular máximo de la broca 12.

[0059] Las FIGS. 6A y 6B, muestran el funcionamiento del mecanismo de bloqueo 125 del brazo de palanca 87 que se puede utilizar para bloquear la broca en la posición centrada cuando las operaciones de dirección no están activas. El brazo de palanca 87 termina con un conjunto de cuña que comprende un soporte de montaje 116 y una cuña macho 117. Un montaje de cilindro comprende un cilindro hembra 103, un eje 119, un pistón 101 y un resorte 99. El alojamiento de la cámara del resorte 99 está conectado hidráulicamente al tanque. El lado de alta presión del pistón 101 está conectado hidráulicamente con el fluido de alta presión por medio de un canal hidráulico 123.

[0060] La FIG. 6A muestra el caso en que la dirección está desactivada y la cuña 117 se acopla mecánicamente por el cilindro 103 y se mantiene en posición por el resorte 99. Esto corresponde al caso en que el sistema de presión hidráulica es bajo permitiendo al resorte 99 forzar el pistón hembra 103 en acoplamiento con la cuña macho 117. Esto bloquea mecánicamente el brazo de palanca 87 en la posición centrada y evita que se mueva. La FIG. 6B muestra el caso donde la dirección está activada. A medida que aumenta la presión de funcionamiento hidráulico, el fluido hidráulico a alta presión fluye a través del paso 123 de retracción del pistón 101,

comprimiendo el resorte 99, y desacopla el pistón hembra 103 de la cuña macho 117, permitiendo de ese modo el movimiento alternativo del brazo de palanca 87.

[0061] La FIG. 6B corresponde al caso donde el brazo de palanca 87 es libre de moverse, pero está mantenido en forma momentáneamente activa en la posición centrada por el sistema de control de la dirección de la RSDT en preparación para el inicio de las operaciones de dirección. Las FIGS. 4A y 4B muestran el caso donde se habilita la dirección activa y el brazo de palanca 87 se muestra en una posición angularmente desviada durante las operaciones de dirección activa. Si el brazo de palanca 87 no está siendo dirigido activamente por la operación de la RSDT, entonces el brazo de palanca 87 estará en la posición de bloqueo como se muestra en la FIG. 6A. Como un mecanismo de seguridad, si la presión de trabajo hidráulica en la línea 123 disminuye por debajo del umbral fijado por el resorte 99, por cualquier motivo, entonces el cilindro de bloqueo 103 se acopla a la cuña 117 y devuelve la broca 12 a la posición bloqueada y centrada.

[0062] Las FIGS. 7A a 7D muestran una realización hidráulica para el accionamiento de los movimientos de brocas durante la dirección y el método asociado con esa realización. La Figura 7A es un esquema del sistema hidráulico de la RSDT. La energía es proporcionada por una turbina impulsada por un lodo de perforación 71 montada en un eje de accionamiento 83, que está conectado a una bomba de pistón de desplazamiento axial dinámicamente variable 70, una pequeña bomba de carga 72, y un pequeño alternador eléctrico 73. El desplazamiento de la bomba de pistón de desplazamiento axial dinámicamente variable 70 es controlado dinámicamente por medio de un accionador de bomba de pistón axial 74 que controla el ángulo de una placa oscilante no giratoria relativa interna al eje de la rotación del eje de accionamiento. La revolución del eje de desplazamiento por la unidad de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 70 es controlada por el ángulo de la placa oscilante. A cero grados, el desplazamiento de la bomba es esencialmente cero cc/rev. Se logrará el desplazamiento máximo de la bomba cuando la placa oscilante esté en su ángulo máximo permisible. Una bomba de carga 72 extrae fluido hidráulico desde el depósito 75 a través de un filtro F1 y proporciona un caudal mínimo para la bomba de pistón de desplazamiento axial dinámicamente variable 70 a través de la línea de entrada de baja presión 97. Una vez cebada, la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 70 arrastra fluido adicional desde el depósito hidráulico 75 a través de un filtro F2 y la válvulas de verificación 78 y la línea de entrada de baja presión 97. La bomba de pistón axial de

desplazamiento dinámicamente variable 70 realiza simultáneamente dos funciones importantes, a saber, regula dinámicamente la cantidad de energía hidráulica que suministra al sistema desde el turbina impulsada por lodo 71, y regula dinámicamente la cantidad de energía que se proporciona al conjunto de pistón de accionamiento de brazo de palanca 95. El ángulo de la placa oscilante se puede ajustar para compensar los cambios en cualquiera de accionamiento del eje 83 de velocidad de rotación o el flujo de salida de la bomba 70 requerido para accionar el movimiento de dirección de la broca 12. La turbina impulsada por lodo de perforación de 71 está diseñada para manejar un rango práctico de velocidades de flujo de lodo determinadas por el perforador y una herramienta de empuje. Esto requiere que la herramienta funcione a una velocidad mínima de flujo y el peso mínimo de lodo con plena energía, lo que significa que con una bomba de desplazamiento fijo hipotética, no habría exceso de energía en la velocidad máximo y la máxima densidad del lodo. Dado que la bomba de pistón axial 70 está diseñada específicamente para el propósito de regulación de energía de entrada y salida, a medida que aumenta la entrada de energía de la turbina disponible 71, la placa oscilante de la bomba de pistón axial 70 se puede ajustar para generar sólo la energía que se exige por el herramienta, y por lo tanto, no se genera exceso de energía por la bomba de pistón axial 70. El exceso de energía debe disiparse en forma de calor sin hacer ningún trabajo útil. A medida que aumenta la velocidad de flujo y/o el peso del lodo, el ángulo de la placa oscilante disminuye dinámicamente para generar sólo la energía requerida para cualquier carga dada. En el lado de descarga o de carga de la bomba, la energía hidráulica requerida por la carga está determinada por el número de revoluciones de BHA y la amplitud requerida de las deflexiones de brocas durante las operaciones de dirección. Si la energía demandada por la RSDT aumenta dinámicamente, el ángulo de la placa oscilante se incrementará de forma dinámica por el accionador 74 en respuesta a señales de control desde el procesador de control de dirección.

[0063] Cuando la dirección está desactivada, la energía requerida de la bomba es esencialmente de cero vatios de energía de equivalente mecánico; y el ángulo de la placa oscilante de la bomba 70 será cercano a cero grados. En este estado, la válvula 86 está en OFF y desvía el flujo desde la bomba 70 a través de la línea hidráulica 81 y la válvulas de verificación 80 al depósito 75. La válvula 86 también conecta la línea de presión 123 al tanque 75, de modo que el mecanismo de la palanca de bloqueo 125 del brazo bloquea mecánicamente el brazo de palanca 87 en la posición centrada, dado que el pistón 101 no proporciona ninguna resistencia al resorte 99, obligando a la

