



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0911468-8 B1



(22) Data do Depósito: 29/04/2009

(45) Data de Concessão: 12/01/2021

(54) Título: MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO, E MÉTODO PARA DETERMINAR UMA OU MAIS CARACTERÍSTICAS DO FLUÍDO DE FLUXO DE UM FLUIDO DE FLUXO MULTIFÁSICO, E, DE FORMAR UM MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO

(51) Int.Cl.: G01F 1/84.

(30) Prioridade Unionista: 01/05/2008 US 61/049,664.

(73) Titular(es): MICRO MOTION, INC.

(72) Inventor(es): JOEL WEINSTEIN.

(86) Pedido PCT: PCT US2009042019 de 29/04/2009

(87) Publicação PCT: WO 2009/134830 de 05/11/2009

(85) Data do Início da Fase Nacional: 29/10/2010

(57) Resumo: MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO, E MÉTODOS PARA DETERMINAR UMA OU MAIS CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO DE FLUXO DE UM FLUIDO DE FLUXO MULTIFÁSICO, E, DE FORMAR UM MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO. Um medidor de fluxo vibratório (5) para determinar uma ou mais m características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico inclui um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B). O conjunto de medidor de fluxo (10) é configurado para gerar uma resposta de frequência muito baixa que está abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada para o fluido de fluxo, independente do tamanho de material estranho ou da composição de material estranho. O medidor (100) ainda inclui eletrônica do medidor (20) configurada para receber uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada e determinar uma ou mais características do fluido de fluxo a partir de uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e de uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada.

“MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO, E MÉTODOS PARA DETERMINAR UMA OU MAIS CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO DE FLUXO DE UM FLUIDO DE FLUXO MULTIFÁSICO, E, DE FORMAR UM MEDIDOR DE FLUXO VIBRATÓRIO”

5 **Antecedentes da Invenção**

1. Campo da Invenção

A presente invenção refere-se a um medidor de fluxo vibratório, e mais particularmente, a um medidor de fluxo vibratório para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico.

10 *2. Especificação do problema*

Medidores de fluxo vibratório, tais como medidores de fluxo de massa Coriolis e densitômetros vibratórios, tipicamente operam detectando movimento de um conduto vibrante que contém um fluido fluente ou não fluente. Propriedades associadas com o material no conduto, tais como fluxo de massa, densidade e semelhantes, podem ser determinadas processando sinais de
15 medição recebidos a partir de transdutores de movimento associados com o conduto. Os modos de vibração do sistema carregado com material vibrante geralmente são afetados pelas características combinadas de massa, rigidez e amortecimento do conduto contendo e do material contido no mesmo.

20 Um medidor de fluxo vibratório típico inclui um ou mais condutos que são conectados em linha em um duto ou outro sistema de transporte e transportam material, por exemplo, fluidos, pastas fluidas e semelhantes, no sistema. Um conduto pode ser visto como tendo um conjunto de modos de vibração naturais, incluindo, por exemplo, modos simples de flexão, torção,
25 radial e acoplado. Em uma aplicação de medição típica, um conduto é excitado em um ou mais modos de vibração à medida que um material flui através do conduto e movimento do conduto é medido em pontos espaçados ao longo do conduto. Excitação é tipicamente provida por um atuador, por exemplo, um

dispositivo eletromecânico, tal como um acionador de tipo bobina de voz, que perturba o conduto em uma maneira periódica. Densidade de fluido pode ser obtida determinando uma frequência ressonante do fluido de fluxo. Taxa de fluxo de massa pode ser determinada medindo-se o atraso de tempo ou diferenças de fase entre movimentos nos locais do transdutor. Dois tais transdutores (ou sensores de desvio) são tipicamente empregados a fim de medir uma resposta vibracional do conduto ou condutos de fluxo, e estão tipicamente localizados em posições à montante e à jusante do atuador. Os dois sensores de desvio são conectados a instrumentação eletrônica por cabeamento, tal como por dois pares independentes de fios. A instrumentação recebe sinais a partir dos dois sensores de desvio e processa os sinais a fim de derivar uma medição a taxa de fluxo de massa.

Medidores de fluxo são usados para efetuar medições de taxa de fluxo de massa e/ou densidade para uma ampla variedade de fluxos de fluido e oferece elevada precisão para fluxos de fase simples. Uma área em que medidores de fluxo vibratório são usados é na medição de produções de poço de óleo e gás. O produto de tais poços pode compreender um fluxo multifásico, incluindo líquidos, mas também incluindo gases e/ou sólidos que podem ser arrastados no fluido de fluxo. Um fluido de fluxo do campo petrolífero, portanto pode incluir óleo, água, ar ou outros gases, e/ou areia ou outros particulados sólidos, por exemplo. No entanto, quando um medidor de fluxo vibratório é usado para medir fluidos de fluxo incluindo gases e/ou sólidos arrastados, a precisão do medidor pode ser significativamente degradada. É altamente desejável que a medição resultante seja tão precisa quanto possível, mesmo para tais fluxos multifásicos.

Os fluidos de fluxo multifásico podem incluir gases arrastados, especialmente fluxos de gás borbulhante. Os fluxos multifásicos podem incluir sólidos arrastados ou partículas sólidas arrastadas, misturas tais como concreto,

etc. Além disso, fluxos multifásicos podem incluir líquidos de densidades diferentes, tais como água e componentes de petróleo, por exemplo. As fases podem ter diferentes densidades, viscosidades, ou outras propriedades.

Em um fluxo multifásico, a vibração de um conduto de fluxo não necessariamente move os gases/sólidos arrastados completamente em fase com o fluido de fluxo. Esta anomalia vibracional é referida como desacoplamento ou deslizamento. Bolhas de gás, por exemplo, podem tornar-se desacopladas do fluido de fluxo, afetando a resposta vibracional e quaisquer características de fluxo subsequentemente derivadas. Bolhas pequenas tipicamente movem-se com o fluido de fluxo à medida que o medidor de fluxo é vibrado. No entanto, bolhas maiores não movem com o fluido de fluxo durante vibração do conduto de fluxo. Ao contrário, as bolhas podem ser desacopladas do fluido de fluxo e podem mover-se independentemente, com bolhas de gases arrastados movendo-se mais longe e mais rápido do que o fluido de fluxo durante cada movimento vibracional. Isso adversamente afeta a resposta vibracional do medidor de vazão. Isto também acontece com partículas sólidas arrastadas no fluido de fluxo, onde as partículas de sólido são cada vez mais prováveis de dissociar do movimento do fluido de fluxo em tamanhos de partícula ou frequências vibracionais crescentes. O desacoplamento pode ainda ocorrer ainda onde o fluxo multifásico inclui líquidos de diferentes densidades e/ou viscosidades. A ação de desacoplamento foi verificada como sendo afetada por vários fatores, tais como a viscosidade do fluido de fluxo e a diferença em densidade entre o fluido de fluxo e o material estranho, por exemplo.

