

***Sistema de Perforación de Presión Controlada con Medición de
Caudal y Control de Pozo***

-por-

***Walter Scott Dillard, Paul R. Northam, David J. Vieraitis, y
Gerald Geoff George***

REFERENCIA A SOLICITUDES RELACIONADAS

[0001] La presente solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud Provisional 62/080,847 de los Estados Unidos, presentada el 17 de noviembre de 2014, la cual se incorpora por referencia a la presente.

ANTECEDENTES DE LA DIVULGACIÓN

[0002] La Figura 1 muestra un sistema de perforación de circuito cerrado 10, de acuerdo al estado de la técnica anterior para la perforación con presión controlada. El sistema de perforación 10 cuenta con un dispositivo de control rotativo (RCD) 12 del cual se extienden una sarta de perforación 14, un conjunto de fondo de pozo (BHA) y una broca de perforación 18 pozo abajo dentro de un agujero de pozo 16 a través de una formación F. El dispositivo de control rotativo (RCD) 12 encima del BOP contiene y desvía los retornos anulares de perforación para crear el circuito cerrado de fluido incompresible de perforación.

[0003] El Sistema 10 también incluye bombas de lodo 34, un tubo vertical (no mostrado), un tanque de lodo 32, un separador

de gas de lodo 30, y distintas líneas de flujo, así como otros componentes convencionales. Adicionalmente, el sistema de perforación 10, incluye un múltiple de estrangulación automatizado 20 que está incorporado dentro de los otros componentes del sistema 10.

[0004] Finalmente, un sistema de control 40 del sistema de perforación 10 está centralizado e integra soporte físico, soporte lógico y aplicaciones a lo largo del sistema de perforación 10. El sistema de control centralizado 40 se emplea para monitorear, medir y controlar parámetros en el sistema de perforación 10. Como tal, el sistema de control 40 puede ser caracterizado como un sistema de control de perforación con presión gestionada (MPD). En este ambiente confinado de perforación de circuito cerrado, las pérdidas o afluencias pequeñas del agujero del pozo son detectables en la superficie, y el sistema de control 40 puede analizar la información de presión y caudal, para detectar amagos de reventones, pérdidas y otros eventos y puede alterar los parámetros de perforación para controlar las operaciones de perforación como respuesta a esto.

[0005] El múltiple de estrangulamiento automatizado 20 gestiona la presión y el caudal durante la perforación y se encuentra incorporado dentro sistema de perforación 10 corriente abajo del dispositivo de control rotativo 12 y corriente arriba del separador de gas 30. El múltiple 20 tiene estranguladores 22, un caudalímetro másico 24, sensores de presión (no mostrados), un controlador local (no mostrado) para controlar la operación del múltiple 20 y una unidad de potencia hidráulica (no mostrada) y/o motor eléctrico, para accionar los estranguladores 22. El sistema de control 40 se encuentra acoplado de forma comunicativa con el múltiple 20 y cuenta con

un panel de control con una interfaz de usuario y funciones de procesamiento para monitorear y controlar al múltiple 20.

[0006] El caudalímetro másico 24 se emplea en el sistema MPD 10 para obtener mediciones de las velocidades de caudal. Durante las operaciones, por ejemplo, es conveniente tener mediciones altamente precisas y exactas de las velocidades de caudal con respecto a un rango extendido de caudal encontrando durante la perforación con presión gestionada. Sin embargo, el caudalímetro másico típico 24 inherentemente pierde exactitud en el extremo inferior de la escala de medición de caudal debido a pérdidas internas.

[0007] Un tipo de caudalímetro con las más alta exactitud en todo el rango de las velocidades de caudal deseadas, es el caudalímetro másico de tipo Coriolis. El caudalímetro de tipo Coriolis es apreciado por su precisión y capacidad para medir velocidad de caudal volumétrico, velocidad de caudal másico y densidad de fluido de forma simultánea. Por esta razón, el caudalímetro 24 del sistema MPD 10 que se tiende a usar, es el caudalímetro de tipo Coriolis con capacidad para la máxima velocidad esperada de caudal.

[0008] Infortunadamente, existen algunas desventajas asociadas con el caudalímetro másico tipo Coriolis 24. Por ejemplo, las conexiones de fluido del caudalímetro másico de tipo Coriolis 24 tienden a tener una capacidad de presión inferior al resto de los equipos utilizados en el sistema MPD 10.

Adicionalmente, el caudalímetro de tipo Coriolis 24 usualmente tiene una capacidad para una presión de trabajo inferior a la del múltiple de estrangulamiento 20 del sistema MPD 10. En particular, el múltiple 20 para el sistema MPD 10, como el de

la Figura 1, puede tener típicamente una capacidad de presión de hasta 10.000 psi. Sin embargo, aunque la capacidad de presión del caudalímetro depende de su tamaño y materiales, el caudalímetro másico de tipo Coriolis 24 típicamente tiene una capacidad inferior a las 3.000 psi y comúnmente entre 1.500 y 2.855 psi.

[0009] Por estas razones, el caudalímetro de tipo Coriolis 24 debe estar corriente abajo de los estranguladores 22, debido a esta restricción en la presión y generalmente es necesario equipo de liberación de presión (no mostrado), en caso que haya taponamiento en el caudalímetro 24. Adicionalmente, el caudalímetro de tipo Coriolis 24 puede ser instalado con una válvula de derivación 25 y un sensor de presión (no mostrado). Si se excede un límite de presión del caudalímetro 24, se acciona la válvula de derivación para desviar el caudal alrededor del caudalímetro 24, para que se pueda continuar con la perforación a velocidades que pueden llegar a exceder la capacidad del caudalímetro 24.

[0010] Además de algunas de las restricciones físicas, el caudalímetro másico de tipo Coriolis 24 utilizado en las operaciones de MPD tiene algunas restricciones relativas a su capacidad para medir. Por ejemplo, aún con un rango mejorado de velocidades de caudal, el caudalímetro másico de tipo Coriolis 24 aún tiene una exactitud inferior en el rango bajo de velocidades de caudal.

[0011] Adicionalmente, el caudalímetro másico tipo Coriolis 24 tiene la limitación de tomar medidas de fluidos con un bajo contenido de gases. Cuando se mezcla demasiado gas con el líquido que pasa a través del caudalímetro 24, por ejemplo, el error en la medición del caudalímetro 24 aumentará.

[0012] Una de las causas para el incremento en el contenido de gas dentro del fluido de perforación en las operaciones MPD puede ser el escape de gas de cavitación que ocurre en el estrangulador 22. Las válvulas, como las que se emplean para el estrangulador 22 para controlar el caudal de fluidos, tienen una cierta relación entre la presión corriente arriba y la de corriente abajo, en la cual es probable que ocurra la cavitación. Esta relación de presión se puede caracterizar mediante un índice de cavitación σ , el cual se define de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P_u - P_v}{P_u - P_d}$$

en donde:

P_u = Presión Corriente Arriba, psig;

P_v = Presión de vapor para una temperatura dada, psig;

P_d = Presión Corriente Abajo, psig; y

σ = Índice de Cavitación, adimensional.

[0013] El índice de cavitación σ puede variar para una válvula o estrangulador, cuando se está abriendo o cerrando parcialmente. Cuando una válvula se está cerrando y la velocidad del caudal es constante, por ejemplo, el índice de cavitación σ disminuye. Cuando el índice de cavitación σ disminuye hasta un cierto valor, se forman burbujas de cavitación del escape de gas dentro del fluido, a medida que este pasa a través de la válvula. El valor específico del índice de cavitación σ , en el cual se da la cavitación, se puede determinar empíricamente y graficar para todas las posiciones de los componentes de la válvula (por ejemplo vástago o similares). A medida que el índice de cavitación σ

continúa cayendo por debajo de un valor de cavitación conocido, aumenta la cantidad de gas que se escapa del líquido.

[0014] Por estas razones, cuando las presiones corriente arriba y corriente abajo de los estranguladores de perforación 22 del sistema MPD 10 sobrepasan el umbral del índice de cavitación σ , una parte de las burbujas de cavitación pueden viajar a lo largo de la ruta del caudal a través del caudalímetro de tipo Coriolis 24 y pueden ocasionar un error adicional en la medición del caudal.

[0015] Además del simple índice de cavitación de entrada-salida discutido anteriormente, el índice de cavitación crítico es un valor que puede caracterizar los efectos de gradientes de presión y velocidad local a través de la válvula, tales como los estranguladores 22. El índice de cavitación crítico se puede caracterizar como:

$$\sigma_i = \frac{(P - p_v)}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

σ_i índice de cavitación crítica

P presión estática en caudal sin perturbaciones

ρ densidad del líquido

V velocidad de corriente no perturbada

Esta fórmula describe una parte de la física básica detrás de la cavitación.

[0016] Otra causa de escape de gases en las operaciones MPD es debido a la evaporación súbita que puede ocurrir dentro o cerca al caudalímetro de tipo Coriolis 24. La evaporación

súbita es ocasionada por la caída en presión a través de una restricción en el flujo, en donde la presión corriente abajo es inferior a la presión del vapor y $\sigma < 1$. La cavitación ocurre dentro de un rango por debajo a una cifra de cavitación crítica cuando $\sigma > 1$.

[0017] Otra causa de escape de gas en las operaciones MPD puede estar relacionada con la vaporización instantánea, la cual puede ocurrir dentro o cerca al caudalímetro de tipo Coriolis 24, cuando está colocado en una elevación mayor a la salida de caudal del sistema. Debido al diseño y disposición de algunas operaciones del taladro de perforación, por ejemplo, puede ser difícil encontrar un lugar para posicionar el caudalímetro de tipo Coriolis 24 a la misma elevación o por debajo de la salida de caudal del sistema.

[0018] La vaporización instantánea ocasionada por la elevación puede constituir un factor, si el tanque de lodo de perforación se encuentra a nivel del suelo y el caudalímetro 24 está colocado a más de 34 ft por encima del tanque. Esto causa una presión cercana a 0 psig en el caudalímetro 24, asumiendo un caudal completo y constante. Aún si el tanque está a menos de 34 ft por debajo del caudalímetro 24, la presión del fluido puede caer por debajo de la presión atmosférica en el caudalímetro 24. Esto facilita que pequeñas variaciones, escalones o protuberancias dentro del tubo ocasionen vaporización instantánea localizada. Para prevenir problemas de vaporización instantánea, los fabricantes de caudalímetros másicos de tipo Coriolis 24, usualmente indican que la salida de caudal del sistema debe estar por encima del caudalímetro 24, lo cual también puede prevenir que el fluido se drene del caudalímetro 24 si se detiene el caudal.

[0019] Una forma adicional para que el gas entre al caudalímetro 24, es que el gas atrapado en el fluido se separe a medida que el fluido sea sometido a una caída en la presión. Por ejemplo, el gas atrapado en el lodo a base de petróleo se puede escapar durante la caída de presión en el estrangulador 22. El gas podría no volverse a mezclar con la solución y las burbujas de gas pueden pasar a través del caudalímetro 24, alterando las lecturas.

[0020] Una solución a los problemas de cavitación y escape de gases ha sido la de agregar una válvula u orificio, corriente abajo del caudalímetro másico de tipo Coriolis 24. En esta posición, la válvula u orificio puede reducir los efectos de la cavitación, al añadir contrapresión dentro del tubo que se extiende desde los estranguladores 22 hasta el caudalímetro 24. Sin embargo, la válvula de control que ha sido utilizada, típicamente es controlada de forma manual y no se puede restablecer de forma confiable, durante las operaciones a medida que las condiciones de caudal cambian.

[0021] El objeto de la presente divulgación está dirigido a superar o al menos reducir los efectos, de uno más de los problemas indicados anteriormente.

RESUMEN DE LA DIVULGACIÓN

[0022] De acuerdo con la presente divulgación, un sistema de perforación taladra un agujero de pozo, usando una o más válvulas o estranguladores para controlar la presión en el caudal de fluido de perforación en una operación de perforación con control de presión. Se obtiene una medición del caudal del fluido de perforación del agujero del pozo.

Con base, al menos parcialmente, en la medición obtenida, se controla la presión corriente arriba del caudal de fluido de perforación, con una o más válvulas del sistema de perforación. Con base, al menos parcialmente, en la medición obtenida, el caudal de fluido de perforación del agujero del pozo se distribuye de forma selectiva a través de uno o más de una pluralidad de caudalímetros del sistema de perforación. El mencionado uno o más caudalímetros seleccionados pueden obtener, por lo menos de manera periódica, la medición del caudal de fluido de perforación. Por ejemplo, el mencionado uno o más caudalímetros seleccionados pueden obtener una velocidad de caudal másico del caudal de fluido de perforación.