cuña 103 por medio del eje 119 en acoplamiento mecánico con el pistón de bloqueo 117. Durante el tiempo de transición cuando las operaciones de dirección se activan por primera vez, el sistema electrónico de control envía una señal al solenoide 84 de la válvula 86 cambiándola al estado "ON" y envía una señal al accionador de la placa oscilante 74 para aumentar el ángulo de la placa oscilante, haciendo que la presión de salida de la bomba en la línea 81 aumente lo que retrae el pistón hembra 103 del mecanismo de bloqueo del brazo de palanca 125 mediante la activación del pistón 101 y comprimiendo el resorte 99 de retracción del eje 119. Al mismo tiempo, ambas válvulas 90 y 94 serán activadas por las señales "ON" a los solenoides 92 y 96, respectivamente. Esto aplica la misma presión a las dos cámaras 105 y 107 del conjunto de pistón de accionamiento del brazo de palanca 95, bloqueando hidráulicamente, en forma momentánea, el brazo de palanca en la posición central por la acción de válvulas de verificación 88 y 89 que impiden que el fluido hidráulico de la transferencia entre las cámaras 105 y 107. El movimiento de dirección de la broca comienza una vez que las señales cronometradas a los solenoides de las válvulas 92 y 96 alternativamente abren y cierran las válvulas 90 y 94, como se muestra por las curvas 51 y 52 en la Figura 7B. (Estas curvas se explicarán en la discusión de la Figura 7B.) Se proporciona un acumulador de alta presión 93 para suavizar cualquier pico de presión transitorio que podría ser generado por la conmutación momentánea de las válvulas 94 y 90; y junto con la válvulas de verificación 80, para ser un depósito local de alta presión para mantener el mecanismo de bloqueo del brazo de palanca 125 en la posición de desbloqueo hasta que la válvula 86 esté en posición "OFF", permitiendo que el mecanismo de bloqueo del brazo de palanca se acople al cilindro 103 con la cuña 117. En la Figura 7A, el alivio del exceso de presión es proporcionada por las válvulas de alivio 76 y 77. Si la presión en la línea hidráulica 81 supera la presión de alivio prefijada de la válvula de alivio 77, la presión se alivia con el venteo de fluido de nuevo al lado de entrada de la bomba de pistón axial 70 por medio de la válvulas de verificación 79 y la línea hidráulica 97. Si la presión en el lado de entrada de la bomba de pistón axial 70 es demasiado alta, se alivia con el venteo de fluido de vuelta al depósito 75 por medio de la válvula de alivio 76.

[0064] Para una velocidad de rotación del eje de entrada dado 83, la amplitud de las deflexiones de brocas es proporcional al ángulo de la placa oscilante. Esto revela otra de las ventajas de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 70, a saber, que la amplitud de las desviaciones de broca se puede reducir dinámicamente en respuesta a la detección de rotaciones de

atascamiento-deslizamiento de la broca 12 independiente de la sincronización de las válvulas 90 y 94. A medida que está aumentado la amplitud, si se detectan los inicios de rotación de atascamiento-deslizamiento, el ángulo de la placa oscilante se puede reducir inmediatamente para aliviar o evitar la condición de atascamiento-deslizamiento, hasta que los parámetros de perforación se han cambiado en respuesta a una mecánica de perforación hacia abajo de alarma que se transmite a la superficie. Sin embargo, otra ventaja de la bomba de pistón axial 70 es que las operaciones de dirección pueden ser eliminadas gradualmente de entrada y salida para evitar la formación de las repisas en la pared del pozo. Al aumentar lentamente el ángulo de la placa oscilante de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 70, la RSDT hará una transición suave de una sección de orificio directamente a una sección de pozo curvada por el movimiento inverso de la amplitud de las desviaciones de la broca 12 de una manera controlada. Cuando es momento de suspender las operaciones de dirección, el ángulo de la placa oscilante se reduce gradualmente a cero grados haciendo que las desviaciones de la broca 12 se muevan de nuevo a cero de una manera controlada.

[0065] La FIG. 7B muestra un diagrama de la temporización y formas de onda preferidas que implementan el método de deflexiones recíprocas bidireccionales simétricas síncronas en fase de la broca 12 que se utilizan por la RSDT, que es un aspecto de la presente invención. Para las curvas de la FIG. 7B, el eje x de cada trazado es GTF en el rango de 0 ° a 360 ° para dos rotaciones consecutivas de la RSDT. Las curvas de la FIG. 7B son consistentes con el escenario de "ángulo de caída" previamente discutido y se muestra en las FIGS. 3A a 3D. Una persona del oficio de nivel medio debe entender que el tiempo relativo de las formas de onda con respecto al otro seguirá siendo el mismo para dirigir el pozo en otras direcciones, sólo el ajuste de fase espacial de las formas de onda con respecto a GTF (o MTF) será diferente. Sin embargo, para este ejemplo, el objetivo es dirigir el pozo de perforación en la dirección de la parte inferior del orificio o en la dirección de una GTF igual a 180°. Además, una velocidad de rotación de 420 RPM se supone implícitamente cuando es necesario convertir el eje x de GTF a tiempo.

[0066] Cuando se dirige el pozo, la modulación de las deflexiones de brocas es controlado por un módulo de control electrónico de a bordo (que se muestra en la figura 8) que activa de forma repetitiva y alternativa las válvulas 94 y 90, por medio de sus respectivos solenoides 96 y 92. El módulo de control electrónico de a bordo proporcionará la fase espacial correcta de las señales de control de solenoide

necesarias para dirigir el pozo en cualquier dirección deseada. En la Figura 7B, la curva 51 muestra la señal de control que acciona el solenoide 96 para controlar la válvula 94. La curva 52 muestra la señal de control que acciona el solenoide 92 para controlar la válvula 90. El eje y de los trazados de las curvas 51 y 52 asigna un valor lógico de 1 para ON y 0 para OFF. Como se mencionó anteriormente, el eje x de los trazados de todas las curvas en la figura es el GTF instantánea de la línea de marcado 7 de la RSDT. El eje x de los trazados se extiende por un intervalo de aproximadamente 800°, o ligeramente más de 2 vueltas completas de la RSDT. Las curvas 51 y 52 son complementos lógicos y cada una tiene un ciclo de trabajo del 50%. En los puntos "A" y "C" la válvula 94 está siendo conmutada a ON al mismo tiempo en que la válvula 90 está siendo conmutada a OFF. Por el contrario, en los puntos "B" y "D" la válvula 94 está siendo conmutada a OFF al mismo tiempo que la válvula 90 está siendo conmutada a ON. Cuando la válvula 90 está en OFF y la válvula 94 está en ON, la cámara 107 del conjunto de pistón de accionamiento del brazo de palanca 95 se presuriza haciendo que el brazo de palanca 87 se aleje de la línea de marcado 7 haciendo así que la broca 12 se mueva en la dirección opuesta hacia la línea de marcado 7 o en el sentido positivo del eje x 204 en dirección del sistema de coordenadas de RSDT, que se muestra en la curva 56 entre 0 ° y 180 ° de GTF. A la inversa, cuando la válvula 94 está en OFF y la válvula 90 está en ON, la cámara 105 del conjunto de pistón de accionamiento del brazo de palanca 95 se presuriza haciendo que el brazo de palanca 87 se mueva hacia la línea de marcado 7 haciendo así que la broca 12 se mueva en la dirección opuesta fuera de la línea de marcado 7 o en sentido negativo del eje x 204 en dirección del sistema de coordenadas de RSDT, que se muestra en la curva 56 entre 180 ° y 0 ° de GTF. En este ejemplo particular de dirección del pozo en la dirección hacia abajo, las deflexiones positivas en brocas en la curva 56 serán máximas cuando GTF sea igual a 180 ° o la línea de marcado sea "HACIA ABAJO", y las desviaciones negativas de broca en la curva 56 serán máximas cuando el GTF sea igual a 0° o cuando la línea marcada sea "HACIA ABAJO".