Além dos problemas causados pelo movimento relativo de bolhas e partículas, medidores Coriolis podem experimentar degradação de precisão de velocidade de som (SOS), ou compressibilidade, efeitos quando a velocidade sônica do fluido de medição é baixa ou a frequência de oscilação do medidor é elevada. Líquidos têm velocidades sônicas maiores que gases, mas as

velocidades mais baixas resultam de uma mistura dos dois. Mesmo uma pequena quantidade de gás arrastada em um líquido resulta em uma redução dramática na velocidade de som da mistura, abaixo da de ambas as fases.

A oscilação do tubo de fluxo produz ondas de som que oscilam na direção transversal na frequência de acionamento do medidor. Quando a velocidade de som do fluido é elevada, como em um fluido de fase simples, o primeiro modo acústico para ondas de som transversais através do conduto circular é em uma frequência muito maior que uma frequência de acionamento. No entanto, quando a velocidade de som cai devido à adição de gás para um líquido, uma frequência do modo acústico também cai. Quando a frequência do modo acústico e do modo de acionamento está próxima, erros de medidor resultam devido à excitação fora de ressonância do modo acústico pelo modo de acionamento.

Para medidores de frequência baixa e pressões de processo típicas, velocidades de efeitos de som estão presentes em fluxos multifásicos, mas são geralmente negligenciáveis com relação à precisão especificada do medidor. No entanto, para medidores Coriolis de frequência elevada operando em baixas pressões com fluidos borbulhantes, a velocidade de som pode ser baixa o suficiente para causar significantes erros de medição devido à interação entre modos de acionamento e vibração de fluido.

O tamanho das bolhas pode variar, dependendo da quantidade de gás presente, a pressão do fluido de fluxo, temperatura, e o grau de mistura do gás no fluido de fluxo. A extensão da diminuição em desempenho não está apenas relacionada a quanto gás total está presente, mas também ao tamanho das bolhas de gás individuais no fluxo. O tamanho das bolhas afeta a precisão da medição. Bolhas maiores ocupam mais volume e desacoplam para outra extensão, conduzindo a flutuações na densidade e densidade medida do fluido de fluxo. Devido à compressibilidade de um gás, as bolhas podem mudar em

quantidade de gás, ou massa, ainda não necessariamente mudam em tamanho. Inversamente, se a pressão muda, o tamanho de bolha pode mudar de modo correspondente, expandindo à medida que a pressão cai ou contraindo à medida que a pressão aumenta. Isso pode também causar variações na frequência natural ou ressonante do medidor de fluxo.

Medidores de fluxo vibratório de técnica anterior são tipicamente projetados para operar em frequências em torno de 100 a 300 Hertz (Hz), com alguns medidores operando em frequências entre 500 e 1.000 Hz. A frequência de operação em um medidor de fluxo vibratório de técnica anterior é tipicamente escolhida a fim de facilitar o projeto de medidor de fluxo, produção, e operação. Por exemplo, um medidor de fluxo vibratório ou Coriolis de técnica anterior é configurado para ser fisicamente compacto e substancialmente uniforme em dimensões. Por exemplo, uma altura de um medidor de fluxo de técnica anterior é tipicamente menor que o comprimento, dando uma razão de aspecto de altura-para-comprimento baixa (H/L) e a correspondente frequência de acionamento elevada. Usuários de medidor de fluxo preferem um tamanho global pequeno de modo que instalação é simplificada. Além disso, projeto de medidor de fluxo comumente assume um fluxo de fluido de fase simples uniforme e é projetado para otimamente operar com tal fluido de fluxo uniforme.

Na técnica anterior, medidores de fluxo tipicamente têm uma baixa razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L). Um medidor de fluxo de conduto reto tem uma razão de aspecto de altura-para-comprimento de zero, que tipicamente produz uma frequência de acionamento elevada. Condutos de fluxo curvados são frequentemente usados para evitar que o comprimento seja a dimensão dominante e aumentar a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L). No entanto, medidores de fluxo de técnica anterior não são projetados com razões de aspecto elevadas. Um medidor de fluxo de conduto

encurvado ou arqueado na técnica anterior pode ter uma razão de aspecto de altura-para-comprimento se aproximando de 1.3, por exemplo.

Permanece uma necessidade na técnica para um medidor de fluxo vibratório que seja capaz de medir de modo preciso e confiável fluidos de fluxos multifásicos.

Aspectos da Invenção

Em um aspecto da invenção, um medidor de fluxo vibratório para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico compreende:

um conjunto de medidor de fluxo incluindo um ou mais condutos de fluxo com o conjunto de medidor de fluxo sendo configurado para gerar uma resposta de frequência muito baixa que está abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada para o fluido de fluxo e para gerar uma resposta de frequência muito elevada que está acima da frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo, independente do tamanho de material estranho ou da composição de material estranho; e

eletrônica do medidor acoplada ao conjunto de medidor de fluxo e configurada para receber uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada e determinar a uma ou mais características do fluido de fluxo a partir da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada.

Preferivelmente, a eletrônica do medidor é configurada de modo que uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) é cerca de 1:1 para uma frequência muito baixa e é configurada de modo que uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) é cerca de 3:1 para gases arrastados a uma frequência muito elevada e é cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para sólidos arrastados na frequência muito elevada.

Preferivelmente, a eletrônica do medidor é configurada de modo que uma viscosidade é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo a uma frequência muito baixa e é configurada de modo que uma viscosidade é efetivamente zero com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo na frequência muito elevada.

Preferivelmente, a frequência muito baixa está abaixo de um limiar de SOS/compressibilidade mínimo pré-determinado, independente de um tamanho de material estranho ou de uma composição de material estranho.

Preferivelmente, a resposta vibracional de frequência muito baixa corresponde a um número Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e a resposta vibracional de frequência muito elevada corresponde a um número Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de 0,1.

Preferivelmente, o um ou mais condutos de fluxo são configurados para alcançar a frequência muito baixa e a frequência muito elevada por configuração de um ou mais dentre rigidez do conduto de fluxo, comprimento do conduto de fluxo, razão de aspecto do conduto de fluxo, material de conduto de fluxo, espessura do conduto de fluxo, formato do conduto de fluxo, geometria do conduto de fluxo, ou uma ou mais posições do nó vibracional.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de flexão.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais é comparada a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

Preferivelmente, o conjunto de medidor de fluxo compreende dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo que são vibrados para gerar a resposta de frequência muito baixa e a resposta de frequência muito elevada.

Em um aspecto da invenção, um método para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico compreende:

5 vibrar um conjunto de medidor de fluxo vibratório em uma ou mais frequências muito baixas que estão abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada para o fluido de fluxo e vibrar o conjunto de medidor de fluxo em uma ou mais frequências muito elevadas que estão acima de uma frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo, independente do tamanho de material estranho ou da
10 composição de material estranho;

receber uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada; e

determinar a uma ou mais características do fluido de fluxo a partir da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada.
15

Preferivelmente, a uma ou mais frequências muito baixas resultam em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 1:1 e a uma ou mais frequências muito elevadas resultam em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 3:1 para gases arrastados e cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para
20 sólidos arrastados.

Preferivelmente, a uma ou mais frequências muito baixas resultam em uma viscosidade que é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo e a uma ou mais frequências muito baixas resultam em uma viscosidade que é efetivamente zero.