[0023] Para distribuir de manera selectiva el caudal del fluido de perforación a través del mencionado uno o más caudalímetros, se puede realizar una determinación de cuál del mencionado uno o más caudalímetros seleccionar para distribución, mediante la comparación de la velocidad de caudal medida, una presión medida y similares respecto a una capacidad para cada uno de los caudalímetros. Adicionalmente, la distribución selectiva del caudal del flujo de perforación puede pretender minimizar el error general de medición en las mediciones obtenidas usando uno o más caudalímetros, mediante la determinación de cuál caudalímetro o caudalímetros seleccionar para distribución, con base en una comparación de error en medición para cada uno de los caudalímetros.

[0024] El control de la presión corriente arriba del caudal del fluido de perforación dentro del agujero del pozo puede ocurrir, de manera simultánea o de forma independiente, de la distribución selectiva del caudal del fluido de perforación a través de uno o más caudalímetros seleccionados. Para controlar la presión corriente arriba, al menos una primera válvula

corriente arriba de al menos uno de los caudalímetros, puede ser operada para ajustar la presión corriente arriba. Lo anterior puede comprender adicionalmente, ajustar la presión, al menos dentro del mencionado al menos un caudalímetro, empleando por lo menos una segunda válvula corriente abajo del mencionado del mencionado al menos un caudalímetro. A su vez, la mencionada al menos una primera válvula puede ser reajustada en respuesta al ajuste en la presión corriente arriba ocasionada por la operación de la mencionada al menos una segunda válvula.

[0025] Puede ser necesario ajustar la presión dentro del mencionado al menos un caudalímetro, empleando la mencionada al menos una segunda válvula, cuando se determina que ocurre un escape de gas dentro del mencionado al menos un caudalímetro ocasionado por la mencionada al menos una primera válvula. La determinación puede comprender la comparación de uno o más parámetros operativos del mencionado al menos un caudalímetro, con la información empírica asociada con el mencionado al menos un caudalímetro.

[0026] Puede ser necesario ajustar la presión dentro del mencionado al menos un caudalímetro, empleando la mencionada al menos una segunda válvula, con base en el índice de cavitación (calculado con base en la presión medida relativa al mencionado al menos un caudalímetro) que difiera de un valor esperado para el índice de cavitación (esperado de un posición actual de la mencionada al menos una primera válvula).

[0027] Para distribuir de forma selectiva el caudal de fluido de perforación a través de uno o más caudalímetros, se puede seleccionar un primero de los caudalímetros, con base en un primer nivel de la medición obtenida, y se puede seleccionar

un segundo de los caudalímetros y no el primer caudalímetro, con base en un segundo nivel de las mediciones obtenidas. Por ejemplo, el primer caudalímetro puede tener una primera capacidad de caudal, mientras que el segundo puede tener una segunda capacidad de caudal (superior o inferior). Como una alternativa, se puede seleccionar un primero de los caudalímetros con base en un primer nivel de la medición obtenida, y se pueden seleccionar tanto el primer caudalímetro como el segundo de los caudalímetros, con base en un segundo nivel de la medición obtenida. El primer y el segundo caudalímetros pueden tener la misma capacidad o una distinta.

[0028] De acuerdo con la presente divulgación, un aparato para la perforación con presión controlada de un agujero de pozo utiliza una pluralidad de caudalímetros en comunicación fluida en paralelo. Un distribuidor en comunicación fluida entre el agujero del pozo y la pluralidad de caudalímetros es operable para direccionar de manera selectiva el caudal de fluido de perforación desde el agujero del pozo a uno o más de la pluralidad de caudalímetros. Los caudalímetros pueden tener cada uno, la misma capacidad de caudal o al menos dos capacidades de caudal diferentes. Asimismo, los caudalímetros pueden emplear el mismo tipo de dispositivo de caudalímetro o pueden utilizar al menos dos tipos distintos de dispositivo de caudalímetro. En general, los caudalímetros pueden ser un caudalímetro de tipo Coriolis, un caudalímetro tipo Coriolis de tubo curvo, un caudalímetro tipo Coriolis de tubo recto, un caudalímetro de cono en V y similares.

[0029] El aparato adicionalmente incluye al menos una primera válvula en comunicación fluida corriente arriba con el distribuidor. La mencionada al menos una primera válvula es operable para controlar la presión corriente arriba dentro del

caudal del fluido de perforación. El aparato puede incluir adicionalmente al menos una segunda válvula en comunicación fluida corriente abajo con el distribuidor. La mencionada al menos una segunda válvula puede ser operable para controlar la presión corriente arriba dentro de uno o más caudalímetros.

[0030] El distribuidor puede tener una pluralidad de primeras válvulas, cada una en comunicación fluida corriente arriba de los caudalímetros. Cada una de las mencionadas primeras válvulas puede ser operable para controlar la presión corriente arriba dentro del caudal de fluido de perforación. De manera alternativa, cada una de las primeras válvulas puede ser operable (en estado abierto/cerrado) para permitir o rechazar el caudal del fluido de perforación a través de su respectivo caudalímetro. Además de las primeras válvulas, el distribuidor puede tener una pluralidad de segundas válvulas, cada una en comunicación fluida corriente abajo de uno de los caudalímetros respectivos. Cada una de las segundas válvulas puede ser operable para controlar la presión corriente arriba en el caudalímetro respectivo.

[0031] El aparato puede incluir adicionalmente un control en comunicación operable con el distribuidor. El control opera al distribuidor para dirigir de forma selectiva el caudal de fluido de perforación al mencionado uno o más caudalímetros. El control obtiene una medición del caudal de fluido de perforación del agujero del pozo y opera al distribuidor, de conformidad con la medición obtenida. El control puede estar en comunicación operable con los caudalímetros y puede controlar la presión corriente arriba en el caudal de fluido de perforación con una o más válvulas o estranguladores del sistema con base, al menos parcialmente, en la lectura de uno o más caudalímetros.

[0032] De acuerdo con la presente divulgación, la perforación de un agujero de pozo con un sistema de perforación que tiene una o más válvulas que obtiene al menos de forma periódica, una lectura del caudal del fluido de perforación del agujero del pozo con al menos un caudalímetro. La presión corriente arriba en el caudal del fluido de perforación es controlada con al menos una primera válvula con base, al menos parcialmente, en la lectura del mencionado al menos un caudalímetro. La cavitación en el caudal del fluido de perforación se calcula a través del mencionado al menos un caudalímetro, ocasionada por la mencionada al menos una primera válvula. Con base en la cavitación estimada, la presión del caudal del fluido de perforación se ajusta dentro del mencionado al menos un caudalímetro, con al menos una segunda válvula en comunicación corriente abajo con el mencionado al menos un caudalímetro.

[0033] Un aparato para la perforación con presión controlada del caudal de fluido de perforación de un agujero de pozo, para ejecutar dicha operación puede incluir al menos una primera válvula, al menos un caudalímetro, al menos una segunda válvula y un control. La mencionada al menos una primera válvula está en comunicación fluida con el caudal de fluido de perforación del agujero del pozo y es operable con los primeros estados, para controlar una primera presión corriente arriba del caudal de fluido de perforación. El mencionado al menos un caudalímetro está en comunicación fluida corriente abajo de la mencionada al menos una primera válvula y es operable para medir el caudal de fluido de perforación después de los caudalímetros. Finalmente, la mencionada al menos una segunda válvula se encuentra en comunicación fluida corriente abajo del mencionado al menos un caudalímetro y es operable con

segundos estados, para controlar una segunda presión corriente arriba del caudal del fluido de perforación, por lo menos en el mencionado al menos un caudalímetro. En este aparato, el control está en comunicación operable con la mencionada al menos una segunda válvula y ajusta de manera automática, el segundo estado de la mencionada al menos una segunda válvula, con base en un valor de cavitación asociado con el primer estado de la mencionada al menos una primera válvula.

[0034] De acuerdo con la presente divulgación, la perforación de un agujero de pozo con un sistema de perforación que tiene una o más válvulas que obtiene, al menos de forma periódica, una primera lectura del caudal de fluido de perforación del agujero del pozo con un primer caudalímetro y obtiene, al menos de forma periódica, una segunda lectura del caudal del fluido de perforación del agujero del pozo con al menos un segundo caudalímetro en comunicación en serie con el primer caudalímetro. La primera y al menos una segunda lectura son comparadas entre ellas. Posteriormente se controla la presión corriente en el caudal de fluido de perforación con al menos una válvula con base, al menos parcialmente, en la comparación.

[0035] Un aparato para la perforación con presión controlada del caudal de fluido de perforación de un agujero de pozo, para ejecutar dicha operación este puede incluir al menos una primera válvula, un primer caudalímetro, al menos un segundo caudalímetro y un control. La mencionada al menos una primera válvula se encuentra en comunicación fluida con el caudal de fluido de perforación del agujero del pozo y es operable con primeros estados, para controlar la primera presión corriente arriba del caudal de fluido de perforación. El primer caudalímetro se encuentra en comunicación fluida corriente

abajo de la mencionada al menos una primera válvula y es operable para medir una primera lectura del caudal de fluido de perforación que pasa por este. El mencionado al menos segundo caudalímetro se encuentra en comunicación en serie corriente abajo del primer caudalímetro y es operable para medir una segunda lectura del caudal de fluido de perforación que pasa por este. El control está en comunicación operable con el primer y el mencionado al menos segundo caudalímetros y compara la primera y al menos la segunda lectura. El control controla los primeros estados de la mencionada al menos una primera válvula con base, al menos parcialmente, en la comparación.

[0036] El anterior resumen no pretende resumir cada una de las realizaciones potenciales o cada aspecto de la presente divulgación.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0037] La Fig. 1 ilustra un sistema de perforación con presión controlada, que tiene un múltiple de estrangulación y un caudalímetro de conformidad con el estado anterior de la técnica.

[0038] La Fig. 2 ilustra un sistema de perforación con presión controlada que tiene un múltiple de estrangulación y una distribución de caudalímetros de conformidad con la presente divulgación.

[0039] Las Figs. 3 a 6 presentan diferentes diagramas esquemáticos para múltiples de estrangulación que tienen múltiples caudalímetros en paralelo de acuerdo con la presente divulgación.

[0040] La Fig. 7 ilustra un diagrama esquemático del sistema de control divulgado.

[0041] La Fig. 8 ilustra un proceso de control de distribución para el sistema de control divulgado.

[0042] Las Figs. 9A-9B ilustran diagramas de múltiples de estrangulación que tienen caudalímetros redundantes en serie, de acuerdo con la presente divulgación.

[0043] La Fig. 10 ilustra un múltiple de estrangulación que tiene una válvula de estrangulación o de control de caudal corriente abajo del caudalímetro, para control de la cavitación.

[0044] La Fig. 11 ilustra un proceso de control de cavitación para el sistema de control divulgado.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA DIVULGACIÓN

A. Generalidades del Sistema

[0045] La Figura 2 muestra un sistema de perforación de circuito cerrado 10, de acuerdo a la presente divulgación para perforación con presión controlada. Tal como se muestra y establece en el presente, este sistema 10 puede ser un sistema de Perforación con Presión Gestionada (MPD) y de manera más particular un sistema MPD con Presión Constante de Conjunto de Fondo de Pozo (CBHP). A pesar que se mencionan en este contexto, la enseñanzas de la presente divulgación, también se pueden aplicar igualmente a otros tipos de sistemas de perforación con presión controlada, tales como sistemas MPD (Perforación con Tapa de Lodo Presurizado, Perforación con Control de Flujo-Retornos, Perforación de Gradiente Doble, etc.), así como a

sistemas de Perforación Bajoequilibrada (UBD), tal como podrá ser apreciado por alguien experto en la materia que tenga el beneficio de la presente divulgación.