[0067] En la FIG. 7B, la curva 53 muestra la presión diferencial entre las cámaras 107 y 105, específicamente, $\Delta P = P_{107} - P_{105}$. Cuando ΔP es positivo, la broca está siendo desviada en la dirección hacia la línea de marcado 7. Cuando ΔP es negativo, la broca está siendo desviada en la dirección lejos de la línea de marcado 7. La amplitud de ΔP se determina por la velocidad de flujo de la bomba de desplazamiento del pistón axial dinámicamente variable 70 y las fuerzas de resistencia

de rozamiento sobre la broca ya que desvía y gira la RSDT. La curva 54 muestra la velocidad de flujo de fluido hidráulico en el pin 1 de la válvula 94. La curva 55 muestra el negativo de la velocidad de flujo hidráulico en el pin 1 de la válvula 90. Las válvulas 94 y 90 no se conmutan instantáneamente de ON a OFF y de OFF a ON. Cada válvula tiene una cantidad finita de tiempo para la transición de un estado (ON u OFF) al otro estado (OFF u ON). Este tiempo de transición finito debe ser tenido en cuenta por el módulo de control electrónico de a bordo por el avance de la sincronización de las señales de control de solenoide en una cantidad igual a la mitad el tiempo de transición. A 420 RPM, la transición para cada válvula requiere aproximadamente 54° , por lo tanto, las señales de control deben liderar la temporización pretendida de las deflexiones de brocas a la mitad de esa cantidad, o aproximadamente 27° . Para que se produzca la deflexión máxima positiva de la broca 12 en una GTF de 180° , las válvulas deben conmutarse a una GTF de 153° . Y para que se produzca la deflexión máxima negativa de la broca 12 en una GTF de 0° , las válvulas deben conmutarse a una GTF de -27° . La cantidad de ángulo de avance de la válvula de control disminuirá linealmente a medida que disminuye el RPM. La FIG. 7B demuestra una ventaja del uso de dos válvulas de 3 vías 2 posiciones independientes para controlar por separado y simultáneamente cada cámara del conjunto de pistón de accionamiento del brazo de palanca 95: el tiempo de transición se corta por la mitad por la conmutación de ambas válvulas 94 y 90, al mismo tiempo, en comparación con el tiempo de transición de conmutación de una sola válvula de 4 vías 3 posiciones con un núcleo que debe recorrer el doble de distancia y el doble de tiempo para conmutar.

[0068] La FIG. 7C muestra dos curvas que representan el desplazamiento de la broca como función de GTF para el escenario de "ángulo de caída" o "dirección hacia abajo" que se ilustra por las FIGS. 3A - 3D. Para los propósitos de esta discusión, el término "deflexión" se referirá específicamente al movimiento de la broca en relación con el sistema de coordenadas que se fija y gira con la herramienta. El eje x del gráfico muestra la orientación angular instantánea o GTF de la línea de marcado 7 de la RSDT. El eje Y de la gráfica muestra el porcentaje de desplazamiento máximo de la broca en dos direcciones ortogonales: en este caso el plano vertical (curva 62) y el plano horizontal (curva 63). Más en general, la curva 62 muestra el desplazamiento instantáneo de la broca en la dirección de la dirección, en este caso, arriba y abajo. La curva 63 muestra el desplazamiento instantáneo de la broca en la dirección perpendicular a la dirección de giro de la broca, en este caso, a la izquierda y derecha. El "desplazamiento de brocas resultante" es la suma de vectores de las desviaciones

de movimiento alternativo coherentes de la broca 12 y la rotación de la herramienta. Cuando se acciona y cae el ángulo, el módulo de control electrónico en la herramienta espaciará el tiempo del movimiento de broca recíproca de modo que la deflexión máxima de la broca 12 se produzca en la dirección del vector de gravedad, de manera que la broca 12 preferentemente elimine más formación del lado inferior del orificio que del lado superior del orificio. La etiqueta "3A" corresponde al caso en la FIG. 3A donde la deflexión de la broca 12 es "negativa" o está lejos de la línea de marcado 7. Dado que la línea de marcado 7 es HACIA ARRIBA con una GTF de 0° , la broca 12 se desplaza en la dirección "H". La etiqueta "3C" corresponde al caso en la FIG. 3C, donde la deflexión de la broca 12 es "positiva" o hacia la línea de marcado 7. Dado que la línea de marcado 7 es HACIA ABAJO con una GTF de 180° , la broca 12 se desplaza de nuevo en la dirección "H". Dado que el movimiento repetitivo de la deflexión de la broca está en la misma frecuencia que la rotación de la RSDT, para un observador fijo con respecto a la tierra, el movimiento de desplazamiento de brocas parece ser el doble de la frecuencia de la velocidad de rotación de la RSDT. Por cada 180° de rotación RSDT, la broca completará un ciclo completo de movimiento de centrado (3B) a totalmente desplazado en la dirección de conducción (3C) y de nuevo a centrado (3D). Para la siguiente media-rotación de la RSDT, el movimiento será de centrado (3D) a totalmente desplazado en la dirección de conducción (3A) y de nuevo a centrado (3B). En la práctica, el desplazamiento máximo de la broca 12 es típicamente de unas pocas décimas de pulgada, pero podría ser más o menos por el diseño en función de la especificación de velocidad de acumulación deseada.

[0069] La FIG. 7D es un trazado polar del desplazamiento resultante bit 12 de la broca durante las operaciones de dirección. La curva 64 es un trazado de referencia de la broca 12 de desplazamiento instantáneo para un movimiento "armónico simple" sinusoidal ideal versus las rotaciones de RSDT como una función de la GTF de la línea de marcado 7. La curva 65 es un trazado del desplazamiento instantáneo real de la broca 12 versus las rotaciones de RSDT como una función de la GTF de la línea de marcado 7, utilizando el algoritmo de control "bang-bang" y aparatos revelados en las FIGS. 7A y 7B. El uso de señales de control complementario para el control de las válvulas 94 y 90, da velocidades de flujo hidráulico al conjunto de pistón de accionamiento de brazo de palanca 95 que son trapezoidales, y por lo tanto el perfil de velocidad del desplazamiento bit 12 también es trapezoidal, debido a que la velocidad de desplazamiento de la broca es linealmente proporcional a la velocidad de flujo neto dentro y fuera del conjunto de pistón de accionamiento 95 del brazo de palanca 87. El

trazado de desplazamientos reales de brocas mostrados en la curva 65 es muy similar al trazado de los desplazamientos de brocas idealizados mostrados en la curva 64. La trayectoria de la broca 12 que se muestra en la curva 65 en realidad es preferible a la trayectoria que se muestra en la curva 64 ya que la ampliación real de la perforación en la sección curvada con el control de movimiento trapezoidal es algo menor que el ensanchamiento que se produciría con control de movimiento sinusoidal. Si las desviaciones máximas de la broca son del orden de 0,25 pulgadas, mientras la herramienta está siendo conducida, entonces el diámetro del orificio en la sección curvada es asimétricamente ampliado por 0,25 pulgadas en la dirección de la curva; y los lados de la perforación (izquierda y derecha) son simétricamente ampliados por aproximadamente 0,2 pulgadas, lo que reduce las fuerzas de fricción en el BHA y la sarta de perforación a medida que gira o se desliza a través de la sección curvada del orificio.