25 Preferivelmente, a uma ou mais frequências muito baixas estão abaixo de um limiar de SOS/compressibilidade mínimo pré-determinado, independente de um tamanho de material estranho ou de uma composição de material estranho.

Preferivelmente, a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa correspondem a um número de Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada correspondem a um número de Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de 0,1.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de flexão.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais são comparadas a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

Preferivelmente, vibrar o conjunto de medidor de fluxo vibratório em uma ou mais frequências muito baixas e em uma ou mais frequências muito elevadas compreende vibrar dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo vibratório.

Em um aspecto da invenção, um método de formar um medidor de fluxo vibratório para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico compreende:

determinar pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa e pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada para o medidor de fluxo vibratório com base em pelo menos um fluido de fluxo esperado, com a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa estando abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada e com a pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada estando acima de uma frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo, independente de um tamanho de material estranho ou de uma composição de material estranho;

selecionar uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo com base em pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa e em pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada, com a uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo sendo selecionadas para substancialmente alcançar a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa e a pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada; e

construir o medidor de fluxo vibratório empregando a selecionada uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo.

Preferivelmente, a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa resulta em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 1:1 e a pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada resulta em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 3:1 para gases arrastados e cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para sólidos arrastados.

Preferivelmente, a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa resulta em uma viscosidade que é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo e a pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada resulta em uma viscosidade que é efetivamente zero.

Preferivelmente, a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa está abaixo de um limiar de SOS/compressibilidade mínimo pré-determinado, independente de um tamanho de material estranho ou de uma composição de material estranho.

Preferivelmente, a pelo menos uma frequência pré-determinada muito baixa corresponde a um número Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e a pelo menos uma frequência muito elevada pré-determinada corresponde a um número Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de 0,1.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de

flexão.

Preferivelmente, o medidor de fluxo vibratório é operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais são comparadas a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

Preferivelmente, vibrar o conjunto de medidor de fluxo vibratório em uma ou mais frequências muito baixas e em uma ou mais frequências muito elevadas compreende vibrar dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo vibratório.

10 Descrição dos Desenhos

O mesmo número de referência representa o mesmo elemento em todos os desenhos. Deve ser entendido que os desenhos não estão necessariamente em escala.

FIG. 1 mostra um medidor de fluxo vibratório de acordo com a invenção.

FIG. 2 mostra um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa de acordo com uma forma de realização da invenção.

FIG. 3 é um gráfico de efeito de desacoplamento contra frequência para frequências de operação muito baixas até 100 Hz no exemplo mostrado no gráfico.

FIG. 4 é um gráfico correspondente de ângulo de fase de desacoplamento (φ) contra frequência para frequências de operação muito baixas até 100 Hz no exemplo mostrado no gráfico.

FIG. 5 é um gráfico de razão de desacoplamento contra razão de densidade para o medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa ou muito elevada de acordo com a invenção.

FIG. 6 mostra uma porção do medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa de acordo com a invenção.

FIG. 7 mostra um diagrama de corpo livre simples que ilustra a fonte de erros em fluxo multifásico em medidores de fluxo vibratório.

FIG. 8 descreve o movimento de uma partícula relativamente leve de raio a dentro de um tubo de um medidor de fluxo vibratório cheio com um fluido de fluxo mais denso.

FIG. 9 mostra um movimento relativo total entre a partícula e fluido em uma oscilação de um quarto único do tubo de fluxo, incluindo a mudança de localização do centro de gravidade (CG).

FIG. 10 mostra as localizações do CG das partículas e dos componentes líquidos.

FIG. 11 é um gráfico de erro de densidade de desacoplamento contra densidade de partícula.

FIG. 12 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para viscosidade de fluido contra tamanho de partícula.

FIG. 13 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para viscosidade de fluido contra densidade de partícula.

FIG. 14 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para amplitude de conduto contra frequência vibracional.

FIG. 15 é um gráfico que mostra resultados de simulação de erro de densidade total de um modo de frequência muito baixa, um modo de frequência média, e um modo de frequência muito elevada de um medidor de fluxo Coriolis.

FIG. 16 mostra um medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada de acordo com uma forma de realização da invenção.

FIG. 17 é um fluxograma de um método para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico de acordo com a invenção.

Descrição Detalhada da Invenção

FIGS. 1-17 e a seguinte descrição descrevem exemplos específicos para ensinar aos versados na técnica como fazer e usar o melhor modo da invenção. Para o propósito de ensinar princípios inventivos, alguns aspectos convencionais foram simplificados ou omitidos. Os versados na técnica apreciarão variações a partir desses exemplos que estão dentro do escopo da invenção. Os versados na técnica apreciarão que os aspectos descritos abaixo podem ser combinados de várias formas para formar variações múltiplas da invenção. Como um resultado, a invenção não é limitada a exemplos específicos descritos abaixo, mas apenas pelas reivindicações e seus equivalentes.

FIG. 1 mostra um medidor de fluxo vibratório 5 de acordo com a invenção. O medidor de fluxo vibratório 5 é projetado para medir características de fluido de um fluido de fluxo, incluindo medir quer um fluido de fluxo fluindo ou estacionário. O medidor de fluxo vibratório 5 em uma forma de realização compreende um medidor de vazão Coriolis. Em outra forma de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 compreende um densitômetro vibratório.

O medidor de fluxo vibratório 5 inclui um conjunto de medidor de fluxo 10 e eletrônica do medidor 20. Uma eletrônica do medidor 20 é conectada ao conjunto de medidor 10 através de fios condutores 100 e é configurada para prover medições de uma ou mais dentre densidade, taxa de fluxo de massa, taxa de fluxo de volume, fluxo de massa totalizado, temperatura, e outra informação sobre uma via de comunicação 26. Deve estar evidente para os versados na técnica que a presente invenção pode ser usada em qualquer tipo de medidor de fluxo vibratório independentemente do número de acionadores, sensores de desvio, condutos de fluxo, ou o modo de operação de vibração. Deve ser reconhecido que o medidor de fluxo 5 pode compreender um densitômetro vibratório e/ou um medidor de fluxo de massa Coriolis.

O conjunto de medidor de fluxo 10 inclui um par de flanges 101 e 101', coletores 102 e 102', um acionador 104, sensores de desvio 105 e 105', e condutos de fluxo 103A e 103B. O acionador 104 e os sensores de desvio 105 e 105' são conectados aos condutos de fluxo 103A e 103B.

5 Em uma forma de realização, os condutos de fluxo 103A e 103B compreendem substancialmente condutos de fluxo em formato em U, como mostrado. Alternativamente, em outras formas de realização, os condutos de fluxo podem compreender substancialmente condutos de fluxo retos. No entanto, outros formatos podem ser usados e estão dentro do escopo da
10 descrição e reivindicações.