[0046] El Sistema de perforación 10 de la Figura 2 tiene varias similitudes con el sistema ya mencionado en la Figura 1. Por ejemplo, el sistema de perforación 10 tiene un dispositivo de control rotativo (RCD) 12 del cual se extienden una sarta de perforación 14, un conjunto de fondo de pozo (BHA) y una broca de perforación 18 pozo abajo dentro de un agujero de pozo 16 a través de una formación F. El dispositivo de control rotativo 12 puede incluir cualquier dispositivo de contención de presión adecuado que mantenga el agujero de pozo en un circuito cerrado en todo momento, mientras se esté perforando el agujero de pozo 16. El sistema 10 también incluye bombas de lodo 34, un tubo vertical (no mostrado), un tanque de lodo (32), un separador de gas de lodo 30 y distintas líneas de flujo, así como otros componentes convencionales.

[0047] Además de los anteriores, el Sistema de perforación 10 incluye un múltiple de estrangulación automatizado 100 que se encuentra incorporado dentro de otros componentes del sistema 10. Tal como se explica en mayor detalle a continuación, el múltiple de estrangulación 100 es distinto al múltiple de estrangulación del estado anterior de la técnica. En una implementación para perforación con presión gestionada, en donde se emplean tanto las mediciones de caudal másico como las válvulas de control de caudal (esto es estranguladores) para controlar los fluidos del agujero de pozo, mientras se perfora un pozo, el múltiple 100 de la presente divulgación tiene múltiples (dos o más) caudalímetros másicos 150a-b, conectados en un arreglo paralelo.

[0048] Brevemente, el múltiple 100 tiene estranguladores principales 100a-b y múltiples caudalímetros másicos 150a-b. Además de estos, el múltiple 100 puede tener algunos componentes convencionales, tales como sensores de presión (no mostrados), dispositivos electrónicos de control local (no mostrados) para controlar la operación del múltiple 100 y una unidad de potencia hidráulica (no mostrada) y/o motor eléctrico para accionar los estranguladores 110a-b.

[0049] Se puede conectar un estrangulador de presión 110a-b frente a cada caudalímetro 150a-b y se puede usar en conjunción con la retroalimentación de velocidades de caudal y otros parámetros, para controlar cuándo entrará el caudal al respectivo caudalímetro 150a-b. El conjunto combinado de todos los estranguladores de perforación 110a-b y los caudalímetros másicos 150a-b conectados en paralelo, pueden ser empleados concurrentemente para controlar la presión y el caudal del agujero de pozo, mientras se perfora, de acuerdo con las operaciones de perforación con presión gestionada.

[0050] Este conjunto se presta para una forma más compacta de múltiple MPD 100. Por ejemplo, los estranguladores 110a-b, los caudalímetros 150a-b y similares se pueden apilar o colocar en hileras en cercana proximidad uno al otro. De manera alternativa, cada serie de estranguladores 110a-b, caudalímetros 150a-b y similares pueden ser ensamblados de forma remota, siempre que haya espacio en el piso del taladro, pero pueden ser conectados en paralelo utilizando tubos y válvulas.

[0051] Se puede controlar, al menos parcialmente, la conservación del gas en solución para los caudalímetros 150a-b después de los estranguladores 110a-b, mediante la adición

de válvulas de control de caudal (esto es, estranguladores 120a-b), orificios, o similares corriente abajo de los caudalímetros 150a-b. Preferiblemente, los estranguladores 120a-b son controlables con base en las condiciones operativas. Tal como se describe en mayor detalle a continuación, los estranguladores 120a-b corriente abajo pueden proporcionar una contrapresión adecuada a los caudalímetros 150a-b, conservando así el gas dentro de la solución y permitiendo a los caudalímetros 150a-b que midan la velocidad de caudal de fluido con una exactitud mejorada, aún durante los cambios operativos. Con respecto a la elevación, los estranguladores secundarios 120a-b pueden permitirle al (los) caudalímetro(s) 150a-b tener una mayor elevación que el de la salida de caudal del sistema 10, lo cual podría ocasionar problemas en otras situaciones.

[0052] Finalmente, un sistema de control 40 del sistema de perforación 10 se encuentra centralizado e integra soporte físico, soporte lógico y aplicaciones a lo largo del sistema de perforación 10. El sistema de control centralizado 40 se emplea para monitorear, medir y controlar parámetros dentro del sistema de perforación 10. Como tal, el sistema de control 40 se puede caracterizar como un sistema de control de perforación con presión gestionada (MPD). En este ambiente confinado de perforación de circuito cerrado, por ejemplo, el sistema de control MPD 40 puede analizar la información de presión y caudal para detectar amagos de reventones, pérdidas y otros eventos y el sistema 40 puede gestionar la presión y el caudal durante la perforación, empleando el múltiple de estrangulación automatizado 100.

[0053] Sin embargo, en contraposición al sistema convencional del estado anterior de la técnica, el sistema de control MPD 40 de la presente divulgación tiene un controlador

de múltiple 50 con distintas funciones de control para el particular múltiple de estrangulación 100, tal como se describe en mayor detalle a continuación. Este controlador de múltiple 50 puede ser parte o estar integrado dentro o acoplado de forma comunicativa a los componentes del sistema de control MPD 40. De hecho, el controlador 50 y el sistema 40 pueden compartir muchos de los mismos recursos, mediciones, soporte lógico, comunicaciones y similares.

[0054] Brevemente, el sistema 10 en operación, emplea el dispositivo de control rotativo 12 para mantener el pozo cerrado a las condiciones atmosféricas. El fluido que sale del agujero de pozo 16 fluye a través del múltiple de estrangulación automatizado 100, el cual mide el caudal de retorno y la densidad utilizando el(los) caudalímetro(s) 150a-b instalados en línea con los estranguladores 110a-b. Posteriormente los componentes del soporte lógico del sistema de control MPD 40 comparan la velocidad del caudal dentro y fuera del pozo 16, la presión de inyección (o presión de tubo vertical), la contrapresión superficial (medida corriente arriba de los estranguladores de perforación 110a-b), la posición de los estranguladores 110a-b y la densidad del lodo. Comparando estas variables, el sistema de control MPD 40 identifica pequeñas pérdidas o afluencias en tiempo real, para gestionar la presión del conducto anular durante la perforación.

[0055] Durante la perforación, los caudalímetros 150a-b del múltiple pueden medir velocidades de caudal volumétrico y densidad del fluido de perforación. Por ejemplo, en la perforación con presión gestionada (MPD), el caudal de flujo se mide utilizando los caudalímetros 150a-b para determinar pérdida de circulación, detectar afluencias de fluidos o amagos

de reventones, para medir la densidad del lodo, para monitorear los retornos de fluido, etc.

[0056] En la perforación con presión controlada, el sistema de control MPD 40 introduce cambios en la presión y caudal en este circuito incompresible de fluido en la superficie para cambiar el perfil de presión anular en el agujero de pozo 16. De manera particular, al utilizar el controlador de múltiple 50 y el múltiple de estrangulamiento 100 para aplicar contrapresión en la superficie dentro del circuito cerrado, el sistema de control MPD 40 puede producir un cambio recíproco en la presión del fondo del pozo. De esta forma, el sistema de control MPD 40 utiliza información en tiempo real de caudal y presión y manipula la contrapresión anular para gestionar las pérdidas y afluencias del agujero del pozo.

[0057] En operación, el sistema de control MPD 40 emplea algoritmos internos para identificar lo que está ocurriendo agujero abajo y reacciona de manera automática. Como se puede ver, el sistema de control MPD 40 monitorea cualquier desviación en los valores durante las operaciones de perforación y alerta a los operadores de cualquier problema que pueda ser ocasionado por afluencias de fluidos al agujero de pozo 16 desde la formación F o una pérdida del lodo de perforación en la formación F. Adicionalmente, el sistema de control MPD 40 puede detectar, controlar y circular hacia afuera de forma automática dichas afluencias mediante la operación de los estranguladores 110a-b en el múltiple de estrangulación 100.

[0058] Por ejemplo, se puede advertir una posible afluencia de fluidos o "amago de reventón" cuando el valor del "caudal de salida" (medido por el(los) caudalímetro(s) 150a-b) se

desvía del valor del "caudal de entrada" (medido desde los cuentaemboladas de las bombas de lodos 34 o en otros lugares). Tal como se denomina, un "amago de reventón" es la entrada del fluido de la formación al agujero del pozo 16 durante las operaciones de perforación. El amago de reventón sucede debido a que la presión ejercida por la columna de fluidos de perforación no es lo suficientemente grande como para superar la presión ejercida por los fluidos en la formación F que está siendo perforada.

[0059] El amago de reventón o afluencia se detecta cuando el caudal de salida del pozo es significativamente mayor al caudal de entrada durante un lapso de tiempo especificado. Adicionalmente, la presión del tubo vertical (SPP) no debe aumentar por encima de un incremento máximo permisible SPP definido, y la densidad de salida del caudal de salida del pozo no cae más del umbral de densidad del gas superficial. Cuando se detecta una afluencia o amago de reventón, una alerta notifica al operador que aplique el freno, hasta que se confirme que es seguro perforar. En el entretanto no es necesario un cambio en la velocidad de las bombas de lodo 34 en esta etapa.

[0060] En el sistema de control MPD 40, el control de amago de reventón puede ser una función automatizada que combine la detección y el control del amago de reventón y el sistema de control MPD 40 puede basar su algoritmo de control de amago de reventón en el método modificado de los perforadores para manejar los amagos de reventón. En una forma de autocontrol de amagos de reventón, por ejemplo, el sistema de control MPD 40 cierra de manera automática el(los) estrangulador(es) 110a-b para aumentar la contrapresión superficial en el conducto

anular de agujero de pozo 16, hasta que se establezca un equilibrio de masa y se detenga la afluencia.

[0061] El sistema de control MPD 40 añade una cantidad predefinida de presión como amortiguador y circula la afluencia hacia afuera del pozo, mediante el control de la presión de tubo vertical. La presión del tubo vertical se mantendrá constante, mediante el ajuste automático de la contrapresión superficial, aumentando así la presión circulante agujero abajo y evitando una afluencia secundaria. Todo esto se puede monitorear y visualizar en el sistema de control MPD 40 para ofrecer control adicional de estos pasos.

[0062] Una vez se controla la diferencia entre el caudal de salida y el caudal de entrada, el sistema de control 40 mantendrá este equilibrio por un lapso de tiempo especificado, antes de cambiar al siguiente modo. En una operación exitosa, se puede esperar que el ciclo de detección y control de amagos de reventón pueda ser gestionado en aproximadamente dos minutos. El fluido del amago de reventón se moverá hacia arriba dentro del conducto anular a la máxima velocidad de la bomba, empleando una velocidad de caudal relativa disminuida pequeña de aproximadamente -0.1 galones por minuto para colocar en equilibrio la presión de la formación.

[0063] En contraposición a una afluencia, se puede advertir una posible pérdida de fluido cuando el valor del "caudal de entrada" (medido por los cuentaemboladas de las bombas 34 o en otros lugares) es mayor al valor del "caudal de salida" (medido por el(los) caudalímetro(s) 150a-b). Como se sabe, la pérdida de fluido es conocida como la pérdida de la totalidad de fluido de perforación, lechada o fluido de tratamiento que contiene partículas sólidas en la matriz de la formación. La resultante

acumulación de material sólido o torta de filtración puede ser indeseable, así como cualquier penetración del filtrado a través de la formación, además de la pérdida súbita de presión hidrostática debido a la rápida pérdida de fluido. En el sistema de perforación de circuito cerrado 10, cualquier pérdida observada sólo puede ser atribuida a la formación F.

[0064] Se pueden implementar pasos similares a los anteriores, pero adecuados para pérdida de fluido, por parte del sistema de control MPD 40 para gestionar la presión y el caudal durante la perforación en esta situación. Ahogar al pozo es tratar de detener que se inunde el pozo o de tener la capacidad para inundar el agujero del pozo 16. Los procedimientos para ahogar, usualmente involucran la circulación de fluidos del reservorio hacia afuera del agujero del pozo o el bombeo de un lodo de mayor densidad dentro del agujero de pozo 16, o ambos.

[0065] El operador puede iniciar el bombeo de nuevo lodo con el peso recomendado o seleccionado para ahogar. A medida que el lodo para ahogar desciende dentro del agujero del pozo 16, los estranguladores 110a-b se abren acercándose gradualmente a la posición de ajuste a medida que el lodo para ahogar circula de regreso a la superficie. Una vez el lodo para ahogar gira la broca 18, el sistema de control MPD 40 nuevamente cambia a control de presión del tubo vertical (SPP) hasta que el lodo para ahogar circula de regreso hasta la superficie.