[0070] La Figura 8A muestra un diagrama de bloques de los sensores no inerciales dinámicos opcionales de navegación y de procesamiento. Todos los elementos de navegación, incluyendo los sensores y la adquisición y procesamiento de electrónicos, están montados directamente en el collar o a una estructura mecánica que se monta de forma fija al collar y gira con el collar. En esta realización, no existe ninguna estructura en la herramienta que gira con respecto al contador de la rotación de la RSDT para crear una plataforma geoestacionaria o plataforma casi geoestacionaria. Al no utilizar un contador de conjunto giratorio, la mecánica de la unidad de sesgamiento y el cableado se simplifica al eliminar la necesidad de anillos de deslizamiento y los sellos de lodo compensados por presión de rotación. Otra ventaja desde un punto de vista computacional es que hay un sistema de coordenadas común, una velocidad de rotación común, y una GTF y MTF instantáneo común para toda la herramienta y todos los sensores. Además, la ausencia de un conjunto geoestacionario físico permite que los sensores se encuentren dentro de unos pocos pies de la superficie de la broca y directamente detrás de la bisagra.

[0071] El término "plataforma geoestacionaria" o "conjunto geoestacionario" se refiere a un conjunto en una herramienta giratoria que contra-gira con respecto a la herramienta giratoria de manera que el conjunto no gira con respecto a un sistema de coordenadas que se fija con respecto a la tierra a medida que el resto de la herramienta gira. La orientación de tal conjunto geoestacionario físico, que se define en términos de una GTF y/o MTF no giratorio, se controla para efectuar la dirección de giro de la herramienta en una dirección particular. Los acelerómetros y magnetómetros

utilizados para controlar la orientación del conjunto geoestacionario destinado pueden montarse ya sea en el conjunto geoestacionario directo o en el collar de rotación como se hizo en la Patente de los Estados Unidos No. 6.742.604 de Brasil (en lo sucesivo, "Brasil"). En Brasil, la posición instantánea del collar con respecto al conjunto geoestacionario se mide con un componente electromecánico adicional conocido como un dispositivo de resolución que instantáneamente lee la posición relativa del conjunto geoestacionario físico interno con respecto al collar de rotación externa. El ángulo de resolución electromecánico se utiliza para traducir sólo el GTF de la trama del collar de referencia en rotación en la trama no giratoria de referencia de los conjuntos geoestacionarios. Un enfoque mucho más simple se muestra en la figura 8A que crea una "plataforma geoestacionaria virtual" mediante la adquisición simultánea de 3 ejes para cada uno de 3 tipos de sensores, es decir, acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, 9 ejes en total, los cuales comparten un sistema de coordenadas común fijado y que gira con la RSDT. Las mediciones se adquieren en el bloque B1. Son enviados a bloquear B2 donde el algoritmo acondicionado que se muestra en las FIGS. 8B y 8C elimina errores debido al desplazamiento de CC y desalineación de montaje, así como los errores de golpes y vibraciones en los acelerómetros. El algoritmo de procesamiento geoestacionario virtual en la etiqueta del bloque B2 "SISTEMA DE COORDENADAS DE TIERRA" se puede utilizar para calcular la inclinación y el acimut del eje de rotación de RSDT. Por definición, la inclinación y el acimut del eje de rotación de RSDT es la misma que la inclinación y el acimut del orificio. Una matriz de rotación impulsada por cualquiera de GTF instantáneo o MTF instantáneo más ángulo X o la velocidad de rotación de la herramienta desde el giroscopio del eje z se utiliza para convertir las mediciones de acelerómetro y magnetómetro adquiridas en la trama de referencia de rotación de RSDT a una trama geoestacionaria virtual de referencia (es decir, el "SISTEMA DE COORDENADAS DE TIERRA") para calcular la inclinación y el acimut del eje de rotación de RSDT. El GTF y MTF instantáneo de la línea de marcado 7 en el collar de rotación 43, y el ángulo entre ellos, que se define como "el ángulo X", junto con las salidas geoestacionarios virtuales de inclinación y acimut se utilizan para navegar la RSDT y dirigir el pozo en la dirección solicitada por el cliente.

[0072] La trama geoestacionaria de referencia tendrá un eje z apuntando hacia el fondo de pozo y colineal con el eje del pozo y sustancialmente paralelo al eje z de la RSDT. El eje x de la trama de referencia geoestacionaria apunta hacia arriba perpendicular al eje z del fondo de pozo. El eje X y el eje Z y el vector de gravedad son

coplanares. El eje y del trazado geoestacionario de referencia es horizontal y los puntos a la derecha cuando mira hacia el fondo de pozo, que es ortogonal al eje x, el eje z, y el vector de gravedad. Por definición, la inclinación del fondo de pozo de sondeo se expresa como un número positivo de grados igual al ángulo entre el vector de gravedad y el eje z del fondo de pozo y puede variar de 0 ° a 180 °. El valor de inclinación en un pozo vertical es de cero grados y la inclinación de un pozo horizontal es de 90 °. Por definición, el acimut del pozo de sondeo se expresa como un número positivo de grados entre 0 ° a 360 ° igual al ángulo entre la proyección del eje z en el plano horizontal y la dirección del norte magnético. El cálculo de acimut es bien conocido para cualquier persona con experiencia en la técnica. Para convertir instantáneamente un torque de mediciones transversales, ya sea la aceleración debida a la gravedad, o el campo magnético de la tierra, de la RSDT de la trama de referencia no inercial de rotación de coordenadas para el sistema inercial no giratorio de referencia local, $A_{X_{BOREHOLE}} = A_{X_{RSDT}} \cdot \cos(GTF) + A_{y_{RSDT}} \cdot \sin(GTF)$, y $A_{y_{BOREHOLE}} = A_{X_{RSDT}} \cdot \sin(GTF) + A_{y_{RSDT}} \cdot \cos(GTF)$, donde $A_{X_{BOREHOLE}}$ y $A_{y_{BOREHOLE}}$ son los componentes transversales de gravedad de la tierra en la trama de fondo de pozo de referencia, $A_{X_{RSDT}}$ y $A_{y_{RSDT}}$ son los componentes transversales de la gravedad en la trama de referencia de RSDT, y GTF es la cara de la herramienta gravedad instantánea de la RSDT. Como un control de calidad, el valor de $A_{y_{BOREHOLE}}$ debe ser idénticamente a cero; si $A_{y_{BOREHOLE}}$ no es cero, entonces el cálculo de la inclinación del fondo de pozo no será válido. Si una GTF válido no está disponible, entonces (MTF + Ángulo X) se puede utilizar como una estimación del valor de GTF. Si tanto una GTF válido y un MTF válido están momentáneamente disponibles, entonces puede ser posible derivar un valor estimado de GTF a partir de la integración de la velocidad de rotación de la RSDT desde el sensor de giro del eje z, G_z . El cálculo de la inclinación del fondo de pozo es entonces $INCL = -ARCTAN(A_{X_{BOREHOLE}}/A_{Z_{RSDT}})$. $M_{X_{RSDT}}$, $M_{y_{RSDT}}$, $M_{z_{RSDT}}$, $M_{X_{BOREHOLE}}$, y $M_{y_{BOREHOLE}}$, pueden ser sustituidos por $A_{X_{RSDT}}$, $A_{y_{RSDT}}$, $A_{Z_{RSDT}}$, $A_{X_{BOREHOLE}}$, $A_{y_{BOREHOLE}}$, respectivamente, en la matriz de rotación para el cálculo del campo magnético de la tierra en la trama de la perforación de referencia y el cálculo estándar de acimut del fondo de pozo.

