

PREDECIR LA POTENCIA AL FRENO PARA UNA BOMBA PARA APLICACIONES DE VISCOSIDAD

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUD RELACIONADA

[0001] La presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud no provisional estadounidense con N.º de serie 16/731.240, presentada por Ketankumar Kantilal Sheth, *et al.* el 31 de diciembre de 2019, titulada "PREDECIR LA POTENCIA AL FRENO PARA UNA BOMBA PARA APLICACIONES DE VISCOSIDAD", que se asigna habitualmente con esta solicitud y se incorpora en la presente por referencia en su totalidad.

CAMPO TÉCNICO

[0002] Esta solicitud se refiere, en general, a determinar los parámetros de bomba y, más específicamente, a determinar una potencia al freno (BHP) de una bomba para los parámetros de diseño proporcionados.

ANTECEDENTES

[0003] Las bombas centrífugas se han desarrollado y utilizado durante siglos en el manejo de fluidos viscosos. El rendimiento de una bomba centrífuga se ve afectado por muchos factores, tales como viscosidad, velocidad (rotaciones por minuto), diámetro de etapa, velocidad de flujo y diseño hidráulico de la bomba. En general, una bomba se evalúa en agua en condiciones atmosféricas y se usa su rendimiento, medido a una o dos velocidades fijas, para la selección del tipo de bomba y una cantidad de etapas de bomba. Puede ser difícil predecir el rendimiento de una bomba en una aplicación de viscosidad, por ejemplo, cuando el fluido bombeado tiene una mayor viscosidad que el agua, ya que el rendimiento depende de la velocidad de la bomba, la viscosidad del fluido y la velocidad de flujo del fluido. Para una aplicación de viscosidad determinada, una bomba se evalúa en general con diversos fluidos viscosos en un rango de velocidades y sus datos de prueba se interpolan. Este análisis ha demostrado ser largo y costoso. Además, interpolar y modelar el rendimiento para su uso en una aplicación práctica puede ser un proceso complejo y puede introducir imprecisiones en la predicción del rendimiento.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0004] Se hace referencia ahora a las siguientes descripciones tomadas en conjunto con los dibujos adjuntos, en los que:

[0005] la Figura 1 es una ilustración de un diagrama de un sistema de pozo de ejemplo;

[0006] la Figura 2 es una ilustración de un diagrama de un sistema de bomba de ejemplo en un sistema de pozo de fracturamiento hidráulico;

[0007] la Figura 3 es una ilustración de un diagrama de un sistema de bomba de ejemplo en un sistema de pozo marino;

[0008] la Figura 4A es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de Ketan-Roberts (K-R) normalizados para una bomba en agua a una rotación por minuto (RPM) determinada con viscosidad absoluta;

[0009] la Figura 4B es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para una bomba en agua con viscosidad cinemática;

[0010] la Figura 5A es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para diversos fluidos viscosos con viscosidades absolutas;

[0011] la Figura 5B es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para diversos fluidos viscosos con viscosidades cinemáticas;

[0012] la Figura 6 es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo que demuestra las curvas de rendimiento de una bomba de ejemplo;

[0013] la Figura 7A es una ilustración de un diagrama de flujo de un método de ejemplo para predecir una potencia al freno (BHP) de una bomba para un fluido viscoso;

[0014] la Figura 7B es una ilustración de un diagrama de flujo de un método de ejemplo, que se basa en la Figura 7A, para normalizar los números de K-R de mejor punto de eficacia; y

[0015] la Figura 8 es una ilustración de un diagrama de bloques de un sistema de predictor de BHP de ejemplo.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0016] Las bombas de diversos tipos pueden utilizarse para bombear fluidos en diversas industrias y campos. Por ejemplo, las bombas pueden ser centrífugas, rotativas, de desplazamiento, de medición y otros tipos de bomba. Un tipo de bomba, las bombas eléctricas sumergibles (ESP), pueden usarse para bombear petróleo hacia fuera de las formaciones subterráneas. Una ESP es una bomba centrífuga multietapa que tiene dos o más etapas, tales como cientos de etapas, que pueden operar a velocidades variables, por ejemplo, de 1500 revoluciones por minuto (RPM) a 8000 RPM. La operación de ESP

puede bombear hacia dentro o fuera una pequeña cantidad de fluido, tal como algunos barriles por día (BPD) a cientos de miles de BPD.

[0017] Algunos tipos de bombas también pueden usarse en aplicaciones de formación no subterránea tales como en el campo de la medicina para bombear sangre o suministrar medicamentos, en el campo de la química y en un campo más amplio de producción de hidrocarburos, por ejemplo, para bombear lodo, fluido hidráulico, salmuera, productos químicos, aceites y otros fluidos hacia dentro o fuera de un pozo. La selección de la bomba, por ejemplo, el dimensionamiento del sistema de bomba, para una o más aplicaciones de viscosidad incluye una selección de un tipo de etapa, diámetro de etapa, velocidad de flujo, rango de RPM, una cantidad de etapas de bomba, sello (protector), motor y componentes opcionales según la aplicación específica, tal como un separador de gas.

[0018] La predicción del rendimiento de bombas en aplicaciones de viscosidad, por ejemplo, cuando el fluido bombeado tiene una mayor viscosidad que el agua, especialmente en entornos difíciles tales como una aplicación marina, requiere mayor precisión que la precisión proporcionada por las herramientas de predicción convencionales debido al costo de operar en el entorno difícil. Una diferencia en el dimensionamiento y la predicción de un tipo de bomba usado en un entorno operativo que contiene fluido de ciertas propiedades de viscosidad puede dar como resultado un aumento en los costos operativos, tales como en una operación marina de bombeo donde el aumento puede ser de varios millones de dólares en tiempo adicional para bombear el fluido o en los costos de mantenimiento adicionales.

[0019] Para determinar el dimensionamiento adecuado de una bomba para aplicaciones de viscosidad, se debe conocer el rendimiento de bomba con diversas viscosidades. En general, una bomba que tiene pocas etapas se puede construir y evaluar en rangos deseados de viscosidades y RPM en un centro de pruebas antes de que la bomba se dimensione y utilice en la aplicación concreta. Los resultados de la prueba pueden usarse para una predicción del rendimiento de bomba en el entorno operativo, tal como una aplicación de producción marina. La producción puede usarse para seleccionar adecuadamente el tamaño de la bomba y su motor antes del despliegue. Este proceso de construcción, prueba, análisis, modelado y predicción puede ser costoso y lento, así como también impreciso, ya que las viscosidades y las RPM pueden variar ampliamente en función del entorno operativo concreto.

[0020] En la presente, se introduce una relación adimensional entre una velocidad de flujo volumétrico, un parámetro de viscosidad y una potencia al freno (BHP) que

simplifica la predicción de los requisitos de potencia (HP) para un rendimiento de viscosidad de bomba. La BHP estimada, por ejemplo, una BHP preferida o de diseño, puede predecirse a partir de un análisis de la velocidad de flujo, cabezal, velocidad (es decir, RPM) y viscosidad de una bomba derivada de sus especificaciones de rendimiento de agua. En principio se asume que las especificaciones de rendimiento de agua son de una viscosidad de un centipoise (cP) y una temperatura de 20 grados Celsius. En los aspectos donde el agua tiene diferentes especificaciones, los resultados de rendimiento se pueden normalizar. La predicción de la BHP para una viscosidad de fluido diseñada se puede derivar del rendimiento de agua que funciona a la misma velocidad. La relación introducida se denomina a lo largo de la divulgación número de Ketan-Robert (K-R) y se deriva en la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

Ecuación 1: número de K-R de ejemplo con viscosidad absoluta

$$\text{número de K-R} = \frac{Q^2}{BHP * \mu}$$

Ecuación 2: número de K-R de ejemplo con viscosidad cinemática

$$\text{número de K-R} = \frac{Q * v^{0.5}}{RPM^{0.5} * BHP}$$

donde Q es la velocidad de flujo de masa del fluido viscoso;

BHP es la HP al freno de la bomba;

RPM es la velocidad de rotación de la bomba;

μ es la viscosidad absoluta; y

v es la viscosidad cinemática.