[0066] Además del múltiple de estrangulación 100, el sistema de perforación 10 puede incluir un sistema de caudal continuo (no mostrado), un dispositivo de evaluación de gas 26, un caudalímetro multifase 28, y otros componentes incorporados dentro del sistema 10. El sistema de caudal continuo permite

que se mantenga el flujo mientras que se realizan las conexiones de tubería de perforación y el sistema de perforación 10, puede incluir o no dichos componentes. Por su parte, se puede utilizar el dispositivo de evaluación de gas 26 para evaluar fluidos en el lodo de perforación, como por ejemplo evaluar hidrocarburos (por ejemplo C1 to C10 o superiores), gases que no sean hidrocarburos, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrocarburos aromáticos (por ejemplo, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) u otros gases o fluidos de interés en el fluido de perforación. Por consiguiente, el dispositivo 26 puede incluir un dispositivo de extracción de gas que utilice una membrana semipermeable para extraer gas del lodo de perforación para análisis.

[0067] El caudalímetro multifase 28 puede ser instalado en la línea de flujo para ayudar en la determinación de la composición del fluido. Como se podrá apreciar, el caudalímetro multifase 28 puede ayudar a modelar el caudal en el lodo de perforación y proporcionar resultados cuantitativos para refinar el cálculo de la concentración de gas en el lodo de perforación.

B. Arreglos del Múltiple

[0068] Tal como se muestra en la Figura 2, el múltiple 100 incluye múltiples caudalímetros 150a-b conectados en un arreglo paralelo. Los distintos caudalímetros 150a-b pueden tener el mismo tamaño, o una combinación de tamaños, conectados en paralelo. En ambos casos, el múltiple 100 con caudalímetros 150a-b en paralelo preferiblemente mantiene una capacidad de medición de caudal máxima equivalente al del requerimiento de diseño original asociado con un único caudalímetro convencional.

[0069] Las Figuras 3 a 6 ilustran diferentes diagramas para múltiples de estrangulación 100 que tienen múltiples caudalímetros 150 en paralelo de conformidad con la presente divulgación. En cada uno de estos arreglos, una distribución de válvulas y/o estranguladores 101, 102, 104, 105, 110, 120 dirigen el flujo a través de ciertas combinaciones de caudalímetros 150.

[0070] Tal como se muestra en la Figura 3, el caudal de fluido de perforación del RCD (12) se dirige al múltiple 100, el cual incluye dos estranguladores principales 110a-b y dos caudalímetros 150a-b. Separándose a través de las válvulas de distribución 101a-b independientes, el caudal de fluido de perforación en la entrada del múltiple 100 pueda pasar a los dos estranguladores principales 100a-b, los cuales son operables de forma independiente. Los dos estranguladores principales 110a-b pueden controlar la contrapresión en el agujero del pozo corriente arriba del múltiple 100. Se pueden operar las distintas válvulas de distribución 101, 102, 104, 105 de forma manual. De manera alternativa, igual que los estranguladores 110, 120, las distintas válvulas de distribución 101, 102, 104, 105 se pueden operar de forma automática.

[0071] Al mismo tiempo, ambos estranguladores 110a-b pueden dirigir de forma selectiva el flujo a través de sus respectivos caudalímetros 150a-b. Por ejemplo, el primer caudalímetro 150a puede tener una primera capacidad de caudal, mientras que el segundo caudalímetro 150b puede tener una segunda capacidad de caudal, distinta o similar a la primera capacidad de caudal. Mediante la apertura del primer estrangulador 110a y el cierre del segundo estrangulador 110b, se puede configurar el caudal a través del múltiple 100 para la primera capacidad de caudal.

Mediante la apertura del segundo estrangulador 110b y el cierre del primer estrangulador 110a, se puede configurar el caudal a través del múltiple 100 para la segunda capacidad de caudal. Finalmente, mediante la apertura de ambos estranguladores 100a-b, el caudal a través del múltiple 100 se puede configurar para al menos, la mayor capacidad de caudal.

[0072] En una configuración, cada uno de los caudalímetros 150a-b en el múltiple 100 puede ser de tamaño reducido en comparación con un sistema equivalente que implemente sólo un caudalímetro. Los caudalímetros 150a-b más pequeños pueden obtener inherentemente mediciones de caudal más precisas a bajas velocidades de caudal, en comparación con un único caudalímetro más grande. En esta configuración, la utilización de caudalímetros 150a-b más pequeños y de tubería más pequeña que conduzca a ellos en el múltiple 100 puede dar lugar a un efecto de enderezamiento del tubo en el caudal de fluido. El caudal que se mueve a través de un tubo de diámetro más pequeño, puede ser enderezado y condicionado para la entrada al caudalímetro 150a-b dentro de una distancia más corta de longitud de tubería. Lo anterior puede proporcionar un beneficio adicional que reduce la geometría del múltiple 100.

[0073] En cualquier de los arreglos para el múltiple 100 de la Figura 3, el caudal de los caudalímetros 150a-b puede pasar a través de estranguladores secundarios 120a-b, antes de reunirse nuevamente a través de válvulas de distribución 102a-b en la salida del múltiple 100 y continuar hacia los tamices vibratorios (30) u otros componentes del sistema de perforación. Estos estranguladores secundarios 120a-b pueden no ser estrictamente operables para controlar la contrapresión del caudal de fluido de perforación para efectuar operaciones de control de pozo, aunque estos al menos pueden ser operables

para realizar esto al menos hasta cierto grado. Por el contrario, estos estranguladores secundarios 120a-b pueden ser operables para controlar la presión corriente arriba dentro de sus respectivos caudalímetros 150a-b, lo cual puede tener un número de diferentes usos, tal como se divulga en el presente.

[0074] Tal como se muestra en la Figura 4, el arreglo de dos estranguladores principales 110a-b y de dos caudalímetros 150a-b de la Figura 3, se muestra expandida para incluir un tercer tramo paralelo con un estrangulador principal 110c y un caudalímetro 150c. Este tercer tramo proporciona una tercera ruta para controlar contrapresión, empleando el estrangulador 110c y para medir el caudal, utilizando una tercera capacidad de caudal del tercer caudalímetro 150c. Igualmente, este tercer tramo puede tener un estrangulador secundario 120c para controlar la presión en el tercer caudalímetro 150c.

[0075] En un arreglo, cada uno de los caudalímetros 150a-c del múltiple 100 en la Figura 4 puede tener la misma capacidad de caudal y los tramos se pueden emplear como múltiples rutas, independientes, para el caudal del fluido. En este caso, el múltiple 100 incluye un tramo primario que tiene un estrangulador 110a corriente arriba, un caudalímetro 150a y un estrangulador 120a corriente abajo conectado directamente en serie. Puede surgir la necesidad de tener que aislar este tramo primario, como por ejemplo el taponamiento súbito del caudalímetro 150a o uno de los estranguladores 110a, 120a; la necesidad de dar mantenimiento o reparar el caudalímetro 150a o los estranguladores 110a, 120a; o debido a alguna otra razón.

[0076] Cuando surge dicha necesidad o razón, se puede aislar el tramo primario con válvulas de distribución 101a, 102a conectadas externamente. El caudal puede ser vuelto a

direccionar a través del segundo y/o tercer tramos conectados en paralelo. El aislamiento de la totalidad del tramo de control se logra más rápidamente con el cierre de dos válvula externas, en lugar del cierre de las distintas válvulas internas que un sistema MPD típico puede utilizar. Como se puede apreciar, el uso de múltiples caudalímetros 150a-c puede aumentar la fiabilidad del múltiple 100 al implementar tramos redundantes de caudalímetros en paralelo. Si uno de los caudalímetros 150a-c es taponado por desechos, el caudal puede pasar a través del otro(s) caudalímetros 150a-c abiertos.

[0077] En otro arreglo, dos o más caudalímetros 150a-b y/o estranguladores 110a-b pueden ser dispuestos para que un caudalímetro 150 y/o estrangulador 110 sea el sistema primario o ruta del caudal. Si es necesario dar mantenimiento al sistema primario, un segundo conjunto de caudalímetro 150 y/o estrangulador de caudalímetro (110, 150) se puede utilizar, sin tener que detener la operación de perforación. Adicionalmente, si existen tramos primarios, secundarios y terciarios, y es posible darles un tamaño adecuado a los tramos primarios y secundarios para las operaciones normales de perforación, el tramo terciario entonces podría ser únicamente utilizado como un sistema de respaldo. Si es necesario aislar y extraer al caudalímetro 150a-b primario o secundario para mantenimiento, se puede activar el tramo terciario sin tener que interrumpir la operación de perforación.

[0078] Como alternativa a tener caudalímetros 150a-c de la misma capacidad de caudal, uno o más de los tres caudalímetros 150a-c pueden tener diferentes capacidades de caudal, permitiendo una distribución selectiva del caudal de fluido con base en las capacidades descritas en el presente. Por ejemplo, dos de los caudalímetros 150a-b pueden tener

capacidades convencionales de caudal de varios miles de galones por minuto (por ejemplo, 3000 GPM) con una precisión adecuada y un bajo error de medición en las velocidades de caudal superiores. Sin embargo, el tercer caudalímetro 150c podría estar clasificado para que tenga un mejor medición a velocidades de caudal significativamente inferiores (por ejemplo, menos de 100 GPM, de 20 a 50 GPM, etc.).

[0079] Con este arreglo, los dos caudalímetros 150a-b principales se pueden utilizar para la mayoría de operaciones del múltiple 100, tales como las operaciones de perforación con presión gestionada. Sin embargo cuando ocurran momentos de bajo caudal durante las operaciones, el múltiple 100 puede cambiar su uso exclusivamente al tercer y más pequeño caudalímetro 150c, para que aun así se puedan obtener mediciones precisas con un margen de error más pequeño durante las operaciones. Como ejemplo, el bajo caudal puede ocurrir durante las conexiones de tuberías, velocidades reducidas de bombas, viajes de ida y de vuelta, perforación adelante, u otras operaciones que pueden tener un caudal reducido. En estas situaciones, el tercer caudalímetro 150c puede ser operado sólo, en lugar de los caudalímetros 150a-b más grandes. Esto puede permitir que se monitoreen distintos parámetros y condiciones de caudal durante estas operaciones en formas que no serían posibles con un múltiple convencional que tenga un caudalímetro de un solo tamaño con sus mayores errores de medición a bajas velocidades de caudal.

[0080] En particular la precisión en la medición de un caudalímetro 150a-c dado, puede ser bastante confiable para la mayoría del rango de caudales en los cuales se va a utilizar. En los niveles inferiores del rango de caudales, el error de medición del caudalímetro usualmente se incrementa de forma

significativa. Lo anterior hace que un caudalímetro 150a-c dado sea menos adecuado para ser utilizado en la medición a niveles bajos de su rango de caudales, dado que el margen de error se hace demasiado grande. Como se entenderá, la precisión en la medición puede depender del tipo de fluido, las condiciones del caudal, temperaturas, etc. Sin embargo, en términos generales, la precisión de la medición de un caudalímetro 150a-c dado puede ser bastante confiable para la mayoría (por ejemplo, aproximadamente el 95%) del rango de caudales y el margen de error puede aumentar significativamente en los niveles inferiores (por ejemplo, en aproximadamente 5%) del rango de caudales.

[0081] En casos de bajo caudal, el controlador del múltiple (50) preferiblemente conmuta para usar el tercer caudalímetro 150c, exclusivamente cuando se espera un umbral de bajo caudal o cuando este ocurra durante las operaciones. El sistema de control 100 puede conmutar cuando se espera que la velocidad del caudal caiga por debajo de un umbral, dentro de un intervalo de tiempo esperado, después de la ocurrencia de algunas operaciones, tales como la caída de una velocidad conocida de bombeo dentro del sistema 10. Por consiguiente, la conmutación se puede controlar de manera proactiva por el controlador del múltiple (50), con base en las operaciones actuales. Adicionalmente, la conmutación puede basarse en condiciones actualmente monitoreadas y puede utilizar la retroalimentación del único caudalímetro o de los múltiples caudalímetros 150a-c actualmente empleados, para determinar si se ha llegado a un umbral dado que amerite cambiar a uno o más de los caudalímetros 150a-c.