[0073] Una ventaja de una plataforma de navegación de rotación es que los dispositivos están continuamente autocalibrados mediante el uso de la rotación del sistema para cancelar el montaje y los errores de dispositivos de DC que pueden ser una función de la temperatura. Esto permite la medición exacta de valores muy pequeños de inclinación por basculación cuando el pozo es casi vertical y acimut por

basculación cuando el taladro está orientado N-S o S-N y el eje de la herramienta está orientada paralelo a las líneas de campo magnético de la tierra. Al contrario de Brasil, una realización en esta revelación traduce las mediciones de la trama giratoria de RSDT de referencia en la inclinación del fondo y acimut por basculación de fondo de pozo en la trama de referencia estacionario de la tierra, sin la necesidad de hacer una pausa en la perforación o crear un conjunto geoestacionario en la herramienta. La plataforma geoestacionaria virtual de la RSDT es capaz de medir de forma continua y dinámica la inclinación del fondo de pozo (inclinación por basculación) y el acimut de fondo de pozo (acimut por basculación) con respecto al sistema de coordenadas de la tierra no giratorio.

[0074] La FIG. 8B muestra un diagrama de bloques de una realización del algoritmo de procesamiento que se utiliza para cancelar los errores de desalineación en los acelerómetros transversales. Este debate es aplicable también a los magnetómetros. Tres acelerómetros, 600, 610, 620, se muestran para Ax, Ay, y Az, respectivamente. Los ejes x e y representan los ejes transversales, el eje z es la línea central de la herramienta y es positivo en la dirección del pozo hacia abajo. La salida de los acelerómetros es un flujo de datos digital en serie; no hay señales analógicas representadas en el esquema. El procesamiento para Az, 620, es sencillo ya que siempre lee un valor DC de la gravedad, que no son los choques axiales y los errores de desalineación que pueden ser fácilmente filtrados por el filtro 624, incluso a bajas tasas de rotación. Los acelerómetros preferiblemente deben ser montados lo más cerca del eje de rotación de RSDT como sea posible para reducir al mínimo los efectos de la rotación de atascamiento-deslizamiento, que añade un componente AC con el de otro modo valor DC de la aceleración centrípeta. También es beneficioso para el acelerómetro Az ser montado lo más cerca posible de la línea central de rotación como sea posible para reducir al mínimo los errores de aceleración centrípeta de DC de la desalineación. Para los acelerómetros Ax y Ay, 600 y 610, los errores de desalineación y las aceleraciones centrípetas fuera del eje son señales de corriente continua. Los filtros 604 y 614 son filtros de paso bajo IIR digitales adaptativos de cuarto orden idénticos. La frecuencia de corte es una función de la frecuencia de rotación de la herramienta. Si la frecuencia de rotación es 7 Hz (420 rpm), entonces la frecuencia de corte paso bajo es de 0,5 Hz. Si la frecuencia de rotación es 3 Hz (180 rpm), entonces la frecuencia de corte de paso bajo es ,214 Hz. La ganancia del filtro se ha reducido en aproximadamente 90 dB con 360 ° de desplazamiento de fase en la velocidad de rotación de la herramienta, por lo que la salida de cada filtro 604 y 614 es sólo las

señales de error de corriente continua para A_x y A_y , respectivamente, que se sustrae a continuación de sus canales respectivos, produciendo señales libres de error 606 y 616. Esto permite que A_x y A_y se utilicen para detectar cantidades muy pequeñas de basculación durante la perforación vertical. Este mismo proceso de corrección de errores también se utiliza para los magnetómetros. El filtro 624 para A_z (y M_z) es idéntico a los filtros 604 y 614 para las mediciones transversales A_x y A_y . Debido a que los errores de DC como desplazamientos eléctricos no pueden ser cancelados por este método, los instrumentos para las mediciones axiales deben ser calibrados en la temperatura.

[0075] La FIG. 8C muestra un diagrama de flujo del procesamiento de navegación dinámica que se puede utilizar para dirigir la herramienta mientras está girando. Este procesamiento se ejecuta continuamente a medida que la herramienta está girando. Los valores axiales de A_z y M_z no cambian rápidamente y pueden ser actualizados cada pocos segundos en el paso 2.b. Las mediciones transversales están actualizándose continuamente en el paso 2.a. En el paso 3, los desplazamientos de giroscopio para los tres ejes se actualizan cuando la herramienta es estacionaria en el orificio. El error de ganancia del giroscopio del eje z se calibra en el fondo de pozo por correlación con cualquiera de M_x y M_y o A_x y A_y en el caso de la interferencia magnética. En el paso 4, los valores instantáneos de GTF y MTF y ángulo X se calculan primero ya que éstos son necesarios para conducir de forma dinámica los coeficientes de la matriz de rotación. A continuación, las mediciones del acelerómetro y magnetómetro transversales son traducidos al sistema de coordenadas de la tierra y se combinan con A_z y M_z para calcular la inclinación del fondo de pozo y el acimut del fondo de pozo. El ángulo X tiene dos propósitos. Uno es que las mediciones sensibles a acimut típicamente se adquieren versus MTF. MTF más ángulo X da un valor de pseudo GTF por lo que las mediciones adquiridas por acimut pueden estar orientadas correctamente con respecto a la parte superior del fondo de pozo. En el paso 5, GTF y MTF se corrigen por los retrasos en el proceso para que lean los valores espacialmente corregidos de GTF y MTF para fines de dirección. Los datos se transmiten a continuación, con baja latencia a la unidad de control de dirección para la generación de comandos de dirección, el almacenamiento en la memoria de la herramienta, y la combinación con otros datos para la transmisión por telemetría R/T a la superficie.

[0076] La FIG. 8D muestra el procesamiento de la prueba estática que se puede utilizar cuando la herramienta no se está moviendo, por lo general en cada

conexión, mientras que la sarta de perforación se encuentra en las cuñas. Este proceso puede tardar varios minutos en adquirir y procesar las mediciones. La herramienta debe ser detenida. Las aceleraciones de gravedad de la tierra y el campo magnético de la tierra se miden en todos los ejes de la herramienta 3. Si se sospecha de errores de interferencia o desalineación magnética, las mediciones estáticas de dos o más orientaciones adicionales de GTF y/o MTF pueden combinarse para mejorar la exactitud de la inclinación y acimut del fondo de pozo.

[0077] La FIG. 9 muestra un diseño general de la herramienta de una posible realización de la RSDT. En el extremo inferior de la herramienta, la broca 12 está unida al eje de brocas 33 que está unido al collar de perforación 43 por medio de la bisagra 5. Los estabilizadores no se muestran. La navegación dinámica de 9 ejes y el control de dirección electrónica y sensores que comprenden la plataforma geoestacionaria virtual se encuentran en una carcasa justo por encima (o por detrás) de la bisagra 5. La bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable se encuentra en el bloque de "Sección de Alimentación Hidráulica y Accionamiento de Dirección". La sección superior de la herramienta incluye mediciones auxiliares incluyendo, pero no limitado a mediciones de un paquete de medición estática de 6 ejes, ambientales y de perforación mecánica, pinza ultrasónica, resistividad de propagación multi-espacio, EM transversal para la distancia de contrastes de resistividad cercana, antena de telemetría de salto corto, GR de cuadrante natural, adquisición de datos central, comunicaciones, memoria y baterías de reserva para la energía durante las conexiones.