[0021] La viscosidad cinemática y la viscosidad absoluta están relacionadas a través de la fórmula convencional de $v = \frac{\mu}{\text{densidad de fluido}}$. Además, las Ecuaciones 1 y 2 pueden

utilizar una velocidad de flujo volumétrico, donde la velocidad de flujo volumétrico es proporcional a la velocidad de flujo de masa con la densidad de fluido,

$\text{velocidad de flujo volumétrico} = \frac{Q}{\text{densidad de fluido}}$. BHP es una función de la

velocidad de flujo del fluido, la RPM de bomba, el diámetro de etapa de la bomba y el diseño hidráulico de la bomba. La velocidad de flujo se ve afectada por la RPM, el diámetro de etapa y el diseño hidráulico de la bomba. La Ecuación 1 o la Ecuación 2 puede utilizarse como el número de K-R en la presente y la ecuación seleccionada puede elegirse por su facilidad de uso, necesidad de implementación, parámetros disponibles y otros factores.

[0022] Un mejor punto de eficacia (BEP) es donde la bomba tiene la mayor eficacia en

las especificaciones de rendimiento de bomba a la RPM de diseño para una velocidad de flujo del agua. Las especificaciones de rendimiento de agua de una bomba determinada en general están disponibles a través del fabricante de la bomba y se proporcionan en forma de una curva de bomba, que se traza con respecto a la velocidad de flujo, el cabezal, la BHP y la eficacia a una RPM (ver la Figura 6 para una curva de BEP de ejemplo). Por ejemplo, las especificaciones de rendimiento de bomba de agua de la industria de ESP de una bomba ESP se publican a 50 Hz (2917 RPM) o 60 Hz (3500 RPM) según el uso principal de la bomba. En otros aspectos, las especificaciones de rendimiento de agua pueden determinarse en un entorno de prueba, tal como un experimento de laboratorio o de campo a una RPM diferente donde las especificaciones de rendimiento de agua se ajustan mediante las leyes de afinidad. Los resultados evaluados en laboratorio o en campo pueden usarse en lugar de las especificaciones de rendimiento de bomba publicadas.

[0023] La divulgación usa el número de K-R para predecir una BHP recomendada para una bomba. El número de K-R primero se calcula para una o más velocidades de flujo para una RPM de diseño. Luego el número de K-R puede normalizarse al dividirlo con el número de K-R de BEP. El número de K-R del fluido viscoso, a la misma RPM, se normaliza contra el número de K-R al BEP, ver la Ecuación 3. De manera similar, la velocidad de flujo normalizada puede calcularse con la velocidad de flujo del fluido viscoso y la velocidad de flujo al BEP, como se muestra en la Ecuación 4. Se entiende que las velocidades de flujo distintas de la velocidad de flujo de BEP, tal como una velocidad de flujo cercana a cero o una velocidad de flujo cercana a la máxima, o cualquier otra velocidad de flujo, también pueden utilizarse para la normalización de las velocidades de flujo.

Ecuación 3: normalización del número de K-R de ejemplo a una RPM constante

$$\text{número de } K - R_{norm} = \frac{\text{número de } K - R_{\text{fluido viscoso}}}{\text{número de } K - R_{BEP}}$$

Ecuación 4: normalización de la velocidad de flujo de ejemplo a una RPM constante

$$\text{velocidad de flujo}_{norm} = \frac{\text{velocidad de flujo}_{\text{fluido viscoso}}}{\text{velocidad de flujo}_{BEP}}$$

[0024] Las leyes de afinidad pueden utilizarse para transformar los datos de una RPM a otra RPM para el rendimiento de agua, por ejemplo, de la RPM original o de referencia a una RPM específica o diseñada. A medida que cambian las RPM, el número de K-R para el rendimiento de agua también cambia en una relación inversamente proporcional, según la Ecuación 1 y 2. Por lo general, el número de K-R para el rendimiento de agua

al BEP puede transformarse a una RPM diferente, por ejemplo, diseñada, mediante la relación inversamente proporcional y el número de K-R transformado se puede utilizar como el número de K-R de BEP para la RPM diseñada. La Ecuación 5 demuestra que se puede usar la relación inversamente proporcional.

Ecuación 5: número de K-R de ejemplo para el rendimiento de agua con un cambio proporcional de RPM

$$\text{número de K-R de BEP}_{RPM \text{ de diseño}} = \text{número de K-R de BEP}_{RPM \text{ orig}} * \left(\frac{RPM_{orig}}{RPM_{de \text{ diseño}}} \right)^A$$

donde el *número de K-R de BEP_{RPM orig}* es el número de K-R de BEP con las especificaciones de BEP de la bomba;

RPM_{orig} es la RPM usada para la especificación de BEP;

RPM_{de diseño} es la RPM recién especificada, es decir, segunda o de diseño, que se usa para transformar los otros valores; y

A es 4 cuando se usa la Ecuación 1 y A es 2,5 cuando se usa la Ecuación 2.

[0025] En otro aspecto, las leyes de afinidad pueden aplicarse para calcular el rendimiento de agua de una bomba a una RPM diseñada con su RPM original. El conjunto de ecuaciones en la Ecuación 6 muestra ejemplos de las leyes de afinidad.

Ecuación 6: Leyes de afinidad de ejemplo para traducir los valores de bomba a una RPM de diseño

$$\text{velocidad de flujo}_{RPM \text{ de diseño}} = \text{velocidad de flujo}_{RPM \text{ orig}} * \left(\frac{RPM_{de \text{ diseño}}}{RPM_{orig}} \right)$$

$$\text{cabezal}_{RPM \text{ de diseño}} = \text{cabezal}_{RPM \text{ orig}} * \left(\frac{RPM_{de \text{ diseño}}}{RPM_{orig}} \right)^2$$

$$BHP_{RPM \text{ de diseño}} = BHP_{RPM \text{ orig}} * \left(\frac{RPM_{de \text{ diseño}}}{RPM_{orig}} \right)^3$$

[0026] La Ecuación 5 y el conjunto de ecuaciones en la Ecuación 6 pueden utilizarse para traducir, por ejemplo, transformar, especificaciones de bomba de una RPM a una segunda RPM con agua como el fluido, antes de analizar el sistema para otro fluido viscoso. Estas ecuaciones en general no son útiles para calcular el rendimiento de bomba a otras RPM con fluidos viscosos ya que las pérdidas de viscosidad siguen una relación diferente que el cambio en la RPM solo indicaría. Las aplicaciones de producción de hidrocarburos, por ejemplo, aceite, agua, salmuera, gas, lodo, arena,

fluido de fracturamiento hidráulico y otros fluidos pueden mezclarse en diversas proporciones, lo que afecta y cambia continuamente la viscosidad del fluido bombeado.

[0027] El proceso divulgado puede seguir las siguientes etapas para calcular una BHP de una bomba seleccionada para la velocidad de diseño y la viscosidad de diseño en el entorno operativo. (1) Calcular un número de K-R para las velocidades de flujo que incluyen la velocidad de flujo de BEP, con la Ecuación 1 o 2 en función del rendimiento de agua en las especificaciones publicadas de la bomba, por ejemplo, parámetros. Las especificaciones publicadas y determinadas en laboratorio y campo se denominan especificaciones de referencia.