Os flanges 101 e 101' são presos nos coletores 102 e 102' (*manifold*). Os coletores 102 e 102' podem ser presos às extremidades opostas de um espaçador 106. O espaçador 106 mantém o espaçamento entre os coletores 102 e 102' a fim de prevenir vibrações indesejadas nos condutos de
15 fluxo 103A e 103B. Quando o conjunto de medidor de fluxo 10 é inserido em um sistema de conduto (não mostrado) que carrega o fluido de fluxo sendo medido, o fluido de fluxo entra o conjunto de medidor de fluxo 10 através do flange 101, passa através do coletor de entrada 102 onde a quantidade total de fluido de fluxo é direcionada para entrar nos condutos de fluxo 103A e 103B,
20 flui através dos condutos de fluxo 103A e 103B e volta para o coletor de saída 102', onde ela sai do conjunto de medidor 10 através do flange 101'.

Os condutos de fluxo 103A e 103B são selecionados e apropriadamente montados para o coletor de entrada 102 e para o coletor de saída 102' de modo a ter substancialmente a mesma distribuição de massa, momentos de inércia, e módulos elásticos sobre os eixos de flexão W--W e
25 W'--W' respectivamente. Os condutos de fluxo 103A e 103B estendem-se para fora a partir dos coletores 102 e 102' de uma maneira essencialmente paralela.

Os condutos de fluxo 103A e 103B são acionados pelo acionador

104 em direções opostas em torno dos respectivos eixos de flexão W e W' e no qual é chamado o primeiro modo de flexão fora de fase do medidor de fluxo 5. No entanto, os condutos de fluxo 103A e 103B podem alternativamente ser vibrados em um segundo modo de flexão fora de fase ou maior, se desejado.

5 Isso pode ser feito para atividades de calibração ou testes de viscosidade de fluido, ou para obter valores de medição em diferentes frequências vibracionais. O acionador 104 pode compreender uma de muitas disposições bem conhecidas, tal como um magneto montado ao conduto de fluxo 103A e uma bobina oposta montada ao conduto de fluxo 103B. Uma corrente alternada
10 é passada através da bobina oposta para levar ambos os condutos a oscilar. Um sinal de acionamento apropriado é aplicado por uma eletrônica do medidor 20 ao acionador 104 através do fio condutor 110.

A eletrônica do medidor 20 recebe sinais de sensor nos fios condutores 111 e 111', respectivamente. A eletrônica do medidor 20 produz um
15 sinal de acionamento no fio condutor 110 que leva o acionador 104 a oscilar os condutos de fluxo 103A e 103B. A eletrônica do medidor 20 processa os sinais de velocidade de esquerda e direita a partir dos sensores de desvio de desvio 105 e 105' a fim de computar uma taxa de fluxo de massa. A via de comunicação 26 provê um meio de entrada e um de saída que permite a
20 eletrônica do medidor 20 interfacear com um operador ou com outros sistemas eletrônicos. A descrição de FIG. 1 é provida meramente como um exemplo da operação de um medidor de fluxo vibratório e não é destinada a limitar o ensinamento da presente invenção.

Quando operando como um densitômetro, o medidor de fluxo 5
25 pode medir a densidade de fluxos de fase simples ou multifásicos. A medição da densidade de fluxo multifásico é problemática, conforme a medição de densidade será afetada pelos componentes do fluxo multifásico, quer incluindo gases arrastados ou sólidos arrastados. O medidor de fluxo 5 medirá a

densidade da mistura, mas é tipicamente desejado que a medição de densidade seja a densidade de apenas o(s) componente(s) líquido(s), como quaisquer gases arrastados ou sólidos comumente compreenderão componentes não desejados. Não apenas das bolhas ou sólidos causa uma mudança na densidade real de mistura, desacoplamento e outros mecanismos de erro multifase causam erro adicional longe da densidade de mistura.

Densidade é medida em um medidor de fluxo vibratório determinando a frequência ressonante (isto é, natural) de oscilação de conduto de fluxo. Quanto maior a densidade do fluido de fluxo, maior a massa do conjunto de medidor de fluxo 10 e menor a frequência natural do conjunto de medidor de fluxo 10 como um todo. A medição de densidade do medidor de fluxo 5 é independente do taxa de fluxo e pode ser realizada com um fluido fluente ou não fluente.

O medidor de fluxo 5 pode medir a densidade quando dois ou mais componentes estão presentes e podem gerar uma densidade de mistura ($\rho_{mistura}$) para um fluido de fluxo multifásico. Se for assumido que não existem erros devido ao desacoplamento, assimetrias, velocidade de som, ou outros efeitos multifase, a densidade medida por um medidor vibratório estará muito próxima da densidade real de mistura, como mostrado em equação (1), abaixo. Se as densidades dos componentes de fluxo são conhecidas, então uma taxa de fluxo de massa de componentes individuais pode ser estimada, assumindo nenhum deslizamento de bolha. Os termos (φ) representam frações de volume dos componentes. As frações individuais devem somar até unidade.

$$\rho_{mistura} = \rho_{fluido}\varphi_{fluido} + \rho_{particula}\varphi_{particula} + \dots \quad (1)$$

Um usuário interessado em medir apenas a densidade de líquido irá incorrer em um erro proporcional à fração de volume se uma fase arrastada simples está presente. O erro de densidade para um fluido de fluxo multifásico pode ser representado como:

$$\rho_{\text{erro}} = \rho_{\text{mistura}} - \rho_{\text{fluido}} = \phi_{\text{partícula}} (\rho_{\text{partícula}} - \rho_{\text{fluido}}) \quad (2)$$

Por exemplo, se um usuário espera uma densidade de líquido de 1000 kg/m³, mas o fluido tem fração de volume 10% de gás arrastado, um medidor de fluxo de massa Coriolis de técnica anterior (operando a uma frequência vibracional de técnica anterior) irá medir aproximadamente 900 kg/m³, dando um erro de densidade de (-100) kg/m³. Mesmo que o medidor de técnica anterior tenha corretamente medido a densidade de mistura, incluindo ambos, o componente líquido e o componente de gás, o usuário interpreta isso como um erro de -10% a partir da densidade de líquido desejada. A taxa de fluxo de volume é subsequentemente encontrada dividindo a taxa de fluxo de massa multifase medida pela densidade multifase medida, assim a taxa de fluxo da mistura de volume é cerca de 10% maior que a taxa de fluxo de líquido. No entanto, o usuário deseja tipicamente um fluxo de massa ou taxa de fluxo de volume de apenas o componente líquido do fluido de fluxo multifásico.

O erro em densidade é ainda composto por erros devido a efeitos de desacoplamento e efeitos de SOS/compressibilidade, ambos sendo devido à vibração do fluido de fluxo multifásico. Vibração de uma fase simples não irá exibir os efeitos de desacoplamento e de SOS/compressibilidade.

Erros de medição são exacerbados em um fluido de fluxo multifásico incluindo gás arrastado. Gás arrastado exibirá mais efeitos de desacoplamento e mais de SOS/compressibilidade do que irão exibir os sólidos arrastados. Isso é devido à grande diferença em densidade entre gás e líquido, que resulta em movimento relativo entre as fases, e devido à compressibilidade da mistura, que resulta em respostas vibracionais fora de ressonância não desejadas. Sólidos arrastados não sofrerão de efeitos de compressibilidade, mas exibirão erros devido aos efeitos de desacoplamento e viscosidade. O efeito de desacoplamento para sólidos são menos severos que para gases, mas ainda afetarão as medições.