[0082] Al conmutar al tercer caudalímetro 150c, por ejemplo, el controlador del múltiple (50) puede monitorear las bajas

velocidades de caudal durante ciertas operaciones y puede controlar las operaciones de una manera más continua y en formas que actualmente no están disponibles. Por ejemplo el caudal de salida del agujero de pozo puede ser monitoreado durante las conexiones de tuberías a medida que la tasa de caudal baja pasa exclusivamente a través del tercer caudalímetro 150c. En los actuales arreglos, no se podrían obtener dichas mediciones o estas contendrán un alto grado de incertidumbre.

[0083] Adicionalmente, los actuales arreglos pueden fiarse completamente en el uso de una bomba auxiliar (36; Fig. 1) como una forma de proporcionar el caudal máximo a través de un único caudalímetro (24; Fig. 1). Por ejemplo, la bomba auxiliar (36) puede mantener un caudal mínimo de 100-GPM a través de un único y convencional caudalímetro (24) para que este pueda continuar obteniendo mediciones. El presente arreglo al utilizar el tercer caudalímetro 150c exclusivamente para bajas velocidades de caudal, sin embargo, se fia menos en el uso de dicha bomba auxiliar (36; Fig. 2) del sistema divulgado (10) y sufre menos por las complicaciones que puede ocasionar la utilización de la bomba auxiliar (36) durante las operaciones y mediciones.

[0084] Como una alternativa a dos capacidades comunes y una tercera capacidad diferente, los múltiples caudalímetros 150a-c del múltiple 100 en la Fig. 4 puede cada uno tener una capacidad diferente y puede ser utilizado uno a la vez, mientras miden las variantes velocidades de caudal del fluido. El caudalímetro más pequeño (por ejemplo, 150c) puede medir el umbral más pequeño, el caudalímetro más grande (por ejemplo, 150a) puede medir el umbral más grande de caudal y cualquier caudalímetro intermedio (por ejemplo 150b) puede medir los umbrales intermedios. Nuevamente, un sistema de válvulas, 101,

102, 110, etc. pueden dirigir el caudal a través de cada uno de los caudalímetros 150a-c con un circuito cerrado de retroalimentación.

[0085] Se muestra otro múltiple 100 en la Figura 5 que incluye cuatro tramos de estranguladores principales 110a-d y caudalímetros 150a-d. Estos cuatro tramos proporcionan cuatro rutas para controlar contrapresión con los estranguladores 110a-d y para medir el caudal con cuatro capacidades de caudal de los cuatro caudalímetros 150a-d. Nuevamente, aunque no se muestra en este ejemplo particular, cada uno de estos tramos puede tener un estrangulador secundario (120) para controlar la presión en el respectivo caudalímetro 150a-d. De manera alternativa a la que se ilustra en el presente, se puede posicionar un solo estrangulador secundario (120) sobre la salida común de los cuatro tramos para controlar la presión en todos los caudalímetros 150a-d a través del cual pasa el caudal.

[0086] Tal como ya se mencionó anteriormente, las capacidades de caudal de los distintos caudalímetros 150a-d en el múltiple 100 pueden ser similares o distintas entre ellos. De hecho, los caudalímetros 150a-d se ilustran en la configuración de la Figura 5, como un ejemplo en el cual se tienen distintas capacidades.

[0087] En arreglos anteriores, cada tramo de los caudalímetros 150 en paralelo había incluido un respectivo estrangulador 110 corriente arriba. Lo anterior no es estrictamente necesario. En su lugar, se puede implementar un sistema externo de válvulas 101, 102, 104, 105, etc. para aislar/seleccionar las distintas rutas de flujo para los caudalímetros 150, después de uno o más estranguladores 110

compartidos. Tal como se muestra en el múltiple 100 de la Figura 6, por ejemplo, uno o más estranguladores 110a-b compartidos pueden recibir el caudal de fluido de perforación del RCD 12 y se puede disponer a boca de pozo de los caudalímetros 150a-d en paralelo. Los estranguladores 110a-d controlan la contrapresión del caudal del fluido de perforación de manera similar a un múltiple de estrangulamiento convencional. La implementación de un o más estranguladores 110a-d compartidos, colocados corriente arriba de una pila de varios caudalímetros 150a-d en paralelo, puede optimizar el direccionamiento del caudal y puede ser integrado de una forma más fácil con los controles de estrangulamiento MPD de un sistema de control MPD (40).

[0088] Para distribuir de manera selectiva el caudal de fluido de perforación a uno o más caudalímetros 150a-d en paralelo, el arreglo tiene tramos con válvulas 104 para cada uno de los respectivos caudalímetros 150a-d. Aunque es preferible que sean controlables, estas válvulas 104 no necesariamente podrían operar como estranguladores de caudal y pueden ser operadas en estados primarios de abierto o cerrado, para permitir o rechazar el paso del fluido a través del respectivo caudalímetro 150a-d. De igual forma, se pueden abrir/cerrar válvulas secundarias 105 para prevenir el contraflujo proveniente de otro tramo. Estas válvulas secundarias 105 pueden ser estranguladores para controlar la presión en el respectivo caudalímetro 150a-d, en caso que se desee esta forma de control o se puede proporcionar un estrangulador 120 común corriente abajo, tal como se ilustra en la salida del múltiple 100. Las distintas válvulas 104, 105 pueden ser válvulas controlables dirigidas por el controlador 50.

[0089] Los arreglos de distribución de estranguladores 110, caudalímetros 150, estranguladores corriente abajo 120, válvulas 104 o 105, etc. divulgadas anteriormente con referencia a las Figuras 2 a 6, representan algunas de las distintas configuraciones para el múltiple 100 divulgado. Con base en las enseñanzas de la presente divulgación, se apreciará que se pueden utilizar estos y otros arreglos, incluyendo más o menos tramos de estranguladores 110/120; caudalímetros 150; válvulas 101, 102, 104, 105, 120; tamaños, capacidades de caudal, etc.

C. Controlador

[0090] En cada uno de estos arreglos de distribución, el controlador de múltiple (50; Fig. 2) controla el múltiple 100 de estranguladores principales 110, caudalímetros 150, estranguladores secundarios 120, válvulas, etc. utilizando un circuito cerrado de retroalimentación, con base en la velocidad de caudal másico y la presión. Por ejemplo, la Figura 7 ilustra esquemáticamente un controlador de múltiple 50 para el múltiple 100. Tal como se muestra, el controlador de múltiple 50 puede ser parte de, estar integrado con o interactuar con el sistema de control MPD 40 para las operaciones de perforación. El controlador 50 incluye una unidad de procesamiento 52, la cual puede ser parte de un sistema de computador, un servidor, un controlador lógico programable, etc. Mediante la utilización de interfaces de entrada/salida 56, la unidad de procesamiento 52 se puede comunicar con los estranguladores 110, 120; válvulas 101, 102, 104, 105; sensores (no mostrados); caudalímetros 150; y otros componentes del múltiple y del sistema para obtener y enviar señales de comunicación, sensor, actuadores y control para los distintos componentes, según sea el caso. En términos de los controles actuales mencionados,

las señales pueden incluir, pero sin limitación, señales de posición del estrangulador, señales de presión, señales de caudal, señales de temperatura, señales de densidad de fluido, etc.

[0091] La unidad de procesamiento 52 también se acopla de forma comunicativa con una base de datos o almacenamiento 54 que tiene puntos de ajuste 55a, tablas de búsqueda 55b y otra información almacenada. Las tablas de búsqueda 55b pueden caracterizar las especificaciones de los estranguladores 110, 120 y el carácter del caudal para los caudalímetros 150 y el múltiple 100. Esta información puede definir las capacidades de caudal, límites de presión, errores de medición, etc. de los caudalímetros 150 del múltiple y puede definir el coeficiente de caudal, el índice de cavitación y otra información de las válvulas y los estranguladores 110, 120 del múltiple. Aunque es posible emplear tablas de búsqueda 55b, se podrá apreciar que es posible utilizar cualquier otra forma de curva, función, conjunto de datos, etc., para almacenar la información. Adicionalmente, se pueden almacenar múltiples tablas de búsqueda 55b o similares y se pueden caracterizar con base en los distintos estranguladores, los diferentes fluidos de perforación, las distintas condiciones de operación y otros escenarios y arreglos.

[0092] La unidad de procesamiento 52 opera un control de estrangulador 60 para operaciones MPD. Adicionalmente, la unidad de procesamiento puede operar uno o más de un control de distribución 70, un control de redundancia 80 y un control de cavitación 90, dependiendo de la configuración del múltiple 100 de acuerdo con la presente divulgación.

[0093] El control del estrangulador 60 se utiliza para controlar los estranguladores principales 110 del múltiple 100 para cambiar la contrapresión superficial, corriente arriba del múltiple 100. La información principal del control de estrangulador 60 se emplea en las operaciones MPD y no se trata en el presente, aunque ya se ha mencionado alguna información pertinente. En general, por ejemplo, el control de estrangulador 60 puede mantener presiones dentro de los límites operativos durante las operaciones MPD, modificar la contrapresión en respuesta a amagos de reventón, realizar acciones de control de pozos, etc., en conjunción con el sistema de control MPD 40, diferentes mediciones, algoritmos y similares. Como tal, el control de estrangulación 60 transmite señales o uno o más de los estranguladores principales 110 del múltiple 100, utilizando cualquier comunicación adecuada para controlar su operación. En general, las señales son indicativas de una posición del estrangulador o ajuste de posición a ser aplicado a los estranguladores 110. Usualmente, los estranguladores principales 110 son controlados mediante potencia hidráulica de forma tal que las señales electrónicas transmitidas por la unidad de procesamiento 52 puedan operar solenoides, válvulas o similares de un unidad de potencia hidráulica para operar los estranguladores 110.

[0094] Tal como se menciona en el presente, se pueden utilizar dos o más estranguladores principales 110a-b en el múltiple 100. Las mismas señales de control de estrangulador pueden aplicar ajustes a cada uno de los estranguladores 110a-b, durante algunas formas de operación, o se pueden utilizar señales de control de estrangulador independientes para cada uno de los estranguladores principales 110a-b durante otras formas de operación. De hecho, los estranguladores principales

110a-b pueden tener diferencias que pueden explicar las diferentes señales de control de estrangulador utilizadas.

[0095] Además del control de estrangulador 60, la unidad de procesamiento 52 puede operar el control de distribución selectiva 70 para controlar los estranguladores principales 110; los estranguladores secundarios 120; y/u otras válvulas 101, 102, 104, 105 para seleccionar a cuál de los múltiples caudalímetros 150 distribuir el caudal para su medición. Este control de distribución selectiva 70 puede minimizar los errores de medición asociados con múltiples caudalímetros 150. Como se menciona en mayor detalle en la presente, el control de distribución selectivo 70 puede operar con el control de estrangulador 60 y los estranguladores principales 100, no sólo para distribuir el caudal a los caudalímetros 150, sino también para controlar la contrapresión para el sistema de control MPD 40. Además de lo que ha se mencionado con relación a las Figuras 2 a 6, se proporcionan detalles del control de distribución selectivo 70 en relación con la Figura 8.

[0096] Si el múltiple 100 tiene arreglos redundantes de caudalímetros 150 en serie, tal como se menciona más adelante con respecto a las Figuras 9A-9B, la unidad de procesamiento 52 puede operar el control de redundancia 80 para controlar y medir los caudalímetros 150 redundantes en serie. Se proporcionan detalles del control de redundancia 80 a continuación con relación a las Figura 9A-9B.

[0097] Si el múltiple 100 tiene estranguladores secundarios 120 corriente abajo de los caudalímetros 150, la unidad de procesamiento 52 puede operar el control de cavitación 90 para controlar los estranguladores secundarios 120, con el fin de reducir la burbujas de cavitación que se formen en los

caudalímetros 150 seleccionados. Además de lo que ya se ha mencionado, se proporcionan detalles del control de cavitación 90 y del uso de los estranguladores secundarios 120 a continuación con relación a las Figuras 10-11.

D. Control de Distribución Selectivo

[0098] La Figura 8 ilustra un control de distribución selectivo 200 del controlador del múltiple (50; Fig. 7) en forma de diagrama de flujo. En la explicación a continuación, se hace referencia de forma simultánea a los elementos de las Figuras 2 a 7. Tal como se menciona en el presente, las válvulas 101, 102, 104, 105 y/o los estranguladores principales 110 del arreglo de distribución para el múltiple 100, pueden dirigir el caudal al caudalímetro 150 de tamaño adecuado o al conjunto de caudalímetros 150 para gestionar de una mejor manera, las capacidades de caudal y presión y para minimizar el error esperado en la medición del caudal respecto a una velocidad de caudal dada.