[0028] (2) El número de K-R normalizado y las velocidades de flujo normalizadas para el rendimiento de agua se calculan al dividir cada número de K-R y velocidad de flujo con el respectivo número de K-R y velocidad de flujo de BEP, con la Ecuación 3 y 4, respectivamente.

[0029] (3) Una relación se desarrolla entre el número de K-R normalizado y la velocidad de flujo normalizada para el rendimiento de agua, por ejemplo, como se muestra en las Figuras 4A y 4B. Esta relación es válida para todas las viscosidades y RPM, por ejemplo, como se muestra en las Figuras 5A y 5B.

[0030] (4) Una bomba está diseñada para operar en condiciones y RPM diferentes de las especificaciones de agua. Al utilizar las especificaciones operativas en la implementación para la bomba, se pueden seleccionar la velocidad, viscosidad y velocidad de flujo, y se pueden denominar velocidad de diseño, BHP de diseño y velocidad de flujo de diseño. La velocidad de diseño puede ser diferente de la RPM de referencia. Las especificaciones de rendimiento de agua en la RPM de diseño pueden determinarse mediante las leyes de afinidad y las especificaciones de rendimiento de agua publicadas.

[0031] (5) El número de K-R de BEP para el rendimiento de agua en la RPM de diseño puede calcularse mediante la relación inversamente proporcional de RPM, tal como con la Ecuación 5. En un aspecto alternativo, el número de K-R de BEP puede determinarse al calcular el rendimiento de agua a la velocidad de diseño mediante las leyes de afinidad de la Ecuación 6, lo que deriva en especificaciones nuevas de rendimiento de bomba y luego se calcula el número de K-R con la Ecuación 1 o 2.

[0032] (6) Otros parámetros para el rendimiento de agua puede ajustarse con la RPM de diseño y la RPM de referencia, tal como usar las leyes de afinidad en la Ecuación 6.

[0033] (7) A partir de la relación de las relaciones de BEP del flujo y la BHP con la viscosidad y velocidad, la velocidad de flujo de BEP de diseño y la BHP de BEP de

diseño se obtienen de los parámetros de rendimiento de agua de BEP a la RPM de diseño.

[0034] (8) La velocidad de flujo de diseño puede normalizarse contra la velocidad de flujo de BEP de diseño y la viscosidad, tal como con la Ecuación 4.

[0035] (9) Se puede calcular un número de K-R normalizado a la velocidad de flujo normalizada, tal como se demuestra en las Figuras 5A o 5B.

[0036] (10) Se puede calcular una BHP para el fluido viscoso de diseño y una RPM de diseño. La Ecuación 7 y la Ecuación 8 son ejemplos para calcular la BHP prevista.

Ecuación 7: Cálculo de predicción de ejemplo de una BHP con la Ecuación 1

$$BHP_{RPM \text{ de diseño, viscosidad}} = \frac{velocidad \text{ de flujo}_{normalizada \text{ a RPM de diseño, viscosidad}}^2 * BHP_{BEP, RPM \text{ de diseño, viscosidad}}}{K - R_{normalizada \text{ a RPM de diseño, viscosidad}}}$$

Ecuación 8: Cálculo de predicción de ejemplo de una BHP con la Ecuación 2

$$BHP_{RPM \text{ de diseño, viscosidad}} = \frac{velocidad \text{ de flujo}_{normalizada \text{ a RPM de diseño, viscosidad}} * BHP_{BEP, RPM \text{ de diseño, viscosidad}}}{K - R_{normalizada \text{ a RPM de diseño, viscosidad}}}$$

donde la *velocidad de flujo* es la velocidad de flujo normalizada derivada de las especificaciones de bomba o la velocidad de flujo como se ajusta con un cambio en la selección de RPM;

BHP es la BHP al BEP como se deriva de las especificaciones de bomba o la BHP como se ajusta con un cambio en la selección de RPM; y

K-R_{normalizado} es el número de K-R calculado o el número de K-R como se ajusta con un cambio en la selección de RPM.

[0037] Para demostrar el proceso, se presenta una bomba de ejemplo y un escenario de entorno. En la Etapa 1, se determinan las características de rendimiento de bomba, tales como a partir de los materiales publicados y el entorno operativo esperado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de rendimiento de agua de bomba de ejemplo

Etapa	SJ2800
Velocidad	2333 RPM
Flujo	700 BPD
Viscosidad	300 cP

[0038] Las Etapas 2 y 3 se realizan para desarrollar un número de K-R para la correlación de BHP de viscosidad (ver, por ejemplo, las Ecuaciones 1 y 2, y las Figuras 4A y 4B). Las Etapas 4 y 5 se realizan para calcular el rendimiento de agua de BEP a la RPM de diseño (entorno operativo) que se identificó en la Etapa 1 como se muestra en

la Tabla 2, tales como mediante leyes de afinidad (ver, por ejemplo, las Ecuaciones 5 y 6).

Tabla 2: Cálculos de BEP de ejemplo

		40 Hz de datos de agua de BEP a 2333 RPM	60 Hz de datos de agua de BEP a 3500 RPM
agua	velocidad de flujo de BEP	1974 BPD	2961 BPD
agua	cabezal de BEP	24,88 pies	56,00 pies
agua	BHP de BEP	0,531 HP	1,793 HP

[0039] La Etapa 7 puede utilizarse para calcular la velocidad de flujo de BEP, el diseño de cabezal a la viscosidad de diseño y la velocidad de diseño con la relación de BEP y velocidad, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Cálculos de BEP de ejemplo

	40 Hz de datos de agua de BEP a 2333 RPM	Factor de corrección para 2333 RPM y 300 cP	40 Hz de datos de 300 cP de BEP a 2333 RPM
velocidad de flujo de BEP	1974 BPD	(X) 0,4678	923,232 BPD
cabezal de BEP	24,88 pies	(X) 0,7112	17,6961 pies
BHP de BEP	0,531 HP	(X) 2,2198	1,1788 HP

[0040] La Etapa 8 se realiza para calcular la velocidad de flujo normalizada a la RPM de diseño y la viscosidad de diseño como se muestra en la Tabla 4 (ver, por ejemplo, la Ecuación 4).

Tabla 4: Velocidad de flujo normalizada de ejemplo

	Velocidad de flujo original	Velocidad de flujo normalizada
Flujo normalizado a la RPM de diseño, viscosidad (dividir por 923,232, tal como con la Ecuación 4)	700	= 0,7582

[0041] La Etapa 9 se realiza para calcular el número de K-R normalizado con las relaciones desarrolladas en la Etapa 3 como se muestra en la Tabla 5 (ver, por ejemplo, la Ecuación 3).

Tabla 5: Normalización del número de K-R de ejemplo

	Velocidad de flujo normalizada	Número de K-R normalizado
Número de K-R normalizado a RPM de diseño, viscosidad (Con la Ecuación 2, Figuras 4B y 5B)	0,7582	0,8152

[0042] La Etapa 10 se realiza para calcular la BHP de diseño como se muestra en la Tabla 6 (ver, por ejemplo, las Ecuaciones 7 y 8).

Tabla 6: Cálculo de BHP de ejemplo

BHP de diseño = (Con la Ecuación 2 y 8)	$0,7582 * 1,1788 / 0,8152$	= 1,0964 BHP
--	----------------------------	--------------

[0043] Una vez que se calcula la BHP prevista, la información puede proporcionarse a un usuario, tal como un ingeniero u operador. El usuario puede utilizar la información, combinada con otros parámetros, datos, factores e información, para seleccionar y dimensionar la bomba y determinar la cantidad adecuada de etapas de bomba para la implementación. Algunas consideraciones que el usuario puede utilizar en el análisis de selección de bomba pueden ser para maximizar la eficiencia, minimizar los requisitos de mantenimiento, costo de la bomba, costo de operación de la bomba y otros factores.