Erros de medição são dirigidos aqui por operação do medidor de fluxo 5 em frequências vibracionais específicas, frequências que produzem efeitos conhecidos de desacoplamento, e de compressibilidade. Foi verificado que a operação do medidor de fluxo 5 nesses extremos vibracionais permite a determinação de medições corretas para densidade, fluxo de massa, e outras variáveis.

Foi verificado que em frequências vibracionais muito baixas, o desacoplamento do material estranho, quer gás ou sólidos, é praticamente não existente e a razão de desacoplamento é cerca de 1:1, isto é, os gases arrastados ou partículas sólidas se movem na mesma distância como o componente líquido do fluido de fluxo. Similarmente, em frequências vibracionais muito baixas, a viscosidade do fluido de fluxo age como se fosse aproximadamente infinita, em que o material estranho arrastado move-se com o fluido de fluxo. Além disso, em frequências vibracionais muito baixas não existem efeitos de SOS/compressibilidade. Como um resultado, a razão de desacoplamento (A_p/A_f) pode ser assumida como sendo um, a compressão pode ser assumida como sendo zero (em que a velocidade de som (c) é assumida como sendo a SOS do fluido de fluxo), e a viscosidade é assumida como sendo um valor infinito (isto é, similar a um sólido).

Deve ser entendido que a abordagem mais comum e menos difícil e menos cara é evitar fluidos de fluxos multifásicos. No entanto, isso não é sempre prático ou possível. A abordagem discutida aqui não é evitar desacoplamento de multifase e efeitos de SOS/compressibilidade, mas ao contrário operar o medidor de fluxo de tal forma como para gerar um efeito de erro conhecido e substancialmente constante. Como um resultado, derivações de medições de fluxo são simplificadas. Erros em medição podem então ser removidos.

Foi verificado que em frequências vibracionais muito elevadas, os

efeitos de desacoplamento podem alcançar um limite superior. Este limite superior proporciona benefícios até então não reconhecidos. O desacoplamento é, portanto, conhecido e previsível. Por exemplo, para gás arrastado, o desacoplamento se aproxima de cerca de uma razão de desacoplamento de 3:1, em que bolhas de gás movem-se em cerca de três vezes a distância que o componente líquido do fluido de fluxo se movimenta. Para sólidos arrastados, em frequências vibracionais muito elevadas, a razão de desacoplamento será quase igual à quantidade $3/(1+(2 \cdot \rho_p/\rho_f))$. Se a densidade da partícula sólida é muito maior do que a do líquido, então as partículas sólidas arrastadas permanecerão substancialmente estacionárias enquanto o componente líquido move-se com a vibração do conduto de fluxo. Em frequências vibracionais muito elevadas, a viscosidade do fluido de fluxo age como se fosse aproximadamente zero, com a matéria estranha arrastada não sendo restringida pela viscosidade de fluido.

Compressibilidade não se aplicará a sólidos arrastados. Consequentemente, o medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada pode ser vibrado a uma frequência igual a ou maior do que a frequência de limite superior para o desacoplamento. Quaisquer efeitos resultantes de SOS/compressibilidade podem ser compensados pelo uso de técnicas convencionais.

Líquidos têm velocidades sônicas maiores que gases, mas as velocidades mais baixas resultam de uma mistura dos dois. A adição de uma quantidade ainda pequena de gás a um líquido resulta em uma redução dramática na velocidade de som da mistura abaixo da de ambas as fases. Uma quantidade pequena de gás dramaticamente aumenta compressibilidade de mistura, enquanto a densidade de mistura permanece próxima àquela do líquido.

Quando uma velocidade de som do fluido é elevada, como em um

fluido de fase simples, o primeiro modo acústico para ondas de som transversais através do conduto circular está em uma frequência muito maior que uma frequência de acionamento. No entanto, quando a velocidade de som cai devido à adição de gás a um líquido, uma frequência do modo acústico também cai.

Para medidores de frequência baixa e pressões de processo típicas, velocidades de efeitos de som estão presentes em fluxos multifásicos, mas são geralmente negligenciáveis com relação à precisão especificada do medidor. No entanto, para medidores de fluxo vibratório de frequência elevada operando a baixas pressões com fluidos borbulhantes, a velocidade de som pode ser baixa o suficiente para causar significantes erros de medição devido à interação entre modos de acionamento e vibração de fluido.

Uma explicação mais física de efeitos de velocidade de som em medidores de fluxo vibratório é que o fluido no tubo é comprimido contra a parede exterior do tubo em cada oscilação, quando a compressibilidade da mistura é elevada o suficiente para permitir tal movimento. Dessa forma, efeitos de velocidade de som são similares a efeitos de desacoplamento em que o erro real é causado por movimento da localização do centro de gravidade. A diferença é que efeitos de velocidade de som resultam em fluido mais pesado empurrado para as paredes exteriores do tubo enquanto desacoplamento resulta em fluido mais pesado empurrado para as paredes interiores do tubo. Por essa razão, erros de velocidade de som são positivos e erros de desacoplamento são negativos.

Consequentemente, o medidor de fluxo pode ser operado em quer uma frequência muito baixa ou em uma frequência muito elevada. As médias resultantes podem ser empregadas como discutido abaixo (ver FIG. 17 e a discussão anexa). As suposições acima ou valores conhecidos pode ser usado a fim de derivar densidade melhorada e/ou medições de fluxo de massa, entre

outras coisas.

O medidor de fluxo vibratório 5 é projetado para medir de modo preciso e confiável o fluido de fluxo quando o fluido de fluxo compreende múltiplas fases. O fluido de fluxo multifásico pode incluir gases arrastados em algumas formas de realização, em que os gases arrastados podem compreender um fluxo borbulhante. Os gases arrastados podem incluir bolhas de ar ou bolhas de vários tamanhos. Gás arrastado é problemático em medidores de fluxo vibratório de técnica anterior. O gás arrastado, especialmente para bolhas moderadas a grandes, pode se mover independentemente do fluido de fluxo e causar erros de medição ou incertezas. Além disso, os gases arrastados podem causar efeitos de medição variantes devido à compressibilidade do gás variando com a pressão de operação do fluido de fluxo.

O fluido de fluxo multifásico pode incluir sólidos arrastados em algumas formas de realização, em que os sólidos arrastados podem compreender uma pasta fluida. Um exemplo compreende partículas de areia e sujeira em um fluxo de petróleo. Os sólidos arrastados podem mover-se independentemente do fluido de fluxo e causar erros de medição e/ou incertezas.

Em algumas formas de realização, o fluxo multifásico pode incluir líquidos diferentes, tais como líquidos imiscíveis que não podem ser misturados juntos. Por exemplo, o fluido de fluxo pode incluir ambos, água e óleo. Onde os componentes de fluxo de fluido têm densidades diferindo, os componentes de fluxo de fluido podem experimentar algum desacoplamento durante vibração do medidor de fluxo. Os objetos estranhos podem ser menos densos que o fluido de fluxo. Os objetos estranhos podem ser mais densos que o fluido de fluxo.