[0078] Esta revelación ha presentado y discutido varios beneficios y características únicas de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable relacionados con el funcionamiento y la aplicación de la RSDT. Sin embargo, cabe señalar que esos mismos beneficios y características únicos para la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable son aplicables al diseño y operación de otras herramientas de fondo de pozo, ya sea transportadas por tubería de perforación, línea cableada, o tubería flexible.

[0079] Cuando la energía y/o energía total requerida para operar una herramienta de MWD o LWD de fondo de pozo durante hasta 200 horas excede la energía que puede ser prácticamente proporcionada por las baterías de fondo de pozo adecuadas para uso en el campo del petróleo, entonces se convierte en la práctica para generar energía hacia dentro del orificio por medio de una turbina de fluido accionada por lodo. En este caso, la práctica común es proporcionar una turbina de

fluido accionada por lodo de perforación, tal como la descrita en Bradley US 3743034 y Jones and Malone US 5249161. La turbina de fluido puede proporcionar energía para conducir, ya sea un alternador eléctrico o una bomba hidráulica. La turbina de fluido debe operar en un rango de caudales de flujo de lodo y densidades de lodo para ser una fuente práctica de energía de fondo de pozo.

[0080] La velocidad de rotación sin carga de la turbina es proporcional a la velocidad de flujo y el torque de arranque es proporcional a la velocidad de flujo y el peso de lodo. Dado que la energía es el producto de la velocidad de rotación de torque, la energía disponible puede aumentar aproximadamente como el cuadrado de la velocidad de flujo de lodo por el aumento en el peso del lodo. Además, es común cubrir un rango de velocidad de flujo 2:1 con un único diseño de la turbina, lo que significa que la energía disponible se puede cuadruplicar fácilmente sobre ese rango. A modo de ilustración, si se toma que el peso mínimo de lodo es de 8,3 libras por galón, el peso máximo de lodo puede ser de 16 libras por galón, otro factor de dos de aumento en el torque disponible. Una turbina bien diseñada debe proporcionar una cantidad mínima de energía necesaria para operar el sistema en la velocidad mínima y el peso mínimo del lodo de perforación. A los efectos de esta discusión, la energía mínima requerida para operar un sistema dado puede ser elegido para ser de 2 HP. Esto significa que la energía disponible de la turbina con la velocidad de flujo máximo y el peso de lodo puede ser a grandes rasgos de aproximadamente 8 veces la energía disponible en la velocidad de flujo mínima y el peso del lodo, a grandes rasgos 16 HP.

[0081] Si la turbina está impulsando un alternador eléctrico, como se describe en "Jones and Malone" US 5.249.161, la corriente de salida puede ser manejada por la carga, pero la tensión de salida del alternador tenderá a duplicarse a medida que se duplica la velocidad rotacional de la turbina. Uno de los métodos para manejar esta situación es utilizar un alternador homo polar híbrido con devanados de campo para realzar o romper la tensión de salida y mantenerlo dentro de un rango manejable sobre la totalidad o parte del rango de flujo de lodo. Habrá varios intercambios de diseño para reducir al mínimo las pérdidas I^2R de cobre en los devanados del alternador con el fin de reducir al mínimo el aumento de temperatura mientras se mantiene la tensión de salida por debajo de un nivel manejable. Además, también hay varias pérdidas de I^2R en el cobre en los devanados de campo. Los devanados de campo nunca serán capaces de anular prácticamente el campo magnético interno, por lo que habrá una velocidad de rotación por encima de la cual la tensión se incrementará inevitablemente incluso con la corriente máxima de devanado de campo. Además, debido a las

limitaciones volumétricas y de eficiencia, hay un límite superior práctico para la cantidad de energía que se puede generar de forma fiable por un alternador eléctrico. Para aquellas aplicaciones que requieren más de aproximadamente 3 HP, podría ser más práctico accionar una bomba hidráulica con una turbina de fluido en lugar de un alternador eléctrico.

[0082] Una realización de la presente revelación utiliza una bomba hidráulica accionada por la turbina de fluido accionada por lodo. Si la turbina está impulsando una bomba de desplazamiento positivo fija como se explica en "Bradley" (Patente de los Estados Unidos No. 3743034), al aumentar la velocidad de la turbina, la velocidad de salida de la bomba aumentará. Además, a medida que aumenta la velocidad de flujo, la presión aumentará hasta el punto limitado por una válvula de alivio de presión. A la velocidad máxima de flujo de perforación y peso de lodo, lo que genera a grandes rasgos 16HP, la turbina se desgastará prematuramente a partir de los efectos de erosión y la válvula de alivio en la salida de la bomba se disipará 5 a 10 HP a medida que el fluido hidráulico se ventila adiabáticamente a través de un orificio de vuelta al depósito hidráulico de baja presión haciendo a la temperatura de la válvula aumentar mucho más allá de los niveles especificados resultantes en la falla de la válvula y el sistema.

[0083] Una solución a este problema es sustituir una bomba de desplazamiento positivo fijo con una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable, también referido como una "bomba de placa oscilante." La bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable es ideal para ser utilizada en una realización de la presente revelación. Fuera del campo de herramientas de perforación de fondo de pozo de petróleo subterráneo, las bombas de pistones axiales de desplazamiento dinámicamente variable se utilizan en muchos lugares, como implementos para tractores operados hidráulicamente, equipos de construcción, como bulldozers, y muy comúnmente en las máquinas de corte de hierba de radio de giro cero. En estos casos, una o más bombas de pistón axial de desplazamiento variable dinámicamente reversible se utilizan para controlar la velocidad de salida variable y la dirección del flujo para conducir independientemente ruedas y/o ejes. En el campo de herramientas MWD y LWD de fondo de pozo alimentadas por lodo de perforación, la bomba ofrece una solución de administración de energía eficaz para herramientas montadas en collar de perforación alimentado por lodo para su uso en pozos de perforación petroleros y de gas, aunque este tipo de implementación previamente no se ha implementado. A medida que aumenta la

velocidad de flujo y el peso del lodo, el ángulo de la placa oscilante se puede disminuir, reduciendo el desplazamiento de la bomba, que permite que la velocidad de la bomba se mantenga constante. Para una velocidad de flujo y peso de lodo de perforación dado, se seleccionará el ángulo de la placa oscilante para proporcionar la cantidad de flujo y la presión requerida por la carga siendo impulsada por la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable. El ángulo de la placa oscilante puede ser controlado por cualquiera de un accionador lineal eléctrico o por un "controlador de desplazamiento electrónico", que utiliza una válvula proporcional y pistones hidráulicos para accionar el plato oscilante.

[0084] La FIG. 7A, como se ha descrito anteriormente, muestra una realización hidráulica de bucle abierto donde la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 70 se utiliza para regular tanto la energía de entrada variable disponible de la turbina 71 y hacerla coincidir con la energía de salida variable demandada por la carga dinámica, compuesta por válvulas 90 y 94 y el accionador de pistón bidireccional 95. En esta realización, el ajuste del ángulo de la placa oscilante se determina mediante la perforación de velocidad de flujo de lodo y la cantidad de fluido hidráulico demandada por la carga. Como se discutió previamente en detalle, el ángulo de la placa oscilante se ajusta para aumentar o disminuir la amplitud del movimiento del brazo de palanca 87 que controla las deflexiones simétricas coherentes de la broca.