[0044] Con referencia ahora a las figuras, la Figura 1 es una ilustración de un diagrama de un sistema de pozo de ejemplo 100, por ejemplo, un sistema de extracción, un sistema de producción, un sistema de cable eléctrico con una bomba y otros sistemas de pozo de hidrocarburos. El sistema de pozo 100 incluye una torre de perforación 105, un controlador de sitio de pozo 107, un sistema de bomba de superficie 106 y un sistema informático 108. El controlador de sitio de pozo 107 incluye un procesador y una memoria, y está configurado para la operación directa del sistema de pozo 100. La torre de perforación 105 está ubicada en una superficie 104.

[0045] Debajo de la torre de perforación 105 se extiende un pozo 110, con dos secciones revestidas 115 y una sección sin revestir 116. La tubería 120 se inserta en el pozo 110. En el fondo de la tubería 120 se ubica una herramienta de fondo de pozo 125. La herramienta de fondo de pozo 125 puede incluir diversas herramientas de fondo de pozo y ensamblajes de pozo inferior (BHA), tales como una o más bombas 127 y válvulas. Pueden estar presentes otros componentes de la herramienta de fondo de pozo 125, tales como una fuente de alimentación local o baterías y capacitores para almacenar la energía recibida de otro sistema, así como también un transceptor y un sistema de control. El pozo 110 está rodeado por la formación subterránea 135. La tubería 120 conecta el sistema de bomba de superficie 106 y la herramienta de fondo de pozo 125. El sistema de bomba de superficie 106 y las bombas 127 se pueden dimensionar con los procesos descritos en la presente.

[0046] En este ejemplo, las bombas 127 pueden tener una o más etapas para bombear el fluido 130 hacia dentro y fuera del pozo 110. Las bombas 127 seleccionadas para ser parte de la herramienta de fondo de pozo 125 se deben dimensionar adecuadamente

para el tipo de fluido y la viscosidad del fluido a bombear. Una bomba ineficaz puede dar como resultado una pérdida financiera significativa en términos de tiempo usado para bombear el fluido o una pérdida de tiempo en reemplazar las bombas con unas de especificaciones diferentes.

[0047] El sistema informático 108 o el controlador de sitio de pozo 107 puede utilizarse para realizar los cálculos y cómputos como se describen en la presente para predecir una BHP adecuada que puede usarse para seleccionar y dimensionar las bombas 127 a usar dentro del pozo 110 como parte. El sistema informático 108 puede ser un controlador de sitio de pozo 107 próximo o puede estar a una distancia, tal como en un entorno en la nube, un centro de datos, un laboratorio o una oficina corporativa. El sistema informático 108 puede ser una computadora portátil, un teléfono inteligente, PDA, servidor, una computadora de escritorio, un sistema informático en la nube y otros sistemas informáticos que pueden operarse para realizar el proceso y los métodos descritos en la presente. La información generada a partir del sistema informático 108 puede comunicarse mediante diversos medios convencionales a los operadores e ingenieros de sitio de pozo para poder usar la BHP prevista para seleccionar las bombas a usar en el sistema de pozo 100.

[0048] La Figura 2 es una ilustración de un diagrama de un sistema de bomba de ejemplo en un sistema de bomba de fracturamiento hidráulico (HF) 200, que puede ser un sitio de pozo donde las operaciones de HF ocurren a través de la implementación de un plan de etapa de tratamiento de HF. El sistema de pozo de HF 200 demuestra un pozo casi horizontal que experimenta una operación de fracturamiento.

[0049] El sistema de pozo de HF 200 incluye un equipo de pozo de superficie 205 ubicado en una superficie 204, un equipo de control de sitio de pozo 207, un sistema de bomba de HF de superficie 206 y un sistema informático 208. En algunos aspectos, el equipo de control de sitio de pozo 207 está conectado de manera comunicativa con un sistema informático 208 separado, por ejemplo, un servidor, centro de datos, servicio en la nube, tableta, computadora portátil, teléfono inteligente separados u otros tipos de sistemas informáticos capaces de ejecutar los procesos y métodos descritos en la presente. El sistema informático 208 puede ubicarse próximo al equipo de control de sitio de pozo 207 o puede ubicarse a una distancia del equipo de control de sitio de pozo 207, y un ingeniero y operador de sistema de pozo puede utilizarlo para calcular la BHP prevista para una bomba, tal como bombas 227, a usar dentro del sistema de pozo de HF 200.

[0050] El pozo 210 se extiende por debajo de la superficie 104 del equipo de pozo de

superficie 205. El pozo 210 puede tener cero o más secciones revestidas y una sección inferior sin revestir. Dentro del pozo 210 se inserta una tubería de fluido 220. La porción inferior de la tubería de fluido 220 tiene la capacidad de liberar el material de fondo de pozo 230, tal como el fluido portador con material desviador, desde la tubería de fluido 220 hasta las formaciones subterráneas 235 que contienen fracturas 240. La liberación de material de fondo de pozo 230 puede ser mediante perforaciones en la tubería de fluido 220, mediante válvulas colocadas a lo largo de la tubería de fluido 220 o por otros medios de liberación. Al final de la tubería de fluido 220 se encuentra un extremo de ensamblaje de tubería 225, que puede ser una o más herramientas de fondo de pozo o un ensamblaje de tapa de extremo. El ensamblaje de tapa de extremo 225 puede incluir las bombas 227 para bombear fluidos hacia dentro o fuera del pozo 210.

[0051] En un aspecto alternativo, el material de fondo de pozo 230 puede bombearse a la superficie, tal como retirar el fluido de HF o retirar los fluidos de hidrocarburo. El fluido puede bombearse a través de la tubería de fluido 220 con el sistema de bombeo de HF de superficie 206, las bombas 227 o una combinación de estos. En algunos aspectos, el sistema informático 208 y el equipo de control de sitio de pozo 207 pueden usarse para calcular la BHP prevista para las bombas usadas dentro del sistema de pozo de HF 200. La BHP prevista puede usarse como parte del análisis para seleccionar las bombas a usar dentro del sistema de pozo de HF 200.

[0052] La Figura 3 es una ilustración de un diagrama de un sistema de bomba de ejemplo en un sistema de pozo marino 300, donde un ensamblaje de ESP 310 se coloca en el fondo de pozo en un pozo 326 debajo de un cuerpo de agua 340, tal como un océano o mar. El pozo 326 está rodeado por la formación subterránea 345. El ensamblaje de ESP 310 también puede utilizarse para operaciones en tierra. El ensamblaje de ESP 310 incluye un controlador de velocidad 312, un motor de ESP 314 y una bomba ESP 330.

[0053] El controlador de velocidad 312 se coloca en un gabinete 306 adentro de una sala de control 307 en una plataforma marina 305, tal como una plataforma petrolera. El controlador de velocidad 312 está configurado para ajustar la RPM del motor de ESP 314 para mejorar la productividad de pozo. En la forma de realización ilustrada, el motor de ESP 314 es un motor de inducción de jaula de ardilla trifásico de dos polos que funciona para girar la bomba ESP 330. El motor de ESP 314 se ubica cerca del fondo del ensamblaje de ESP 310, justo encima de los sensores de fondo de pozo dentro del pozo 326. Se extiende un cable de alimentación 320 desde el controlador de velocidad 312 hasta el motor de ESP 314.

[0054] La bomba ESP 330 puede ser una bomba centrífuga de múltiples etapas que incluye un impulsor y un difusor en cada etapa. Antes de su uso, el rendimiento de la bomba ESP 330 se predice mediante el uso de un método de predicción de rendimiento de BHP de viscosidad, tal como un método 701 en la Figura 7A, mediante un sistema informático, tal como el sistema de predictor de BHP 800 en la Figura 8. En función de la predicción, la bomba ESP 330 puede dimensionarse para la aplicación de implementación del sistema de pozo marino 300. La bomba ESP 330 se puede dimensionar y seleccionar para permitir el bombeo eficaz del fluido de interés, tal como aceite u otros hidrocarburos, a través de la tubería de producción 322 a tanques de almacenamiento a bordo de la plataforma marina 305.