Em operação, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser vibrado a uma frequência muito baixa e/ou a frequência muito elevada. A frequência

muito baixa pode compreender uma primeira vibração de modo de flexão. No entanto, outros modos vibracionais são contemplados e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações. Por exemplo, em algumas formas de realização o conjunto de medidor de fluxo 10 pode ser acionado fora de ressonância em uma frequência baixa pré-determinada, em que a taxa de fluxo de massa (e/ou outras características de fluxo) são subsequentemente medidas. A frequência baixa pré-determinada pode, portanto ser menor que a frequência ressonante. A medição do fluxo de massa resultante será substancialmente imune a efeitos de desacoplamento e SOS e podem ser determinadas através de medição de fase na frequência baixa pré-determinada. A frequência baixa pré-determinada pode ser escolhida para corresponder a um número de Stokes inverso (δ) maior do que um valor de limiar selecionado para substancialmente eliminar erros multifásicos. Medição de densidade em uma frequência fora de ressonância não será possível devido ao fato que uma frequência foi especificamente escolhida ao invés de medida. O desafio desse tipo de operação é que a amplitude de resposta do conduto será pequena devido à vibração fora de ressonância. No entanto, esse desafio pode ser superado colocando força de acionamento adicional ou tirando uma média das medições de fase para ajudar a rejeitar ruído.

O fluido de fluxo pode ser quer estacionário ou fluente, como previamente discutido. Como um resultado, quando vibrados em uma frequência muito baixa, o medidor de fluxo 5 produz uma resposta vibracional de frequência muito baixa.

Alternativamente, o medidor de fluxo 5 pode produzir uma resposta vibracional de frequência muito elevada. A frequência muito elevada pode compreender uma primeira vibração de modo de flexão. Alternativamente, uma frequência muito elevada pode compreender uma segunda, terceira, ou maior vibração de modo de flexão. No entanto, outras

vibrações, tal como vibrações fora de ressonância, são contempladas e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações. Como um resultado, o medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada 5 produz uma resposta vibracional de frequência muito elevada. Uma resposta vibracional de frequência muito elevada é processada a fim de determinar, por exemplo, a frequência de resposta, uma amplitude de resposta, e a resposta de atraso de fase entre os sensores. A frequência de resposta muito elevada pode ser usada para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo, incluindo a taxa de fluxo de massa, densidade, viscosidade, etc.

A frequência muito baixa ou resposta vibracional de frequência muito elevada é processada a fim de determinar pelo menos uma frequência de resposta. A frequência de resposta pode ser usada para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo, incluindo a taxa de fluxo de massa, densidade, viscosidade, etc. A natureza de frequência muito baixa e/ou frequência muito elevada do medidor de fluxo 5 é ainda discutida abaixo.

Uma vantagem do medidor de fluxo vibratório 5 é que o medidor de fluxo 5 em algumas formas de realização pode ser operado em frequências mais elevadas, se desejado. Isso pode ser feito onde nenhum fluxo multifásico é esperado. Por exemplo, se o medidor de fluxo 5 é instalado à jusante de um dispositivo separador, então o fluido de fluxo pode ser aceitavelmente uniforme e livre de material estranho arrastado. Em tal situação, o medidor de fluxo 5 pode ser operado em frequências mais elevadas, tal como um segundo, terceiro, ou quarto modo de flexão, etc, onde os modos de flexão de maior ordem compreendem múltiplos ou harmônicos da frequência ressonante de medidor, por exemplo.

Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser operado em frequências vibracionais múltiplas. As frequências vibracionais múltiplas podem incluir vibrar o conjunto de medidor de fluxo 10

em frequências alternantes ou em diferentes frequências em diferentes tempos. Alternativamente, o conjunto de medidor de fluxo 10 pode ser simultaneamente vibrado em frequências vibracionais múltiplas.

Medições de fluxo de massa múltiplo obtidas em diferentes frequências ressonante ou fora de ressonância podem ser comparadas para determinar se um fluxo multifásico existe e para determinar uma magnitude de erro multifásico. Por exemplo, se medições de fluxo de massa obtidas a 10, 20 e 30 Hz são substancialmente idênticas, mas uma medição de fluxo de massa obtida a 40 Hz significativamente desvia a partir das medições prévias, então pode ser determinado que erros multifásicos estão ocorrendo em algum local acima da frequência vibracional de 30 Hz, e uma indicação multifásica pode ser gerada.

A frequência de acionamento é uma frequência em que o um ou mais condutos de fluxo 103A e 103B são vibrados a fim de medir características de fluxo do fluido de fluxo. A frequência de acionamento pode ser selecionada para estar em uma frequência ressonante de fluido de fluxo, por exemplo, ou pode compreender um ou mais harmônicos de frequência ressonante, frequências de modo de flexão mais elevadas, ou frequência fora de ressonância acima de ou abaixo da frequência ressonante. Portanto, a frequência de acionamento pode diferir de uma frequência de resposta vibracional e pode variar de acordo com a composição do fluido de fluxo. Além disso, a frequência de acionamento é afetada pela característica de rigidez do medidor de vazão. À medida que a característica de rigidez aumenta, a frequência de acionamento irá aumentar. Como um resultado, abaixando a rigidez do conduto de fluxo resultará em uma menor frequência ressonante de conduto de fluxo. A rigidez do conduto de fluxo pode ser mudada em uma variedade de formas, como discutido abaixo.

As capacidades de frequência muito baixa ou frequência muito

elevada do medidor de fluxo 5 podem ser alcançadas através de parâmetros de projeto apropriados. A consideração básica em produzir o medidor de fluxo vibratório 5 é que a rigidez de modo de flexão efetiva de medidor pode ser mudada a fim de modificar a frequência de operação e/ou frequência ressonante (ou natural). A mudança em rigidez de medidor pode ser alcançada de qualquer maneira e não é importante como a mudança de rigidez de medidor é realizada. No entanto, várias formas prováveis estão discutidas abaixo.

Um fator em rigidez de medidor é um comprimento do conduto de fluxo. O comprimento de medidor de fluxo é substancialmente correlacionado com a rigidez do medidor, em que aumentar o comprimento de medidor será traduzido em alguma diminuição em rigidez de medidor e frequência operacional. Consequentemente, o comprimento de medidor de fluxo pode ser escolhido a fim de alcançar pelo menos alguma mudança da rigidez de medidor.

Um fator em rigidez de medidor é uma razão de aspecto do conduto de fluxo. Para propósitos dessa discussão, a razão de aspecto de medidor de fluxo é definida como uma altura (h) de medidor de fluxo dividida pelo comprimento de medidor de fluxo (L), onde a razão de aspecto = (H/L) (ver FIG. 2). Onde a altura (H) é menor que o comprimento (L), a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) será menor que um. Onde o medidor de fluxo é medidor de fluxo direto, a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) será efetivamente zero. Onde a altura (H) é maior do que o comprimento (L), a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) será maior do que um. Por exemplo, no medidor de fluxo 5 de FIG. 2, a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) será significativamente maior que um e pode alcançar um número relativamente elevado. Como uma consequência, a razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) pode ser aumentada a fim de reduzir rigidez de medidor e pode ser reduzida a fim de aumentar a rigidez

do medidor.