[0085] La FIG. 10 muestra otra aplicación para la perforación de pozos de petróleo y de gas, donde la salida de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 300 puede estar conectada por una línea hidráulica 302 a un motor hidráulico 310, formando una transmisión hidráulica. En esta realización, el ángulo de la placa oscilante se ajusta por medio de un accionador 325, que puede ser accionado por motor o accionado hidráulicamente, para controlar la velocidad del eje de salida del motor hidráulico 310. El motor hidráulico 310 puede ser un motor hidráulico de desplazamiento fijo o un motor hidráulico de desplazamiento variable para permitir más grados de libertad para el control. El eje de salida 312 del motor hidráulico 310 puede accionar un alternador eléctrico 315. Dado que la transmisión compuesta de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 300 y el motor hidráulico 310 puede mantener una velocidad constante del eje de salida 312 a través de un amplio rango de velocidad de flujo y peso de lodo, el generador puede ser un alternador sin escobillas muy simple y básico. La tensión de salida de ΦA , ΦB , y ΦC , se mantiene constante mediante el mantenimiento de una

velocidad constante del eje de entrada 312 del motor 310 mediante el ajuste del ángulo de la placa oscilante en función de la velocidad de flujo de lodo de perforación. La fuente de alimentación 330 mide la tensión de salida del alternador 315 y genera una señal de realimentación 335 para aumentar o disminuir el ángulo de la placa oscilante por medio del accionador 325. Una bomba de carga 305 asegura que la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 300 es cebada en el arranque. El depósito de fluido hidráulico es 75. Varias válvulas de descarga, PRV3 y PRV4 se proporcionan para prevenir cualquier condición de sobrepresión. Varias válvulas de verificación, CV5, CV 6, y CV7 se proporcionan para impedir cualquier flujo de retorno no deseado. Se proporcionan filtros F2 y F3 para asegurar que las impurezas de partículas en el fluido hidráulico permanezcan en el depósito de fluido y no se vuelvan a circular a través del sistema. El ángulo de la placa oscilante de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 300 regula la energía de entrada disponible en la turbina impulsada por lodo de perforación, así como proporcionar la energía variable que puede ser demandada por la carga para las mediciones o servicios transmitidas por la tubería de perforación.

[0086] La FIG. 11A todavía muestra otra realización donde el eje de salida 412 del motor hidráulico 410 se podría utilizar para conducir un rotor de válvula giratoria de lodo 450 para la generación de una telemetría de pulso de lodo transmitida por un tubo de perforación durante la perforación. A medida que el rotor de la válvula giratoria de lodo 450 se hace girar al lado del estator de la válvula giratoria de lodo 452, que genera una secuencia de oscilación de presiones alta y baja, como se describe en Jones and Malone. Se introducen periódicamente cambios de fase en la rotación del rotor de válvula giratoria 450 con el fin de codificar digitalmente los datos en una secuencia de presiones alta y baja. La bomba de pistón de desplazamiento axial dinámicamente variable 400 y el motor hidráulico 410 sustituye el motor eléctrico que está conduciendo a una válvula giratoria como se describe en Jones and Malone. La salida del eje del motor hidráulico 412 se conecta a un dispositivo de resolución de eje 420 y un posicionador magnético de 2 polos 1 posición 435. La caja de cambios 440 puede ser cualquier relación de transmisión que es ventajosa para el funcionamiento del motor hidráulico 410, pero tiene que coincidir con el número de lóbulos en el rotor de válvula de lodo giratoria 450 y el estator 452. El procesador de control de telemetría 430 recibe un flujo de datos de entrada 432, y utilizar la retroalimentación de posición del eje de la resolución 420 para accionar la placa oscilante por medio de la línea de control del accionador 437 y el accionador de la placa oscilante 425 para introducir

fases se desplaza en la onda de presión de lodo generada por el rotor de válvula giratoria 450 y estator 452.

[0087] Una realización alternativa de un sistema de telemetría de pulso de lodo de accionamiento hidráulico se muestra en la FIG. 11B, que es similar a la realización mostrada en la FIG. 11A, pero con un rotor de válvula giratoria de 2 lóbulos 460 y estator 462, sin una caja de cambios, pero por el uso de un posicionador magnético de 4 polos (2 posiciones) 437 y dispositivo de resolución 420. Se requiere el dispositivo de resolución 420 en la salida del eje hidráulico con el fin de conocer y controlar la rotación del eje del motor hidráulico 412 como una función del tiempo. El posicionador magnético 437 es un mecanismo opcional pero preferido porque regresa de forma pasiva el rotor de válvula giratoria 460 a una posición abierta cuando el motor está apagado o en caso de un fallo electrónico para evitar exigir a la tubería húmeda. Un procesador 430 unido a la placa oscilante de control de accionador 425 acepta un flujo de brocas de entrada 432 a través de un bus de datos digital. Se convierte el flujo de datos digitales entrante 432 en una secuencia de posiciones de eje 412 como una función del tiempo. Las brocas pueden ser codificadas en pulsos de presión que utilizan BPSK o QPSK o Feher QPSK. El dispositivo de resolución 420 se alimenta de nuevo a la posición del eje 412 al procesador 430 que controla el flujo de datos de válvula giratorio 460 de modo que el procesador 430 puede realizar ajustes dinámicos en el ángulo de la placa oscilante por medio de la línea de control 437 y el accionador de la placa oscilante 425, para lograr la secuencia de ondas de presión deseadas de presiones de lodo para una telemetría de pulso de lodo transmitida por un tubo de perforación durante la perforación.

[0088] Las aplicaciones y realizaciones descritas anteriormente para la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable tienen todos los circuitos hidráulicos de bucle abierto que no tienen todas las ventajas de la reversibilidad de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable. La bomba de desplazamiento de pistón axial dinámicamente variable también se puede utilizar en aplicaciones hidráulicas de bucle cerrado donde la capacidad de la bomba para invertir el flujo de fluido hidráulico a través de la bomba puede resultar en una reducción significativa en el número de válvulas a controlar, una reducción del número de pasos hidráulicos, así como un control más preciso de aplicaciones de baja presión diferencial como el muestreo de fluido de formación. Las FIGS. 12 y 14 ilustran los beneficios del uso de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable en circuitos hidráulicos reversibles de bucle totalmente cerrado. Estas

realizaciones se pueden incorporar en las herramientas de fondo de pozo que se transmiten en la línea cableada, tubería flexible, y/o collar de perforación.