[0055] En algunas formas de realización, la bomba ESP 330 puede ser una bomba de superficie horizontal, una bomba de cavidad progresiva o una bomba sumergible eléctrica de cavidad progresiva. Una sección de junta del motor y sección de entrada pueden extenderse entre el motor de ESP 314 y la bomba ESP 330. Un revestimiento de pozo 325 puede separar el ensamblaje de ESP 310 del agua 340 y la formación subterránea 345. Las perforaciones en el revestimiento de pozo 325 pueden permitir que el fluido de interés de la formación subterránea 345 entre al pozo 326.

[0056] Las Figuras 1 y 2 representan operaciones en tierra. Las personas del oficio de nivel medio entenderán que la divulgación es igualmente adecuada para su uso en operaciones marinas. Las Figuras 1, 2 y 3 representan configuraciones de pozo específicas; las personas del oficio de nivel medio entenderán que la divulgación es igualmente adecuada para su uso en pozos que tienen otras orientaciones que incluyen pozos verticales, pozos horizontales, pozos inclinados, pozos multilaterales y otros tipos de pozo.

[0057] La Figura 4A es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo 400 que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para una bomba en agua a una RPM determinada con viscosidad absoluta como se muestra en la Ecuación 1. Los puntos que se muestran en el área de gráfico 410 varían con un cambio en un diseño de bomba y también es una función de los parámetros de diseño específicos de la bomba. Los puntos del área de gráfico 410 pueden usarse para una predicción de una BHP de la bomba a una RPM diferente y en un fluido diferente.

[0058] El eje x 405 muestra la velocidad de flujo normalizada determinada con las especificaciones de rendimiento de agua de la bomba. Las velocidades de flujo de las especificaciones de rendimiento de agua se normalizan mediante el uso de una

velocidad de flujo en un punto de referencia, por ejemplo, BEP, para la RPM determinada. Para la normalización, cada una de las velocidades de flujo puede dividirse por la velocidad de flujo de BEP.

[0059] El eje y 406 muestra los números de K-R normalizados determinados con las especificaciones de rendimiento de agua de la bomba. Con la Ecuación 1, las velocidades de flujo y otros parámetros de las especificaciones de rendimiento de agua, se pueden calcular los números de K-R. Esto se muestra como punto 415 donde la velocidad de flujo de BEP y el número de K-R de BEP son ambos uno. El número de K-R calculado para el fluido viscoso luego se normaliza con el número de K-R anterior y la velocidad de flujo al BEP.

[0060] La Figura 4B es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo 430 que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para una bomba en agua a una RPM determinada con viscosidad cinemática como se muestra en la Ecuación 2. Los puntos que se muestran en el área de gráfico 440 varían con un cambio en un diseño de bomba y también es una función de los parámetros de diseño específicos de la bomba. Los puntos del área de gráfico 440 pueden usarse para una predicción de una BHP de la bomba a una RPM diferente y un fluido diferente.

[0061] El eje x 435 muestra la velocidad de flujo normalizada determinada con las especificaciones de rendimiento de agua de la bomba. Las velocidades de flujo de las especificaciones de rendimiento de agua se normalizan mediante el uso de una velocidad de flujo en un punto de referencia, por ejemplo, BEP, para la RPM determinada. Para la normalización, cada una de las velocidades de flujo puede dividirse por la velocidad de flujo de BEP.

[0062] El eje y 436 muestra los números de K-R normalizados determinados con las especificaciones de rendimiento de agua de la bomba. Con la Ecuación 2, las velocidades de flujo y otros parámetros de las especificaciones de rendimiento de agua, se pueden calcular los números de K-R. Esto se muestra como punto 445 donde la velocidad de flujo de BEP y el número de K-R de BEP son ambos uno. El número de K-R calculado para el fluido viscoso luego se normaliza con el número de K-R anterior y la velocidad de flujo al BEP.

[0063] La Figura 5A es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo 500 que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para diversos fluidos viscosos con viscosidades absolutas, como se muestra en la Ecuación 1. El eje x 505 muestra las velocidades de flujo normalizadas

para los diversos fluidos viscosos. El eje y 506 muestra los números de K-R normalizados correspondientes para los fluidos viscosos. A diferencia del gráfico 400 en la Figura 4A, el gráfico 500 es para fluidos distintos del agua. El área de gráfico 510 muestra los puntos de datos para varias viscosidades de fluido diferentes.

[0064] Los fluidos incluyen un primer fluido que tiene viscosidad de 6 cP (cuadrado vacío), un segundo fluido que tiene viscosidad de 9 cP (triángulo vacío), un tercer fluido que tiene 19 cP (rectángulo sólido), un cuarto fluido que tiene 35 cP (diamante vacío), un quinto fluido que tiene 50 cP (X), un sexto fluido que tiene 90 cP (círculo vacío), un séptimo fluido que tiene 100 cP (cuadrado sólido), un octavo fluido que tiene 140 cP (triángulo sólido), un noveno fluido que tiene 190 cP (círculo con cuadrado dentro), un décimo fluido que tiene 244 cP (+), un undécimo fluido que tiene 285 cP (círculo con líneas inclinadas), un duodécimo fluido que tiene 426 cP (círculo con líneas que se cruzan), un decimotercer fluido que tiene 541 cP (X con un fondo sombreado) y un decimocuarto fluido que tiene 680 cP (círculo gris).

[0065] Como se muestra, mientras los fluidos y sus viscosidades difieren, la correlación de rendimiento de viscosidad, es decir, la relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados correspondientes, se mantiene aproximadamente equivalente. Como tal, una correlación del número de K-R de una bomba en agua a una RPM determinada, por ejemplo, gráfico 400 y gráfico 500 en las Figuras 4A y 5A, respectivamente, pueden usarse para predecir una BHP de la bomba en una aplicación de viscosidad, tales como fluidos de diversas viscosidades en las operaciones de fondo de pozo.

[0066] La Figura 5B es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo 530 que demuestra una relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados para los diversos fluidos viscosos con viscosidades cinemáticas, como se muestra en la Ecuación 2. El eje x 535 muestra las velocidades de flujo normalizadas para los diversos fluidos viscosos. El eje y 536 muestra los números de K-R normalizados correspondientes para los fluidos viscosos. A diferencia del gráfico 430 en la Figura 4B, el gráfico 530 es para los fluidos distintos del agua. El área de gráfico 540 muestra los puntos de datos para varias viscosidades de fluido diferentes.

[0067] Los fluidos incluyen un primer fluido que tiene viscosidad de 6 cP (cuadrado vacío), un segundo fluido que tiene viscosidad de 9 cP (triángulo vacío), un tercer fluido que tiene 19 cP (rectángulo sólido), un cuarto fluido que tiene 35 cP (diamante vacío), un quinto fluido que tiene 50 cP (X), un sexto fluido que tiene 90 cP (círculo vacío), un séptimo fluido que tiene 100 cP (cuadrado sólido), un octavo fluido que tiene 140 cP

(triángulo sólido), un noveno fluido que tiene 190 cP (círculo con cuadrado dentro), un décimo fluido que tiene 244 cP (+), un undécimo fluido que tiene 286 cP (círculo con líneas inclinadas), un duodécimo fluido que tiene 426 cP (círculo con líneas que se cruzan), un decimotercer fluido que tiene 541 cP (X con un fondo sombreado) y un decimocuarto fluido que tiene 680 cP (círculo gris).