Alguns fabricantes de medidor de fluxo usam uma convenção oposta compreendendo uma razão de aspecto de comprimento-para-altura (L/H). Um medidor de fluxo de tubo reto sob tal convenção teria uma razão de aspecto comprimento-para-altura que se aproximaria ao infinito, tornando essa convenção de razão de aspecto ser relativamente inútil.

Um fator em rigidez de medidor é um material de conduto de fluxo. O material de conduto de fluxo pode ser selecionado a fim de aumentar ou diminuir a rigidez do medidor.

Um fator em rigidez de medidor é espessura do conduto de fluxo. A espessura do conduto de fluxo pode ser mudada a fim de modificar a rigidez do medidor. No entanto, como uma matéria prática, reduções substanciais em espessura do conduto de fluxo podem resultar em uma capacidade de pressão reduzida e em uma durabilidade ou robustez inapropriada.

Um fator em rigidez de medidor é um formato do conduto de fluxo. O formato do conduto de fluxo pode ser modificado de qualquer maneira desejável, incluindo usando condutos de substancialmente redondos, elípticos, retangulares, irregulares, ou outros formatos apropriados.

Um fator em rigidez de medidor é a geometria do conduto de fluxo. A geometria do conduto de fluxo pode ser afetada de qualquer maneira desejável, incluindo o uso de seções retas e curvadas apropriadas, por exemplo. Por exemplo, um conduto de fluxo em formato de U tem uma rigidez menor que um medidor de fluxo de conduto reto do mesmo comprimento.

Um fator em frequência de medidor é uma massa de conduto de fluxo. A frequência ressonante do conjunto de medidor de fluxo cairá à medida que a massa do conduto de fluxo é aumentada, com todos outros fatores não sendo mudados. A massa do conduto de fluxo pode ser aumentada ou diminuída em qualquer modo. Por exemplo, massa de conduto de fluxo pode

ser aumentada através da adição de contrapesos ou outras massas, por exemplo. Adicionando-se massa em um ponto ou local discreto diminuirá a frequência operacional sem aumentar a rigidez do conduto de fluxo.

Um fator em rigidez de medidor é um limitador nodal de conduto de fluxo e localidades de nó vibracional. O conjunto de medidor de fluxo 5 pode incluir um ou mais limitadores nodais que controlam a posição de nó de vibração e eixo de flexão e, portanto afetam uma resposta vibracional. Um limitador nodal comum na forma de realização mostrada compreende o espaçador 106 em combinação com os coletores 102 e 102'. Alternativamente, em outras formas de realização o limitador nodal pode compreender uma ou mais barras de suporte que se estendem rigidamente entre os dois condutos de fluxo em um ponto definido substancialmente próximo aos flanges 101 e 101' (isto é, substancialmente nas duas extremidades do medidor de fluxo 5). Outras posições de nó são mostradas em FIG. 6. O um ou mais limitadores nodais são incluídos a fim de fixar os nós vibracionais dos condutos de fluxo curvados 103A e 103B, criando eixos de flexão desejados. O um ou mais limitadores nodais podem ser posicionados (ou removidos) a fim de aumentar o comprimento dos condutos de fluxo que experimentam a vibração ou pode estar localizada de modo a reduzir o comprimento de uma porção vibrante dos condutos de fluxo 103A e 103B. Em FIG. 6, a torção de seções 102 e 102' também reduz a rigidez no modo de flexão e assim reduz a frequência.

FIG. 2 mostra um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa 5 de acordo com uma forma de realização da invenção. Os condutos de fluxo 103A e 103B podem estar dentro de um envoltório 203 como mostrado. O envoltório 203 pode proteger os condutos de fluxo 103A e 103B e pode ainda funcionar para conter fuga no evento de uma falta de conduto de fluxo ou falha. O medidor de fluxo vibratório 5 inclui uma altura H e um comprimento L. Pode ser visto a partir da altura que a altura H nessa forma de realização é

significativamente maior do que o comprimento de medidor L . A razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) é a razão dessas duas características de medidor. A razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) pode ser aumentada a fim de reduzir a frequência ou alternativamente pode ser reduzida a fim de aumentar a frequência. A razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) pode ser mudada para qualquer número necessário, incluindo um número muito maior ou muito menor que um, por exemplo.

Em uma forma de realização, o comprimento L global de medidor é substancialmente a distância entre os flanges 101 e 101' do medidor de fluxo 5, enquanto a altura H global de medidor é substancialmente a distância entre a linha de centros dos coletores de entrada/saída 102 e 102' e a linha de centro mais distante (isto é, o centro do pico da porção arqueada). A razão de aspecto é, portanto uma quantificação aproximada do formato global e do tamanho do medidor de fluxo 5. Uma razão de aspecto elevada (H/L) de acordo com esta definição conota que o medidor de fluxo tem uma grande altura H comparada a seu comprimento L .

Deve ser entendido que uma razão de aspecto pode alternativamente ser definida como comprimento-para-altura (L/H). De acordo com essa definição alternada, o medidor de fluxo de essa figura terá uma razão de aspecto muito baixa.

FIG. 3 é um gráfico de efeito de desacoplamento contra frequência para frequências de operação muito baixas até 100 Hz no exemplo mostrado no gráfico. O gráfico mostra o efeito de desacoplamento contra frequência para uma faixa de amplitudes vibracionais. Um medidor de fluxo operando a menor do que cerca de 5 a 10 Hz funcionará desejavelmente porque a razão de desacoplamento vai permanecer a uma razão de desacoplamento de cerca de 1:1, isto é, quase nenhum desacoplamento ocorrerá. Para uma frequência de vibração muito baixa de 5 Hz ou menor, pode ser visto que a grandeza de

desacoplamento de resposta (A_p/A_f) vai permanecer na região mais escura ao longo do eixo esquerdo de o gráfico, em torno da razão de desacoplamento de 1:1, como indicado pela barra de escala ao longo do lado direito de o gráfico. Pode também ser visto que o efeito de desacoplamento diminui para amplitudes de vibração elevadas. Como um resultado, bolhas de gás arrastadas mover-se-ão com o fluido de fluxo, não causando erros em medições de fluxo de massa ou densidade de mistura. Efeitos de velocidade de som também serão negligenciáveis para tal frequência baixa, pois os efeitos de SOS/compressibilidade tipicamente não se tornam aparentes até uma frequência vibracional exceder cerca de 200 Hz.

FIG. 4 é um gráfico correspondente de ângulo de fase de desacoplamento (ϕ) contra frequência para frequências de operação muito baixas até 100 Hz no exemplo mostrado no gráfico. Pode ser visto a partir desse gráfico que o ângulo de fase de desacoplamento (ϕ) permanece baixo quando a frequência vibracional não excede 5 Hz.