[0089] La FIG. 12 es el esquema hidráulico para una aplicación de extracción de muestras de la pared lateral. Las bombas hidráulicas se han utilizado en este tipo de aplicación antes, pero las bombas son de desplazamiento fijo y unidireccional. Si la sierra de perforación de corte de núcleo se queda atascada, el motor de accionamiento de la sierra no puede ser invertido y el eje debe ser cortado de modo que la herramienta se puede extraer de forma segura desde el orificio sin dañar el orificio o la herramienta. El esquema mostrado en la FIG. 12 resuelve este problema. Un motor eléctrico 540 acciona un eje 512 que acciona una bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 500 y una bomba de carga 505. El ángulo de la placa oscilante de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 500 se incrementa por un accionador de la placa oscilante (no mostrada) de modo que fluya fluido hidráulico fuera de línea 502 a un motor hidráulico 510, haciendo al eje 522 girar la sierra de perforación de corte de núcleo 550 en la dirección de corte. La presión a través del motor hidráulico 510 se puede supervisar para confirmar el funcionamiento del sistema e identificar posibles condiciones anómalas. Si el cortador 550 se queda atascado, la alta presión en línea 502 se incrementará de manera que desencadena la válvula de alivio de presión PRV11 y conduce el fluido a través de la línea 507 conectada al pistón de asistencia negativa 576 reduciendo el ángulo de la placa oscilante en la bomba 500. Si se determina por el operador que el cortador 550 se ha quedado atascado, la dirección de rotación del motor 510 del eje 522 se puede invertir, desenroscando el cortador, ajustando el ángulo de la placa oscilante a un valor negativo, causando el flujo de alta presión en línea 503. El alivio de la sobrepresión es proporcionado por PRV14. En ese caso, se aplica alta presión a la válvula servo positiva de la placa oscilante 575 haciendo al ángulo de la placa oscilante reducir la velocidad de flujo de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 500 para aliviar el exceso de presión en la línea 503. La ventaja de este sistema es que protege automáticamente, y si el cortador 550 se queda atascado, la bomba se puede revertir, desenroscando el cortador 550 del eje 522 de modo que el eje 522 puede ser retraído de forma segura y la herramienta se puede sacar del orificio.

[0090] Otra aplicación para la que es ideal la bomba de pistón axial de velocidad variable es el muestreo de fluido de formación utilizando una "bomba de pistón de hueso de perro". Un ejemplo de la técnica anterior se muestra en la FIG. 13.

El uso de una bomba de extremo único desplazamiento fijo 600 requiere 4 válvulas V_A , V_B , V_C , y V_D , y 4 válvulas de verificación CV20, CV21, CV22, y CV23 para accionar la bomba de pistón de hueso de perro 640. La sonda de empacador de pared lateral 653 se despliega contra la pared del taladro con la fuerza suficiente para hacer un sello hidráulico con la formación. Para accionar el pistón de hueso de perro de la bomba de pistón 640 649 a "la derecha", en la figura, el motor eléctrico 635 dirige de la bomba de desplazamiento fijo no reversible 600. Las válvulas V_A y V_D se accionan o "abren", mientras que las válvulas V_B y V_C están off o "cerradas". El fluido de alta presión en la línea 623 fluye a través de la válvula de verificación CV21 a través de la válvula V_A en la cámara 641 para desplazar el pistón 649 hacia la derecha. El fluido de baja presión fluye fuera de la cámara 644 a través de la válvula V_D al depósito 75. El fluido es extraído a partir de la formación a través de la línea de flujo 647, y es aspirado dentro de la cámara 643. Al mismo tiempo, el fluido de formación en la cámara 642 es empujada a través de las válvulas de verificación VC32 en la línea de flujo 648, donde o bien se descarga el fluido en el orificio o se desvía a la botella de muestra para el transporte a la superficie cuando la herramienta se extrae del orificio. Una vez que el pistón 649 de la bomba de pistón de hueso de perro 640 se ha movido completamente hacia la derecha, las válvulas están invertidas. V_A y V_D están cerradas mientras que las válvulas V_B y V_C están abiertas, permitiendo que el fluido a alta presión de la bomba 600 fluya en la cámara 644 para desplazar el pistón de hueso de perro 649 a la izquierda en la figura. El fluido de formación que se acaba de retirar en la cámara 643 ahora se exprime a través de la válvula de verificación CV33 en la línea 648 para la descarga en el fondo de pozo o para llenar además una botella de la muestra para el transporte a la superficie. Las válvulas V_A , V_B , V_C , y V_D se controlan por medio de una unidad de control 611. Cualquier condición de sobrepresión que se produce se alivia con la válvula de alivio de presión PRV60. El control de la tasa de muestreo de fluido de formación se lleva a cabo mediante el control de la velocidad del motor eléctrico 635 en respuesta a los cambios en la presión medida por el transductor de presión 650.

[0091] La realización en la FIG. 14 es el resultado de la sustitución de la bomba de desplazamiento fijo "técnica anterior" 600 en la FIG. 13 con una bomba de desplazamiento de pistón axial dinámicamente variable 700 mostrada en la FIG. 14. Las válvulas V_A , V_B , V_C y V_D y las válvulas de verificación CV20, CV21, CV22, y CV23 en la FIG. 13 se pueden quitar, y el número de pasos hidráulicos se reduce, lo que simplifica en gran medida el distribuidor hidráulico. Una simplificación adicional es

que el motor eléctrico 735 que impulsa la bomba de pistón de desplazamiento variable axial 700 y bomba de carga 705 a través del eje de accionamiento 712 puede ser un motor de inducción de velocidad fija. Con la sonda empacadora de la pared lateral 753 desplegada contra la pared del fondo de pozo de manera que tenga un sello hidráulico con la formación, el ángulo de la placa oscilante de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 700 se incrementa en la dirección positiva por el accionador de la placa oscilante 725 de manera que el fluido hidráulico fluye a través de la línea 702 en la cámara 741 y fuera de la cámara 744 de la bomba de pistón de hueso de perro 740 a través del conducto 703, haciendo al pistón de hueso de perro 749 desplazarse a la derecha. Esto fuerza al fluido de formación fuera de la cámara 742 a través de la válvula de verificación CV42 en la línea 748 para la descarga en el fondo de pozo o la deflexión en una botella de muestra para el transporte a la superficie cuando la herramienta se saca del orificio. Al mismo tiempo, el fluido de formación de la sonda 753 se retira en la cámara 743 a través de la línea de flujo 747 y la válvula de verificación CV41. El ajuste del ángulo de la placa oscilante se puede aumentar o disminuir en respuesta a las lecturas del transductor de presión de la línea de flujo 750 para asegurar que la caída de presión en la línea de flujo 747 no sea demasiado baja, lo que haría que cualquier gas disuelto en el fluido de formación en línea de 747 salga de la solución. Una vez que el pistón de hueso de perro 749 ha alcanzado su máximo recorrido hacia la derecha, el ángulo de la placa oscilante de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 700 se invierte mediante el accionamiento de la placa oscilante 725 bajo el control del módulo de control 711 y el control de las líneas 716. Cuando el ángulo de la placa oscilante es negativo, el flujo a través de la bomba de pistón axial de desplazamiento dinámicamente variable 700 se invierte. El fluido hidráulico de alta presión fluye en línea 703 en la cámara 744 y fuera de la cámara 741 a través de la línea 702 de nuevo a la bomba. Esto hace que el pistón de hueso de perro 749 se desplace a la izquierda en la figura, forzando al fluido de formación en la cámara 743 para fluir a través de la válvula de verificación CV43 en la línea de flujo 748 para la descarga en el pozo o la continuación de la deflexión en una botella de muestra (no se muestra) para el transporte a la superficie cuando la herramienta se extrae del orificio. Al mismo tiempo se está retirando fluido de formación en la cámara 742 a través de las válvulas de verificación CV40, la línea de flujo 747, y la sonda 753. El alivio de la sobrepresión para la bomba 700 es proporcionado por las válvulas de alivio de presión y PRV31 PRV32. El uso de una bomba de pistón axial de desplazamiento variable de bucle

cerrado reversible resulta en una simplificación significativa del colector hidráulico necesario para la interfaz con la bomba de hueso de perro y resulta en un mayor grado de control de la presión de fluido de formación.