[0099] Para realizar lo anterior, la unidad de procesamiento 52 obtiene, al menos de forma periódica, las velocidades de caudal del caudal de fluido de perforación del agujero de pozo 16 (Bloque 210). Las velocidades de caudal pueden provenir de lecturas actuales y anteriores de velocidades de caudal de uno o más caudalímetros 150 que se encuentren actualmente en operación. De esta forma, la unidad de procesamiento 52 puede obtener, al menos de forma periódica, las velocidades del caudal de fluido de perforación del agujero de pozo 16, mediante la recepción de la retroalimentación de las lecturas de uno o más caudalímetros 150 actualmente en utilización. De forma alternativa, las lecturas de las velocidades de caudal

pueden provenir de otras fuentes, tales como un caudalímetro multifase 28 o similar dentro del sistema de perforación 10.

[00100] Mediante el uso de las velocidades de caudal obtenidas, la unidad de procesamiento 52 controla la presión corriente arriba del caudal del fluido de perforación con base en los controles deseados de estrangulación y de pozo, para gestionar la presión durante la perforación y con base, al menos parcialmente, en las lecturas de uno o más caudalímetros 150 (Bloque 212). Estas operaciones pueden utilizar los controles de estrangulador 60 para crear contrapresión en el fluido de perforación para gestionar la presión durante la perforación y manejar los eventos de control de pozo de acuerdo con el sistema de control MPD 40. Los detalles de estas operaciones fueron tratados anteriormente y no se repiten en este aparte. En general, sin embargo, estos controles de estrangulador 60 operan el único o los distintos estrangulador(es) principales 110 en el múltiple 100 y están dictaminados por las necesidades de la gestión del pozo, la contrapresión superficial deseada, los controles a los amagos de reventón, los controles de pérdida, etc. asociados con la perforación con presión gestionada que se realiza.

[00101] Al mismo tiempo o al menos de forma periódica, la unidad de procesamiento 52 también compara las velocidades de caudal con los parámetros operativos relacionados, al menos con los caudalímetros 150 y opcionalmente con los estranguladores principales 110 u otras válvulas del múltiple 100 (Bloque 220). Esto se efectúa para determinar si los actuales caudalímetros 150 que se utilizan para monitorear el caudal son más adecuados para la actual velocidad de caudal, presión de caudal, etc. Los parámetros operativos para esta comparación pueden incluir las capacidades de caudal (222),

las capacidades de presión (224) y los errores en las mediciones (226) asociadas con cada uno de los caudalímetros 150.

[00102] De esta forma, en la determinación de cuál del único o de los distintos caudalímetros 150 seleccionar para distribución, puede emplear la presión y velocidad de caudal obtenidas en comparación con las capacidades de presión y caudal para cada uno de los caudalímetros 150. Estas capacidades (222, 224) a su vez, están directamente asociadas con errores conocidos en las mediciones (226) para los caudalímetros 150. La correlación de estos parámetros puede ser empleada para seleccionar cuál de los caudalímetros 150 es el más adecuado para las actuales condiciones de caudal.

[00103] Como una alternativa, entradas proactivas del sistema de control MPD 40 o de otras partes, pueden dictar cuál de los caudalímetros 150 seleccionar. Dichas entradas proactivas pueden estar basadas en las condiciones esperadas o en las operaciones actuales.

[00104] Finalmente, la distribución de forma selectiva del caudal del fluido de perforación a través de uno o más caudalímetros 150 busca minimizar los errores en las mediciones (226) en general, respecto a las lecturas obtenidas del único o de los distintos caudalímetros 150 seleccionados. En una consideración particular para lograr lo anterior, la unidad de procesamiento 52 puede comparar las velocidades de caudal obtenidas con los errores de medición asociados con cada uno de los caudalímetros 150 y seleccionar la combinación de dichos caudalímetros 150 que minimicen el error general.

[00105] Con base en las comparaciones mencionadas anteriormente, la unidad de procesamiento 52 determina cuál del único o de los distintos caudalímetros 150 seleccionar como ruta de flujo para la distribución del caudal (Bloque 230) y la unidad de procesamiento 52 posteriormente distribuye de forma selectiva el caudal del fluido de perforación a través de uno o más de los caudalímetros 150 según hayan sido seleccionados (Bloque 232). Dependiendo del arreglo de distribución del múltiple 100, la selección de la distribución del caudal puede involucrar el accionamiento de una válvula (101, 102, 104 y 105) y/o accionamiento de un estrangulador (110) para dirigir el caudal de fluido de perforación a través de un caudalímetro 150 seleccionado.

[00106] Por ejemplo, en el arreglo de distribución de las Figuras 3 a 5, el seleccionar distribuir el caudal a través de un caudalímetro 150 dado, puede involucrar el accionar un estrangulador 110 correspondiente al caudalímetro 150 dado, si las válvulas 101, 102 del tramo se encuentran abiertas. De manera alternativa, si las válvulas 101, 102 son accionables en el arreglo de distribución de las Figura 3 a 5, el seleccionar distribuir el caudal a través de un caudalímetro 150 dado puede involucrar el accionamiento de las válvulas 101, 102 del tramo. Como otro ejemplo, en el arreglo de distribución de la Figura 6, el seleccionar distribuir el caudal a través de un caudalímetro 150 dado puede involucrar el accionamiento de las respectivas válvulas 104, 105 del tramo, dado que la operación del caudalímetro 150 es independiente de la operación de los estranguladores 110 compartidos.

[00107] Debido a que la utilización de el(los) estrangulador(es) 110 para controlar la presión, tiene un efecto directo sobre las presiones y velocidades de caudal a

través de los caudalímetros 150 y en alguno arreglos, puede inclusive dictar cuál caudalímetro 150 recibe el caudal, el proceso de seleccionar la ruta de caudal a través del cual pasa el caudal al caudalímetro 150, con base en las velocidades de caudal (Bloque 230), se puede realizar en conjunción con el proceso de controlar la presión corriente arriba con los estranguladores 110 (Bloque 212).

De manera alternativa, es posible utilizar un arreglo en serie del proceso 200, en el cual la presión corriente arriba se controla con los estranguladores 110 (Bloque 212) y posteriormente se seleccionan las rutas de flujo (Bloque 230) o en el cual las rutas de flujo son seleccionadas (Bloque 230) y posteriormente la presión corriente arriba se controla con los estranguladores 110 (Bloque 212).

[00108] En este sentido, mediante la operación de la única o de las distintas válvulas y/o estranguladores (101, 102, 104, 105, 110), la unidad de procesamiento 52 puede controlar la presión corriente arriba en el caudal del fluido de perforación (Bloque 212) de forma simultánea con la distribución selectiva del caudal de fluido de perforación a través de uno o más de la pluralidad de caudalímetros 150 (Bloque 230). De manera alternativa, mediante la operación de una o más válvulas y/o estranguladores (101, 102, 104, 105, 110), la unidad de procesamiento 52 puede controlar la presión corriente arriba en el caudal del fluido de perforación (Bloque 212) de manera independiente a la distribución selectiva a través de uno o más de la pluralidad de caudalímetros 150 (Bloque 230).

[00109] A manera de ejemplo, mediante la utilización de las velocidades de caudal obtenidas en comparación con las capacidades de caudal para cada uno de los caudalímetros 150,

la unidad de procesamiento 52 puede determinar cuando la velocidad de caudal llega a cierto umbral según los actuales controles de estrangulación. En dicho punto, la unidad de procesamiento 52 puede accionar otra válvula (101, 102, 104 y 105) o estrangulador (110) en el arreglo de distribución para abrir y permitir que el caudal se ramifique y entre a otro caudalímetro 150 para permitir que pase la mayor velocidad de caudal. Esto puede dictar la realización de algún ajuste de los controles del estrangulador 60 para los estranguladores operativos 110.

[00110] Con el caudal distribuido según selección, el proceso 200 hace retroalimentación para obtener nuevas velocidades de caudal (Bloque 210) tanto para controlar la presión corriente arriba para los controles del estrangulador 60 (Bloque 212) como para comparar las velocidades de caudal y seleccionar las rutas de caudal (Bloques 220-2230).

[00111] A manera de ejemplo para distribuir el caudal del fluido de perforación, la unidad de procesamiento 52 puede distribuir el caudal de fluido a través de uno o más caudalímetros 150a con base en un primer nivel de las velocidades de caudal obtenidas y puede distribuir el caudal de fluido de perforación a través de un segundo del único o distintos caudalímetros 150b y no del primer caudalímetro 150a, con base en un segundo nivel de velocidades de caudal obtenidas. El primer caudalímetro 150a puede tener una primera capacidad de caudal, y el segundo caudalímetro 150b pueden tener una segunda capacidad de caudal, superior o inferior, a la primera capacidad de caudal.

[00112] Como otro ejemplo para distribuir el caudal del líquido de perforación, la unidad de procesamiento 52 puede distribuir

el caudal de fluido de perforación a través de un primero del único o de los distintos caudalímetros 150a, con base en un primer nivel de las velocidades de caudal obtenidas y puede distribuir el caudal de fluido de perforación a través del primer caudalímetro 150a y un segundo del único o de los varios caudalímetros 150b, con base en un segundo nivel de las velocidades de caudal obtenidas. El primer caudalímetro 150a puede tener una primera capacidad de caudal y el segundo caudalímetro 150b puede tener una segunda capacidad de caudal, la cual puede ser igual o distinta a la primera capacidad de caudal.

[00113] Como se apreciará con el beneficio de la presente divulgación, se puede expandir a otros ejemplos para distribuir el caudal de fluido de perforación cuando se emplean más de dos caudalímetros 150. Por consiguiente, se pueden expandir las selecciones mencionadas anteriormente con más caudalímetros 150 y capacidades adicionales de flujo. También es posible emplear las capacidades de presión y los errores en la medición para fines comparativos, según se divulga en el presente.

[00114] En resumen, lograr el direccionamiento del caudal para minimizar el error en la medición del caudal en tiempo real, depende de la relación de caudal total y precisión de la medición (error) comparada con el arreglo de caudalímetros 150 disponibles. Lo anterior se efectúa mediante la comparación de cuál es la capacidad de caudal necesaria, cuáles caudalímetros están siendo utilizados o están disponibles para uso, y cuál es la precisión en la medición (error) de los caudalímetros. Posteriormente la distribución a los caudalímetros se optimiza con base en las comparaciones, con el fin de minimizar el margen de error en la medición.

[00115] La realización del direccionamiento del caudal también está integrado al control de estrangulación MPD 60 y emplea la retroalimentación de presión. Lo anterior se efectúa mediante la comparación de cuál es la capacidad de caudal necesaria, cuáles caudalímetros están siendo utilizados o están disponibles para uso, y cuál es la contrapresión superficial necesaria para las operaciones. Posteriormente se optimiza la distribución de los caudalímetros 150, utilizando los estranguladores principales 110, con base en las comparaciones, para producir la contrapresión superficial deseada.

[00116] Para manejar las rutas de caudal después de distribuir el caudal a los caudalímetros 150 seleccionados (Bloque 232), la unidad de procesamiento 52 puede adicionalmente calcular u obtener las presiones del caudal de fluido de perforación en los caudalímetros 150 seleccionados (Bloque 240). Con base en lo anterior, la unidad de procesamiento 52 puede controlar las presiones en los caudalímetros 150 seleccionados, mediante la operación de estrangulador(es) secundarios 120 compartidos o en serie corriente abajo de los caudalímetros 150 (Bloque 242). Tal como se mencionó anteriormente, por ejemplo, se puede colocar un estrangulador 120 después de cada uno de los caudalímetros 150, conectado en paralelo para aumentar la presión dentro de cada caudalímetro 150 y reducir los efectos de la separación de gas en la precisión del caudalímetro. De manera alternativa, varios caudalímetros 150 pueden compartir en común un estrangulador 120 corriente abajo. Como se menciona en el presente, la operación del estrangulador 120 corriente abajo puede evitar que el fluido salga de la solución dentro de los caudalímetros 150, lo cual puede menoscabar sus capacidades de lectura. Detalles adicionales de este control se mencionan más adelante.