[0068] Como se muestra, mientras los fluidos y sus viscosidades difieren, la correlación de rendimiento de viscosidad, es decir, la relación entre las velocidades de flujo normalizadas y los números de K-R normalizados correspondientes, se mantiene aproximadamente equivalente. Como tal, una correlación del número de K-R de una bomba en agua a una RPM determinada, por ejemplo, gráfico 430 y gráfico 530 en las Figuras 4B y 5B, respectivamente, pueden usarse para predecir una BHP de la bomba en una aplicación de viscosidad, tales como fluidos de diversas viscosidades en las operaciones de fondo de pozo.

[0069] La Figura 6 es una ilustración de un diagrama de un gráfico de ejemplo 600 que demuestra las curvas de rendimiento de una bomba de ejemplo. Las especificaciones de rendimiento, tales como el gráfico 600, pueden ponerse a disposición de un usuario de la bomba de ejemplo y pueden usarse para identificar los BEP en los diversos escenarios operativos. El gráfico 600 tiene un eje x 605 que muestra la velocidad de flujo en BPD, un eje y primario 606 que muestra el cabezal en pies por etapa, un segundo eje y 609 que muestra la BHP, por ejemplo, potencia por etapa y una leyenda de gráfico 608 que muestra diferentes viscosidades de fluido de muestra a RPM diferentes que se grafican en el área de gráfico 610.

[0070] Las características operativas de bomba de ejemplo son para el agua a temperatura ambiente, presión atmosférica con gravedad específica de 1,00 y una viscosidad de un cP. Para la velocidad fija como se especifica en la leyenda de gráfico 608, se grafican las variaciones de cabezal (por ejemplo, presión) y BHP con respecto al cambio en las velocidades de flujo. Las características de rendimiento también demuestran una relación de eficacia con la velocidad de flujo que demuestra el rendimiento óptimo de la bomba al BEP y que demuestra el rango de operación para la operación óptima y confiable de la bomba para maximizar la vida útil de la bomba.

[0071] El BEP 620 muestra los puntos de BEP para algunas curvas de rendimiento graficadas. El BEP 620 puede usarse para proporcionar entradas de datos, es decir, características o especificaciones de bomba, tales como velocidades de flujo, a las ecuaciones que se usan en la presente. El número inicial de K-R puede calcularse con las especificaciones en uno de los puntos de datos de BEP 620, según la viscosidad y

RPM seleccionadas.

[0072] La Figura 7A es una ilustración de un diagrama de flujo de un método de ejemplo 701 para predecir la BHP de una bomba para un fluido viscoso. El método 701 puede utilizar las especificaciones de bomba determinadas en un laboratorio, una prueba de campo o publicadas por el fabricante de la bomba para realizar cálculos para predecir una BHP adecuada para una bomba para una implementación específica. El método 701 puede ejecutarse mediante un sistema informático, tal como el sistema de predictor de BHP 800 en la Figura 8. El método 700 comienza en una etapa 705 y procede a una etapa 707.

[0073] En la etapa 707, se puede seleccionar una RPM de diseño. La RPM de diseño puede ser la misma que la que se usó en las especificaciones publicadas, evaluadas en laboratorio o en campo, por ejemplo, especificaciones de referencia, para la bomba. Si la RPM de diseño es diferente a la RPM de referencia, entonces se pueden aplicar algoritmos, tales como leyes de afinidad, para transformar los diversos parámetros de la RPM de referencia a la RPM de diseño.

[0074] En la etapa 710, el número de K-R para el punto de BEP se puede calcular para una RPM de diseño. Se puede asumir que la viscosidad es de uno para el agua. Se pueden recibir los parámetros usados para los cálculos, tales como recibir las especificaciones de bomba del fabricante o recibir las especificaciones derivadas en prueba de laboratorio o campo. Además, pueden recibirse las entradas de usuario, tales como recibir una RPM de diseño, velocidad de flujo y otros parámetros de diseño de usuario. Un usuario puede ingresar las diversas entradas, recibidas a través de una comunicación electrónica, recibidas de una memoria o ubicación de almacenamiento informático o una combinación de estos. En otros aspectos, la prueba con otros fluidos puede usarse para determinar el punto de BEP y que se utilizaría la viscosidad del fluido y las especificaciones de bomba. Puede calcularse un segundo número de K-R para la implementación específica, tal como con la Ecuación 1 o la Ecuación 2. La implementación específica puede tener una RPM diferente, velocidad de flujo u otro parámetro en comparación con las especificaciones originales usadas para determinar las especificaciones de BEP. La RPM y la velocidad de flujo son entradas de datos, así como también la viscosidad del fluido.

[0075] En la etapa 730, el segundo número de K-R se genera al normalizar el número de K-R original con el número de K-R de BEP, tal como con la Ecuación 3. Además, la velocidad de flujo normalizada se genera con la velocidad de flujo original del BEP, tal como con la Ecuación 4. En una etapa 750, la BHP de diseño se calcula con la velocidad

de flujo normalizada y el número de K-R normalizado, tal como con la Ecuación 7. El método 701 finaliza en una etapa 770.

[0076] La Figura 7B es una ilustración de un diagrama de flujo de un método de ejemplo 702, que se basa en la Figura 7A, para normalizar los números de K-R de BEP. El método 702 incorpora las etapas del método 700 e incluye subetapas adicionales. El método 701 puede ejecutarse mediante un sistema informático, tal como el sistema de predictor de BHP 800 en la Figura 8. El método 702 comienza en la etapa 705 y procede a través de la etapa 707 y la etapa 710 a la etapa 730. La etapa 730 incluye dos subetapas potenciales que pueden realizarse según el análisis que se lleva a cabo y los parámetros que están disponibles. El método 702 puede proceder a una etapa 732 o a una etapa 740, o ambas, la etapa 732 y la etapa 740.

[0077] La etapa 732 puede generar un número de K-R de BEP de referencia. El número de K-R de referencia puede ser el mismo o uno modificado de un conjunto de especificaciones de bomba evaluadas o publicadas, tal como a una RPM de diseño. La transformación del número de K-R de referencia puede permitir que los operadores de bomba ajusten la RPM, con otros factores, mientras pueden continuar prediciendo una BHP de diseño para el plan de operación actual. En una etapa 734, el número de K-R de BEP de referencia, se puede normalizar con la variación en RPM de bomba, tal como con la Ecuación 5. El método 700 puede proceder a la etapa 740 o a la etapa 750.

[0078] La etapa 740 puede ajustar los parámetros de referencia mediante las leyes de afinidad o el conjunto de ecuaciones en la Ecuación 6. La velocidad de flujo, el cabezal y la BHP (tal como la BHP de BEP) pueden ajustarse con las leyes de afinidad convencionales, por ejemplo, como se muestra en la Ecuación 6. En una etapa 742, los parámetros de referencia ajustados pueden normalizarse contra los parámetros de BEP, tales como el número de K-R de BEP y la velocidad de flujo de BEP. Estos parámetros de referencia ajustados luego se pueden usar además para realizar los cálculos para determinar la BHP de diseño para el fluido viscoso. El método 702 procede a la etapa 732 o a la etapa 750. El método 702 finaliza en la etapa 770.

[0079] La Figura 8 es una ilustración de un diagrama de bloques de un sistema de predictor de BHP de ejemplo 800 que se construyó y configuró para realizar un método de predicción de BHP, tal como el método 701 y el método 702. El sistema de predictor de BHP 800 incluye un predictor de BHP 820, una interfaz 840 y una memoria 860. Se entiende que el sistema de predictor de BHP 800 se ha simplificado con fines ilustrativos y es probable que no ilustre algunos de los componentes que pueden estar presentes en un sistema concreto.