E. Tipos de Caudalímetros

[00117] Se pueden emplear diferentes tipos de caudalímetros 150 para el múltiple 100 y en la selección de los caudalímetros 150 de conformidad con los controles divulgados en la presente se pueden aprovechar los beneficios de los distintos tipos de caudalímetros 150 en el múltiple 100. Según se divulga en el presente, por ejemplo, el múltiple 100 puede usar uno o más caudalímetros de tipo Coriolis, los cuales pueden medir la velocidad del caudal másico de un medio que fluye a través de una tubería. El medio fluye a través de un tubo de caudal insertado en línea dentro de la tubería y se hace vibrar durante la operación, de forma tal que el medio es sujeto a fuerzas de Coriolis. Con base en estas fuerzas, las partes de entrada y salida del tubo de caudal tienden a vibrar fuera de fase con respecto a ellas y la magnitud de las diferencias de fase proporciona una medición para derivar la velocidad del caudal másico.

[00118] La utilización del caudalímetro de tipo Coriolis puede proporcionar varias ventajas. El caudalímetro de tipo Coriolis no está limitado para medir únicamente un tipo particular de fluido y el caudalímetro de tipo Coriolis puede medir lechadas de gas y líquidos sin cambios en las propiedades (temperatura, densidad, viscosidad y composición) que afecten al desempeño del medidor.

Adicionalmente, el caudalímetro de tipo Coriolis emplea tubos de caudal y no requiere la inserción de componentes mecánicos en las hostiles condiciones de flujo del fluido de perforación.

[00119] Para aplicaciones de alta presión, el múltiple 100 puede utilizar uno o más caudalímetros de turbina, en lugar de un caudalímetro de tipo Coriolis para efectuar las mediciones

deseadas. La precisión del caudalímetro de turbina en la medición del rango completo de las velocidades del caudal puede ser inferior a la del caudalímetro de tipo Coriolis. De hecho, la perforación con presión gestionada usualmente requiere de un alto nivel de precisión en las mediciones de caudal, por lo que el uso del caudalímetro de turbina podría no ser aceptable, al menos a ciertas velocidades de caudal. Sin embargo, el caudalímetro de turbina puede proporcionar lecturas aceptables a velocidades más altas de caudal no adecuadas para un caudalímetro de tipo Coriolis en el múltiple 100.

[00120] El múltiple 100 también puede emplear otros tipos de caudalímetros que tengan una capacidad de presión mayor al del caudalímetro de tipo Coriolis. Por ejemplo, el múltiple 100 puede utilizar uno o más caudalímetros de cono en V. Un caudalímetro de cono en V puede tener una capacidad de hasta 10.000 psi, mientras que los caudalímetros de tipo Coriolis que actualmente se utilizan pueden tener una capacidad de solo 1850 psi.

[00121] A manera de ejemplo, el múltiple 100 puede emplear un conjunto de caudalímetros de cono en V más pequeños en paralelo sobre el múltiple 100. Cada uno de los caudalímetros de cono en V se puede ajustar internamente para que tenga la mayor precisión para una velocidad de caudal dada. Por ejemplo, el múltiple 100 de la Figura 4 puede tener un conjunto de tres caudalímetros de cono en V 150a-c de 4 1/16-in. El primer caudalímetro de cono en V 150a puede estar diseñado internamente para medir de 50 a 200 GPM con la mayor precisión. El segundo caudalímetro de cono en V 150b puede manejar de 200 a 400 GPM, mientras que el tercer caudalímetro de cono en V 150c puede medir de 400 a 600 GPM.

[00122] Los tres caudalímetros de cono en V 150a-c pueden medir conjuntamente hasta 1200 GPM con una alta precisión de 50 a 1200 GPM. Los estranguladores de perforación 110a-c al frente de cada uno de los caudalímetros de cono en V 150a-c pueden permitir la regulación adecuada del caudal entre los caudalímetros de cono en V 150a-c, al tiempo que también controlan la presión del agujero de pozo.

[00123] El múltiple 100 también puede utilizar distintos estilos de caudalímetros tipo Coriolis. Por ejemplo, el múltiple 100 puede utilizar uno o más caudalímetros tipo Coriolis de tubo recto con capacidad de alta presión, en lugar del caudalímetro tipo Coriolis convencional de tubo curvo. El caudalímetro tipo Coriolis con estilo de tubo recto, tiende a ser menos preciso a menores velocidades de caudal que los caudalímetros tipo Coriolis con un tubo grande curvo. Sin embargo, es posible utilizar un caudalímetro tipo Coriolis de tubo recto en una distribución con un caudalímetro tipo Coriolis de tubo curvo. Adicionalmente, se puede utilizar una combinación de caudalímetros tipo Coriolis de tubo recto pequeños dentro del arreglo y pueden igualar la precisión de un caudalímetro tipo Coriolis de tubo curvo, al tiempo que aumentan la capacidad de presión para igualar el resto del múltiple 100.

[00124] Finalmente, los distintos caudalímetros 150 y/o estranguladores 110, 120 para el múltiple 100 pueden estar embalados en contenedores o bastidores individuales. El sistema de aislamiento positivo, usualmente válvulas de bola o compuerta, para el múltiple 100 puede ser embalado de forma externa a estos contenedores o bastidores. De esta forma se puede reducir el espacio ocupado por el múltiple MPD 100, haciendo que el múltiple 100 sea más fácil de colocar sobre el

piso del taladro de perforación. Un sistema de tarimas modulares, como la que se muestra y describe (por ejemplo, una tarima de aislamiento positivo y tarimas de estrangulamiento y medición de caudal como los mismos o distintos caudalímetros 150) permitirían una eficiencia relativa en la fabricación, despliegue y mantenimiento cuando se ofrece control MPD personalizado para un taladro particular y/o plan de perforación.

F. Caudalímetros Redundantes

[00125] En otros arreglos, los múltiples de estrangulación 100 de la presente divulgación pueden tener caudalímetros redundantes dispuestos en serie, y el controlador (50) puede emplear el control de redundancia (80) para monitorear y dirigir el caudal. Por ejemplo, la Figura 9A ilustra un diagrama esquemático de un múltiple de estrangulación 100 que tiene caudalímetros 150, 160 redundantes, dispuestos en serie, corriente abajo de estrangulador(es) 110a-b compartidos. Los caudalímetros 150, 160 pueden ser iguales o distintos entre ellos y se pueden operar al mismo tiempo o en momentos diferentes entre ellos. De hecho, dependiendo de la tubería y las válvulas 101, 103 utilizadas y la forma en que están configuradas en un momento dado, el flujo puede pasar a los caudalímetros 150, 160 en serie o parcialmente en paralelo, según se desee.

[00126] A manera de ejemplo, estos caudalímetros 150, 160 pueden ser iguales y pueden operar de forma simultánea, con el fin de hacer mediciones redundantes del mismo caudal, aproximadamente al mismo tiempo. Lo anterior puede proporcionar verificación adicional de la precisión de las lecturas de los caudalímetros 150, 160. Si se obtienen lecturas comparables

con ambos caudalímetros 150, 160, el controlador del múltiple (50) puede determinar o que ambos están operando debidamente o que ambos están operando incorrectamente. Sin embargo, las posibilidades son que la primera opción sea cierta. Si los caudalímetros 150, 160 tienen lecturas que varían entre ellas en una medida estadísticamente significativa, el controlador del múltiple (50) puede determinar que uno de los caudalímetros 150, 160 está fallando. En este caso, se pueden emplear la tubería y las válvulas 101, 103 entre los dos caudalímetros 150, 160 para dirigir de forma selectiva, el caudal para su medición hacia sólo uno de los caudalímetros 150, 160, esencialmente aislando al otro.

[00127] La Figura 9B presenta un diagrama esquemático para otro múltiple 100 que tiene caudalímetros 150a-d, 160a-d redundantes para varios tramos paralelos. Por ejemplo, cada tramo representado puede tener dos caudalímetros 150a-d, 160a-d iguales, para operación simultánea y lecturas redundantes. Los diversos beneficios de dicho arreglo como el de la Figura 9B, coinciden con los beneficios anteriormente mencionados que se asocian con tramos paralelos y caudalímetros 150, 160 redundantes en un tramo.

[00128] Tal como se apreciará con el beneficio de la presente divulgación, cualquiera de las configuraciones de múltiples 100 divulgadas en el presente que tenga caudalímetros en paralelo se puede beneficiar del uso de caudalímetros 160 redundantes también. Por consiguiente no se describe en la presente cada una de las distintas configuraciones posibles para los múltiples 100, pero se podría configurar como se espera, con base en las enseñanzas que la presente divulgación ya ha suministrado.

G. Control de Cavitación

[00129] Tal como se mencionó anteriormente, se pueden disponer estranguladores 120, válvulas, orificios y similares corriente abajo de uno o más de los caudalímetro(s) 150 para controlar la presión dentro del caudalímetro(s) 150. Por ejemplo, cada tramo paralelo en la Figuras 3, 4, etc. puede tener un segundo estrangulador controlable 120. De manera alternativa, el conjunto de los distintos tramos de la Figura 6, puede tener un estrangulador 120 controlable secundario. De hecho, un múltiple de estrangulación 100 que tenga un solo caudalímetro, puede tener un estrangulador 120 controlable, tal como se muestra en la Figura 10, corriente abajo del caudalímetro 150.

[00130] Para cada uno de estos arreglos de estrangulador(es) controlables 120, el controlador del múltiple (50) para el múltiple 100 puede operar el único o los distintos estrangulador(es) controlables 120 empleando el control de cavitación (90) descrito de forma sucinta anteriormente. A su vez, el(los) estrangulador(es) controlados 120 pueden ayudar a mitigar problemas relacionados con gasificación, cavitación, vaporización instantánea, escape de gases, etc. que pueden reducir la precisión de las mediciones del caudalímetro.

[00131] Tal como se menciona anteriormente en la Figura 7, el control de cavitación 90 puede controlar la única o las distintas válvula(s) o estranguladores automatizados 120 corriente abajo de el(los) caudalímetro(s) 150 en el múltiple 100. Se proporcionan detalles del proceso de control de cavitación 300 en el diagrama de flujo de la Figura 11. Para fines de la descripción, se hace referencia al múltiple 100 de la Figura 10 que tiene un caudalímetro 150 y estrangulador secundario 120. Igualmente, se podrá apreciar que el control

de cavitación 90 divulgado en la presente puede ser igualmente aplicado y expandido para controlar la cavitación asociada con múltiples caudalímetros 150 y estranguladores 120 en tramos paralelos o con (múltiples) caudalímetros 150, 160 y estranguladores 110, 150, en serie, al igual que en otras realizaciones divulgadas en la presente.

[00132] El proceso de cavitación de control 300 de la Figura 11 obtiene parámetros relacionados con la presión, velocidades de caudal, operación del caudalímetro, posiciones del estrangulador, etc. (Bloque 302). Empleando dos técnicas, el proceso 300 puede fiarse en la retroalimentación de las mediciones de presión tomadas antes y después del estrangulador de perforación 110 corriente arriba (Bloque 304) y/o puede fiarse en las señales de retroalimentación relacionadas con el caudalímetro 150 (Bloque 306).

[00133] En la primera técnica, se pueden aplicar las mediciones de presión corriente arriba y corriente abajo (Bloque 304) tomadas a ambos lados del estrangulador de perforación 110 corriente arriba, a la fórmula del índice de cavitación σ (Bloque 310). Tal como se mencionó anteriormente, el índice de cavitación σ es una relación adimensional, la cual relaciona la presión corriente arriba, la presión corriente abajo, y la presión de vapor para una temperatura dada, para caracterizar cuándo es probable que ocurran la cavitación y el escape de gas.

[00134] En el proceso 300, se puede comparar el índice σ calculado frente a un valor esperado de cavitación del estrangulador 110 corriente arriba para una posición dada del estrangulador 110 dentro del controlador del múltiple 50 (Decisión 312). Cuando el índice de cavitación σ se acerca al

valor esperado de cavitación (Sí en 312), el controlador 50 puede operar el estrangulador 120 corriente abajo, por ejemplo, cerrando parcialmente el estrangulador 120 de corriente abajo hasta una nueva posición calculada para reducir las probabilidades que la cavitación y el escape de gases afecten al respectivo caudalímetro 150 (Bloque 320).

[00135] Adicionalmente, mientras que el estrangulador 120 corriente abajo se cierra ligeramente a una nueva posición, el estrangulador 110 de corriente arriba puede tener que abrirse ligeramente para contrarrestar cualquier aumento concomitante en la presión corriente arriba y reducir la presión hasta el valor requerido por el sistema de control MPD (40) principal. Por consiguiente, el proceso de control de cavitación 300 que controla el estrangulador 120 de corriente abajo puede estar en comunicación con el sistema de control MPD (40) principal, tal como ya se ilustró en la Figura 7. Empleando esta comunicación, el proceso de control de cavitación 300 puede determinar si la presión corriente arriba ha aumentado, excediendo un límite aceptado debido al cierre del estrangulador 120 de corriente abajo (Decisión 322). De ser así, el estrangulador 110 de corriente arriba se abre una medida calculada hasta una nueva posición, para contrarrestar el incremento en la presión corriente arriba y reducir la presión hasta el valor requerido por el sistema de control MPD 40 principal (Bloque 324).

[00136] En una segunda técnica, el proceso de control de cavitación 300 puede fiarse en la obtención de parámetros (Bloque 302) en las señales provenientes del caudalímetro 150, distintos sensores de presión y un indicador de posición de estrangulador (Bloque 306) como retroalimentación, para impulsar el control para el estrangulador secundario 120

corriente abajo del caudalímetro 150. En particular, las señales del caudalímetro 150 son afectadas por la cantidad de gas en el fluido, y parte del escape de gas en el caudalímetro 150 puede ser ocasionado por la operación del estrangulador(es) principal 110 y/o puede ser ocasionada por evaporización instantánea u otro fenómeno.

[00137] Por supuesto, el gas en el caudalímetro 150 puede provenir del pozo (esto es de un amago de reventón de gas). En este caso, la forma en que se opera el estrangulador 110 corriente arriba y cualquier índice de cavitación relacionado con el estrangulador 110, podrían no tener un papel preponderante respecto a si el gas afectará el caudalímetro 150 o si el caudalímetro 150 puede hacer lecturas de forma precisa. En todo caso, la solución para mantener al caudalímetro 150 operando correctamente es la misma que se divulga en el presente y aún se realizan intentos de mantener suficiente presión para mantener un bajo volumen de gas a medida que este corre a través del caudalímetro 150.

[00138] La fórmula del índice de cavitación también es aplicable a problemas tales como cavitación, vaporización instantánea, amagos de reventón de gas, etc. que puedan ocurrir en estas circunstancias. A medida que el fluido con un alto contenido de gas entra al caudalímetro 150, las señales de salida del caudalímetro 150 varían. Pueden cambiar, principalmente, parámetros del caudalímetro tales como los voltajes de captación, ganancia de transmisión, para un caudalímetro de tipo Coriolis. Otros tipos de caudalímetro distintos a los caudalímetros tipo Coriolis pueden tener cambios comparables en los distintos parámetros, en respuesta a mayores concentraciones de gas dentro del caudal. Cuando una parte del gas dentro del fluido se incrementa por encima de

cierto umbral, los voltajes de captación y las mediciones de densidad disminuyen, mientras que aumentan la frecuencia de respuesta y la ganancia de transmisión.

[00139] Estos parámetros del caudalímetro se pueden emplear para ayudar a determinar cuándo hay gas presente en el caudalímetro 150. Más particularmente, estos parámetros del caudalímetro se pueden utilizar para cuantificar la calidad de las mediciones de densidad y caudal. Esta cantidad se puede controlar, dentro de las limitaciones de la relación entre la presión y la calidad de la medición, así como la presión de rotura del caudalímetro.

[00140] Finalmente, esta segunda técnica puede proporcionar detalles de la calidad del gas en el medio fluyente, más que la sola presencia de gas. Más específicamente, la segunda técnica puede cuantificar el estado de la mezcla, que es lo que efectivamente reduce la capacidad del caudalímetro para medir la densidad y el caudal. En definitiva, las señales de los parámetros del caudalímetro del caudalímetro 150 pueden mostrar cuando hay un alto porcentaje de gas mezclado con el fluido, aunque las señales solas podrían no ser suficientes para diferenciar entre el gas proveniente del pozo, el gas proveniente de la cavitación dentro de los estranguladores 110, o el gas producido por la vaporización instantánea, elevación, etc.

[00141] Por consiguiente, el proceso de control de cavitación 300 trata de determinar la fuente del gas que está presente en el fluido. Para hacer esto, el proceso compara los parámetros del caudalímetro (por ejemplos, voltajes de captación, ganancia de transmisión y frecuencia de respuesta) de el(los) caudalímetro(s) 150 con tablas empíricas u otra información

almacenada que correlaciona cómo se deberían comparar dichas señales con la posición dada del estrangulados y las mediciones de presión (Bloque 320). Esta información de correlación almacenada puede ser información recolectada empíricamente, obtenida a través de pruebas y modelamiento y se puede almacenar en tablas de búsqueda (55b) u otro formato en la base de datos del controlador (54; Fig. 7).

[00142] Con base en dicha comparación, el controlador 50 puede detectar cuál parte del escape de gas podría haber sido ocasionado por el(los) estrangulador(es) principal(es) 110 (Bloque 322). Por ejemplo, cuando las señales de gas de el(los) caudalímetro(s) 150 están de acuerdo con las cifras esperadas ocasionadas por el movimiento de el(los) estrangulador(es) principal(es) 110, el proceso de control de cavitación 300 puede diferenciar entre el primer gas que está saliendo del pozo y el segundo gas que proviene de la cavitación del estrangulador de el(los) estranguladores 110 corriente arriba.

[00143] Con base en el conocimiento de cuál parte del escape de gas ha sido ocasionado por el(los) estrangulador(es) principal(es) 110 o no, el proceso de control de cavitación 300 puede operar el estrangulador secundario (Bloque 320) de conformidad, determinar si la presión corriente arriba ha cambiado por encima de un umbral (Bloque 322), y operar el estrangulador 110 corriente arriba, en caso de ser necesario (Bloque 324).

[00144] Se puede utilizar cualquiera o ambas técnicas anteriores para controlar el(los) estrangulador(es) secundarios (es) 120 corriente abajo y para mantener la precisión de el(los) respectivo(s) caudalímetro(s) 150, mediante la reducción del error ocasionado por cavitación. Este

proceso de control de cavitación 300 se puede aplicar a un caudalímetro 150 de un múltiple 100 que tiene uno o más estrangulador(es) 110 corriente arriba y un estrangulador 120 corriente abajo (por ejemplo, Fig. 10) y de igual forma, se puede aplicar a los distintos arreglos del presente que tienen múltiples estranguladores 110/120 y caudalímetros 150/160 (por ejemplo, Figs. 3 a 6, 9A-9B).

[00145] La utilización de la relación de presión para determinar el índice de cavitación enunciado anteriormente presenta una determinación simplificada que se puede emplear usualmente. En general, es más fácil medir las presiones corriente arriba/corriente abajo y la fórmula para determinar el índice de cavitación que utiliza las presiones medidas, no necesita caracterizar detalles minuciosos de la válvula de estrangulamiento involucrada. En todo caso, es posible emplear cálculos más detallados, tales como los cálculos del índice de cavitación crítico, lo cual puede representar beneficios en la determinación del inicio de la cavitación y la evaporación súbita.

[00146] Tal como se ha mencionado anteriormente, la aplicación de contrapresión con el estrangulador secundario 120, tal como se divulga en el presente, puede reducir el escape de gas ocasionado por la evaporación súbita, además de la cavitación. Tal como se indicó anteriormente, la evaporación súbita se produce por la caída en la presión, debido a una restricción al flujo cuando la presión corriente abajo es inferior a la presión de vapor, $\sigma < 1$. La cavitación ocurre dentro de un rango por debajo de algún valor de cavitación crítica y $\sigma > 1$. Igualmente, tal como se ha indicado anteriormente, el índice de cavitación crítico puede capturar los efectos de los gradientes de presión y velocidad locales a través del

estrangulador principal 110, en lugar del índice de cavitación de entrada-salida simple. Por consiguiente, el proceso de control de cavitación 300 puede emplear estos factores del índice de cavitación crítico, presión de vapor, velocidad local, gradientes de presión y similares para determinar que contrapresión aplicar con el estranguladores secundarios 120 y reducir el escape de gas.

[00147] Por ejemplo, el proceso de control de cavitación 300 puede emplear los valores del fabricante del estrangulador para el índice de cavitación crítico, como un factor en los cálculos relacionados con la cavitación y escape de gas. Por ejemplo, el fabricante de una válvula podría asignar un índice cavitación crítica de 2 (medida de la relación de presión corriente arriba vs. corriente abajo) para su estrangulador. De forma alternativa, un fabricante podría asignar un índice de cavitación crítica de 3.5 para el cierre al 10% y puede variar el valor de 3.5 a 12, dependiendo de la posición de la válvula. El proceso de control de cavitación 300 puede utilizar estos valores proporcionados.

[00148] Preferiblemente, sin embargo, el proceso de control de cavitación 300 utilizas tablas de búsqueda (por ejemplo información graficada, trazada o tabulada) que mide el desempeño de un caudalímetro (en lo que respecta a cantidad y calidad del gas de cavitación en el medio fluyente) comparado con la posición de la válvula y las mediciones de presiones tomadas en el múltiple 100. Adicionalmente, es posible considerar más detalles de la geometría de la válvula de estrangulamiento y se pueden caracterizar los factores variables del índice de cavitación crítica, relacionados con la válvula de estrangulamiento con mayor particularidad en las tablas de búsqueda 55b para el desempeño del caudalímetro.

[00149] En la situación en la cual el gas que se separa, después de una caída de presión, no se vuelve a mezclar, el proceso de control de cavitación 300 puede estimar cuánto gas atrapado usualmente se sacaría de la solución (asumiendo que no ha habido un amago de reventón) para una caída de presión/posición del estrangulador dada. La estimación se puede obtener empleando la información en las tablas de búsqueda 55b o similares para un fluido dado (agua o lodo a base de petróleo) a ciertos parámetros medidos (temperatura, densidad, presión, etc.). A su vez, el proceso 300 puede controlar el segundo estrangulador 120 de forma tal que mitigue el efecto de escape de gas en el estrangulador principal 110. Tal como se ha mencionado anteriormente, cuando los gases atrapados salen de la solución, es poco probable que se vuelvan a mezclar con la solución. Por consiguiente, la adición de contrapresión por parte del estrangulador secundario 120 puede comprimir dichos gases y elevar la densidad general.

[00150] Parte del circuito de retroalimentación de control para el proceso 300 puede fiarse en la cantidad esperada de escape de gas y posterior compresión de dichos gases. La ley del gas ideal puede ser de utilidad para esta consideración. Como se sabe la ley del gas ideal se puede caracterizar como $P = \rho \frac{R}{M} T$, en donde P es la presión del gas; ρ es la densidad el gas, M es la masa molar; R es la constante universal o ideal del gas; y T es la temperatura del gas. Como se comprende a partir de la ley del gas ideal, la adición de contrapresión al estrangulador secundario 120 puede reducir el volumen del gas y elevar la densidad general de la mezcla fluido/gas, reduciendo así la posibilidad que los gases se salgan de la solución.

[00151] Tal como se divulga en el presente, se pueden emplear los estranguladores 110/120 no solo para controlar la contrapresión sino que se pueden usar para controlar la dirección del caudal (esto es, dirigir y apertura/cierra del caudal). En general, los estranguladores 110/120 podrían no ser capaces de cerrar completamente y podrían presentar algunas fugas. Por consiguiente, podría ser conveniente emplear válvulas de bola en lugar de válvula de compuerta para controlar la dirección del caudal. De hecho, algunas de las distintas válvulas 101, 102, 104, 105, etc. podrían ser válvulas de bola o compuerta controladas de forma automática con actuadores, para controlar la dirección del caudal de conformidad con los fines divulgados en la presente.

[00152] La anterior descripción de realización preferida y de otras realizaciones no pretende limitar o restringir el alcance o la aplicabilidad de los conceptos inventivos concebidos por los Solicitantes. Se apreciará con el beneficio de la presente divulgación que las características descritas anteriormente en concordancia con cualquier realización o aspecto del objeto divulgado se pueden utilizar, ya sea individualmente o en combinación, con cualquier otra característica descrita, en cualquier otra realización o aspecto del objeto divulgado.

[00153] A cambio de divulgar los conceptos inventivos contenidos en la presente, los Solicitantes desean la totalidad de los derechos de patente otorgados por las reivindicaciones anexas. Por consiguiente, se pretende que las reivindicaciones anexas incluyan todas las modificaciones o alteraciones, en la mayor medida que estas estén comprendida dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones o equivalentes de las mismas.