[0080] El predictor de BHP 820 puede ser una o más de una unidad de procesamiento tal como una unidad de procesamiento central, una unidad de procesamiento de gráficos y otros tipos de unidades de procesamiento que están configuradas para predecir una BHP de una bomba determinada en un fluido de interés a una RPM de diseño. El predictor de BHP 820 se puede acoplar de manera comunicativa a la interfaz 840 y a la memoria 860.

[0081] La interfaz 840 puede ser una interfaz de usuario, una interfaz de red o una interfaz de comunicaciones que se configura para recibir las especificaciones de rendimiento de agua de la bomba determinada, tales como especificaciones de referencia, evaluadas en laboratorio, evaluadas en campo y publicadas, y una RPM de diseño y otras entradas de usuario. La interfaz 840 puede emitir una BHP de diseño para la bomba para las diversas viscosidades de fluido. En algunos aspectos, un analizador de sistema de pozo puede configurarse para recibir la BHP de diseño y otros parámetros y especificaciones, y realizar el análisis para determinar el dimensionamiento y las especificaciones para las bombas a usar en la implementación. La interfaz 840 puede ser una interfaz de comunicación de transceptor que se configura para comunicar datos, es decir, transmitir y recibir datos. La interfaz 840 puede incluir la lógica, los puertos, terminales y conectores para comunicar datos. Los puertos, terminales y conectores pueden ser receptáculos convencionales para comunicar datos a través de una red de comunicación.

[0082] La memoria 860 puede ser una memoria de computadora tal como caché, una memoria de solo lectura (ROM), una ROM programable (PROM), una PROM borrrable, una memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM), una memoria estática de acceso aleatorio y una memoria flash. La memoria 860 puede configurarse para almacenar las especificaciones de rendimiento de agua recibida de la bomba determinada y otras especificaciones de rendimiento calculadas del predictor de BHP 820. La memoria 860 también puede configurarse para almacenar instrucciones ejecutables por computadora para dirigir la operación del predictor de BHP 820 cuando se inicia allí. Las instrucciones de operación pueden corresponder a un algoritmo o algoritmos que predicen una BHP de una bomba determinada en un fluido de interés a una RPM de diseño.

[0083] El sistema de predictor de BHP 800 puede ser parte de otro sistema informático, tal como una computadora portátil, tableta, teléfono inteligente, computadora de escritorio, servidor, centro de datos, entorno en la nube, controlador de sitio de pozo, el analizador de sistema de pozo y otros sistemas informáticos. El sistema de predictor de BHP 800 puede implementarse en un sistema informático general o un sistema

informático especializado. El predictor de BHP puede ubicarse próximo a la ubicación de implementación de la bomba o puede ubicarse a una distancia, por ejemplo, un entorno de laboratorio o de oficina. El sistema de predictor de BHP 800 puede implementarse para diferentes tipos de bombas, por ejemplo, bombas centrífugas, bombas rotativas y bombas de medición. El sistema de predictor de BHP 800 puede implementarse para diversas industrias y campos, tales como la industria de producción de hidrocarburos, el campo de la medicina y los campos de la química y petroquímica. Estas implementaciones de ejemplo requieren el bombeo de un fluido viscoso en un entorno donde las especificaciones de bomba publicadas no son adecuadas para evaluar la eficacia de la bomba.

[0084] Se entiende que los métodos y procesos descritos en la presente pueden aplicarse a una bomba centrífuga y otros tipos de bomba, tales como una bomba de desplazamiento positivo, una bomba rotativa y una bomba de medición, que pueden utilizarse para manejar un fluido viscoso. También se entiende que además de la producción de pozo, los métodos y procesos pueden usarse en otras aplicaciones de la industria del petróleo, tales como en el control y monitoreo del rendimiento de la bomba de lodo y la aplicación de inyección química en el pozo de petróleo, por ejemplo, para viscosidad, inhibición de incrustaciones, control de arena. En algunos aspectos, puede utilizarse en aplicaciones de la industria de no hidrocarburos, tales como en el campo de la medicina para el control y monitoreo del flujo sanguíneo, por ejemplo, una medición de la velocidad de transferencia de medicamentos y en la industria química y petroquímica para el control y monitoreo de inyección, y para la mezcla de productos químicos para obtener reacciones químicas adecuadas.

[0085] Una porción del aparato, los sistemas o métodos descritos anteriormente pueden establecerse en formas de realización o llevarse a cabo mediante diversos procesadores de datos análogos o digitales, en donde los procesadores se programan o almacenan programas ejecutables de secuencias de instrucciones de *software* para realizar una o más de las etapas de los métodos. Por ejemplo, un procesador puede ser un dispositivo lógico programable, tal como una matriz lógica programable (PAL), una matriz lógica genérica (GAL), una matriz de puertas programables en campo (FPGA) u otro tipo de dispositivo de procesamiento informático (CPD). Las instrucciones de *software* de dichos programas pueden representar algoritmos y estar codificadas en forma ejecutable por máquina en medios de almacenamiento no transitorio de datos digitales, por ejemplo, discos magnéticos u ópticos, memoria de acceso aleatorio (RAM), discos duros magnéticos, memorias flash y/o memoria de solo lectura (ROM), para permitir que

diversos tipos de procesadores o computadoras de datos digitales realicen una, múltiples o todas las etapas de uno o más de los métodos, o funciones, sistemas o aparatos descritos anteriormente en la presente.

[0086] Las porciones de ejemplos o formas de realización divulgados pueden referirse a productos informáticos de almacenamiento con un medio no transitorio legible por computadora que tiene un código de programa sobre este para realizar diversas operaciones implementadas por computadora que representan una parte de un aparato, dispositivo o realizan las etapas de un método establecido en la presente. La expresión "no transitorio" que se utiliza en la presente se refiere a todos los medios legibles por computadora excepto las señales transitorias y de propagación. Los ejemplos de medios no transitorios legibles por computadora incluyen, entre otros: medios magnéticos, tales como discos duros, disquetes y cinta magnética; medios ópticos, tales como discos de CD-ROM; medios magneto-ópticos, tales como disquetes, y dispositivos de *hardware* que están configurados especialmente para almacenar y ejecutar el código de programa, tales como dispositivos de ROM y RAM. Los ejemplos de código de programa incluyen código máquina, tal como el producido por un compilador, y archivos que contienen un código de nivel más alto que pueden ejecutarse por la computadora mediante el uso de un intérprete.

[0087] Al interpretar la divulgación, todos los términos deben interpretarse de la manera más amplia posible en coherencia con el contexto. En particular, las expresiones "comprende" y "que comprende" deben interpretarse como referidos a elementos, componentes o etapas de una manera no exclusiva, que indican que los elementos, componentes o etapas mencionados pueden estar presentes, o utilizados, o combinados con otros elementos, componentes o etapas que no están expresamente mencionados.

[0088] Las personas del oficio de nivel medio a la que se relaciona esta solicitud apreciarán que se pueden realizar adiciones, eliminaciones, sustituciones y modificaciones distintas y adicionales a las descritas en las formas de realización. También debe entenderse que la terminología utilizada en la presente es a los fines de describir solo formas de realización particulares, y no pretende ser limitativa, ya que el alcance de la presente divulgación solo estará limitado por las reivindicaciones. A menos que se defina lo contrario, todos los términos técnicos y científicos utilizados en la presente tienen el mismo significado que el que comúnmente entiende una persona del oficio de nivel medio al que pertenece esta invención. Aunque cualquier método o materiales similares o equivalentes a aquellos descritos en la presente también pueden

utilizarse en la práctica o el análisis de la presente divulgación, en la presente se describe una cantidad limitada de los métodos y materiales de ejemplo.

[0089] Los aspectos divulgados en la presente incluyen:

A. Un método para predecir una BHP de diseño de una bomba, que incluye: (1) seleccionar una RPM de diseño de la bomba, (2) calcular un número de K-R original con una viscosidad de un fluido y una velocidad de flujo original y una primera BHP de la bomba, en donde el cálculo se realiza en condiciones ambientales controladas, (3) generar un número de K-R normalizado con el número de K-R original y un número de K-R de BEP, y una velocidad de flujo normalizada con la velocidad de flujo original y una velocidad de flujo de BEP, en donde el número de K-R de BEP y la velocidad de flujo de BEP se calculan para la bomba con las especificaciones de rendimiento de agua, y (4) calcular la BHP de diseño para la RPM de diseño, en donde se determina una BHP de BEP para la RPM de diseño, y la BHP de diseño es igual a $((\text{la velocidad de flujo normalizada}^B * \text{la BHP de BEP}) / \text{el número de K-R normalizado})$, en donde B es igual a dos cuando la viscosidad es una viscosidad absoluta y B es igual a uno cuando la viscosidad es una viscosidad cinemática.

B. Un sistema para determinar una BHP de diseño de una bomba, que incluye: (1) una interfaz capaz de recibir especificaciones de referencia para la bomba y recibir entradas de usuario, y (2) un predictor de BHP, acoplado de manera comunicativa a la interfaz y la memoria, capaz de calcular uno o más tipos de números de K-R para una RPM de diseño, determinar los parámetros de BEP, convertir la viscosidad de fluido, convertir las velocidades de flujo, normalizar los números de K-R y las velocidades de flujo y calcular una BHP de diseño, con especificaciones de referencia.

C. Un producto de programa informático que tiene una serie de instrucciones de operación almacenadas en un medio no transitorio legible por computadora que dirige un aparato de procesamiento de datos cuando se ejecuta por este para realizar operaciones para predecir una BHP de diseño de una bomba, en donde las operaciones incluyen: (1) seleccionar una RPM de diseño de la bomba, (2) calcular un número de K-R original con una viscosidad de un fluido y una velocidad de flujo original y una primera BHP de la bomba, en donde el cálculo se realiza en condiciones ambientales controladas, (3) generar un número de K-R normalizado con el número de K-R original y un número de K-R de BEP, y una velocidad de flujo normalizada con la velocidad de flujo original y una velocidad de flujo de BEP, en donde el número de K-R de BEP y la velocidad de flujo de BEP se calculan para la bomba con las especificaciones de rendimiento de agua, y (4) calcular la BHP de diseño para la RPM de diseño, en donde

se determina una BHP de BEP para la RPM de diseño, y la BHP de diseño es igual a $((\text{la velocidad de flujo normalizada}^B * \text{la BHP de BEP}) / \text{el número de K-R normalizado})$, en donde B es igual a dos cuando la viscosidad es una viscosidad absoluta y B es igual a uno cuando la viscosidad es una viscosidad cinemática.

[0090] Cada uno de los aspectos A, B y C puede tener uno o más de los siguientes elementos adicionales en combinación. Elemento 1: en donde el número de K-R de BEP es un número de K-R de BEP normalizado. Elemento 2: generar un número de K-R de BEP de referencia con las especificaciones de rendimiento de agua y una RPM de referencia de la bomba. Elemento 3: modificar el número de K-R de BEP normalizado para la RPM de diseño. Elemento 4: en donde el número de K-R de BEP normalizado es igual a $(\text{el número de K-R de BEP de referencia} * (\text{la RPM de referencia} / \text{la RPM de diseño})^A)$. Elemento 5: en donde A es igual a cuatro cuando la viscosidad es una viscosidad absoluta. Elemento 6: A es igual a 2,5 cuando la viscosidad es una viscosidad cinemática. Elemento 7: ajustar las especificaciones de referencia con la RPM de diseño. Elemento 8: donde la velocidad de flujo ajustada es igual a $(\text{una velocidad de flujo de referencia} * (\text{la RPM de diseño} / \text{una RPM de referencia}))$. Elemento 9: una BHP ajustada es igual a $(\text{una BHP de referencia} * (\text{la RPM de diseño} / \text{una RPM de referencia})^3)$. Elemento 10: determinar el número de K-R de BEP normalizado con la velocidad de flujo ajustada y la BHP ajustada. Elemento 11: en donde la viscosidad es una viscosidad absoluta y la velocidad de flujo original es una velocidad de flujo de masa, y el cálculo del número de K-R original es igual a $(\text{la velocidad de flujo de masa}^{2,0}) / (\text{la BHP} * \text{la viscosidad absoluta})$. Elemento 12: en donde la viscosidad es una viscosidad cinemática y la velocidad de flujo original es una velocidad de flujo de masa, y el número de K-R original es igual a $(\text{la velocidad de flujo de masa} * \text{la viscosidad cinemática}^{0,5}) / (\text{la RPM de diseño}^{0,5} * \text{la BHP de BEP})$. Elemento 13: en donde la velocidad de flujo original es una velocidad de flujo volumétrico y el cálculo convierte la velocidad de flujo volumétrico en una velocidad de flujo de masa con una densidad del fluido. Elemento 14: en donde la bomba es una de una bomba centrífuga, una bomba rotativa, una bomba de desplazamiento positivo o una bomba de medición. Elemento 15: en donde la bomba se utiliza en un campo de la medicina, un campo de la química, un campo de la petroquímica o un campo de producción de hidrocarburos. Elemento 16: en donde la BHP de diseño se utiliza para predecir un parámetro de motor para la bomba, y la bomba es una de una bomba de lodo, una bomba de hidrocarburo, una bomba de lechada, una bomba hidráulica, una bomba de arena o una bomba de salmuera. Elemento 17: analizar un plan de operación de pozo con la BHP de diseño, la

bomba, la viscosidad del fluido y el parámetro de motor para determinar los parámetros de la bomba y una cantidad de etapas para la bomba. Elemento 18: en donde los parámetros de la bomba incluyen la RPM de diseño, un diámetro de etapa, una velocidad de flujo de diseño, un diseño hidráulico, un valor de cabezal y un manejo de viscosidad de fluido. Elemento 19: en donde el predictor de BHP es capaz además de realizar cálculos. Elemento 20: un número de K-R de BEP normalizado es igual a (un número de K-R de BEP de referencia * (una RPM de referencia * (una RPM de referencia / la RPM de diseño)⁵)). Elemento 21: un número de K-R original es igual a (una velocidad de flujo de masa^{2,0}) / (una BHP de BEP * una viscosidad absoluta). Elemento 22: un número de K-R original es igual a (una velocidad de flujo de masa * una viscosidad cinemática^{0,5}) / (la RPM de diseño^{0,5} * una BHP de BEP). Elemento 23: en donde el predictor de BHP es capaz además de implementar las leyes de afinidad. Elemento 24: una velocidad de flujo ajustada es igual a (una velocidad de flujo de referencia * (la RPM de diseño / una RPM de referencia)). Elemento 25: una BHP ajustada es igual a (una BHP de referencia * (la RPM de diseño / una RPM de referencia)³). Elemento 26: en donde la BHP de diseño se utiliza para predecir un parámetro de motor para la bomba, y la bomba es una de una bomba de lodo, una bomba de hidrocarburo, una bomba de lechada, una bomba hidráulica, una bomba de arena o una bomba de salmuera. Elemento 27: un analizador de sistema de pozo capaz de analizar un plan de operación de pozo con la BHP de diseño, la bomba, la viscosidad de fluido y el parámetro de motor para determinar los parámetros de la bomba y una cantidad de etapas para la bomba, en donde los parámetros de la bomba incluyen la RPM de diseño, un diámetro de etapa, la velocidad de flujo, un diseño hidráulico, un valor de cabezal y un manejo de viscosidad de fluido.