Indiferente de amplitude de oscilação de fluido, tamanho de partícula, densidade de fluido, densidade de partícula, e viscosidade de fluido, o movimento relativo entre a partícula e fluido não é existente para uma frequência de oscilação muito baixa. A razão de amplitude (isto é, a razão de desacoplamento (A_p/A_f)) aproxima-se de uma razão de 1:1 e o ângulo de fase de desacoplamento (ϕ) aproxima-se de zero. Portanto, não há necessidade de calcular a razão de desacoplamento (A_p/A_f) ou o ângulo de fase de desacoplamento (ϕ). Além disso, o resultado é independente do fluido de processo e da disposição de tubulação. O medidor gera medições precisas e confiáveis porque não há movimento relativo entre componentes multifase. Isso é verdade para pastas fluidas, fluidos borbulhantes, emulsões, ou qualquer outro fluido compósito de múltiplas densidades.

Um medidor de fluxo vibratório tal como descrito acima de

poderia ser acionado em seu segundo, terceiro, ou quarto modos de flexão, sem limitações. Como discutido acima, desacoplamento piora com frequência crescente. Portanto, erro cada vez mais negativo aparecerá na medição de densidade conforme a frequência de operação aumenta. Consequentemente, o

5 medidor de fluxo vibratório pode ser operado fora de ressonância.

Esse fato pode ser útil como um diagnóstico. O medidor pode ser configurado para determinar se medições são afetadas por efeitos de SOS ou de desacoplamento, e com que frequência os efeitos se tornam negligenciáveis. Por exemplo, um medidor de fluxo pode ser acionado simultaneamente dentro e

10 fora de ressonância em frequência de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, e 100 Hz. Para um dado fluido de fluxo, medições a 10, 20, e 30 Hz podem todas ser equivalentes, indicando que efeitos de SOS ou de desacoplamento não impactam medições abaixo de cerca de 40 Hz. Se mais gás for arrastado ou se o tamanho de bolha aumentar, pode ocorrer que apenas as medições a 10 e 20 Hz

15 são equivalentes, significando que o desacoplamento é pior que no exemplo acima e uma medição de frequência menor é requerida. Essa capacidade de diagnóstico pode ser usada para determinar a presença de múltiplas fases ou pode ser usada para dar ao usuário uma indicação da precisão das medições em cada frequência.

20 Uma aplicação primária de um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa pode ser uma medição de óleo e gás natural à montante (pré-separador). Tal medidor multifase eliminaria a necessidade para um separador, um dispositivo extremamente caro. Um medidor de fluxo vibratório que funciona com $\pm 5\%$ de precisão nessa aplicação difícil seria muito

25 desejável à comunidade de óleo e gás, que deseja medir a produção bruta de cada poço de petróleo. Outra aplicação está em misturar e/ou medir cimento, onde o cimento contém partículas de pedra e gás arrastado, tornando-o uma mistura de três fases. Sem movimento relativo entre qualquer uma das fases em

baixa frequência, o medidor atuaria como se houvesse uma fase homogênea e dá medições de fluxo de massa de mistura e densidade de mistura corretas, independentemente do número de componentes ou fases.

Enquanto é possível acionar um medidor fora de ressonância em frequência baixa ou elevada, a praticabilidade de um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa acionado dentro de ressonância pode em alguns aspectos depender de quão longos os condutos deveriam ser a fim de alcançar a desejada frequência muito baixa. Como um exemplo, para um medidor de fluxo Coriolis modelo E200 Micro Motion que tipicamente vibra a uma frequência de setenta Hz para medir água, os condutos de fluxo estendem-se cerca de 45,75 centímetros além da barra de braçadeira. Como uma estimativa, considerar a equação para frequência de uma viga de balanço fixada de modo livre:

$$f = \frac{3.52}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^4}} \quad (3)$$

onde E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia da seção transversal, m é a massa por unidade de comprimento, e l é o comprimento. Para uma frequência f de setenta Hz e um comprimento (L) de 45,75 centímetros, uma proporcionalidade constante pode ser encontrada para o componente (EI/m). Como um exemplo, um conduto de fluxo deve ter cerca de 170 centímetros em comprimento para um medidor de fluxo Coriolis modelo E200 Micro Motion a fim de alcançar uma frequência vibracional de 5 Hz, sem mudar os termos E, I, ou termos m.

Outra abordagem é uma combinação dos fatores previamente discutidos. Por exemplo, uma solução seria aumentar os condutos um pouco, diminuir a espessura de parede um pouco, e adicionar uma massa pequena próxima ao acionador ou aos sensores de desvio e/ou operar acima de ou abaixo da ressonância. Outro método efetivo para reduzir a frequência seria permitir aos condutos flexionar em linha com o duto antes das barras de

braçadeira ou um evento para eliminar as barras de braçadeira. Isso diminuiria a rigidez no modo de acionamento consideravelmente devido a um componente de torção adicional (ver FIG. 5).

O medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa 5 pode ser projetado para uma aplicação específica. O medidor de fluxo 5 pode portanto ter uma frequência de operação muito baixa que realiza uma frequência vibracional muito baixa pré-determinada e frequência muito baixa de resposta vibracional e amplitude de resposta vibracional muito elevada.

A frequência vibracional pode ser especificada de múltiplas 10 maneiras. A frequência vibracional pode ser especificada como um limiar ou limite de frequência. A frequência vibracional pode ser especificada como estando abaixo de um limiar ou limite de desacoplamento pré-determinado. A frequência vibracional pode ser especificada como estando abaixo de um pré-determinado limiar ou limite de SOS/compressibilidade. A frequência 15 vibracional pode ser especificada atendendo a um limiar ou a um limite de número de Stokes inverso pré-determinado (discutido abaixo). Por exemplo, o limitar de número de Stokes inverso pré-determinado pode ser escolhido para substancialmente eliminar erros multifásicos.

Medidores de fluxo de massa Coriolis e densitômetros vibratórios 20 requerem que o fluido de fluxo mova-se com os condutos de fluxo durante oscilação na frequência natural do medidor. Quando material estranho é introduzido, essa suposição não é mais válida, pois existe movimento relativo ou desacoplamento entre as duas ou mais fases. Um modelo foi desenvolvido para prever as condições que são necessárias para boa medição de densidade de 25 mistura, dadas condições de operação de medidor específicas. O modelo de fluidos, que foi validado experimentalmente, pode prever efeitos de desacoplamento. As equações para encontrar uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) e um ângulo de fase de desacoplamento (ϕ) são:

$$m_p \frac{dv}{dt} = F_{arrastado} + F_{história} + F_{massaadicionada} + F_{flutuabilidade} \quad (4)$$

A razão de desacoplamento (A_p/A_f) compreende a razão da amplitude (A_p) de partícula (isto é, material estranho) contra a amplitude de conduto de fluxo (A_f). A partícula pode compreender qualquer material estranho, incluindo bolhas de gás, partículas sólidas, ou ainda porções de um fluido diferente arrastado dentro do fluido de fluxo. Os termos individuais de equação (4) são definidos como:

$$F_{arrastado} = 6\pi\mu_f a(u-v)\phi(Re) \quad (5)$$

$$F_{história} = 6\pi\mu_f a \left(\frac{u-v}{\delta} + \frac{\partial_x v}{2} \frac{d(u-v)}{dt} \right) \quad (6)$$

$$F_{massaadicionada} = \frac{2}{3}\pi\rho_f a^3 \left(\frac{du}{dt} - \frac{dv}{dt} \right) \quad (7)$$

$$F_{flutuabilidade} = \frac{4}{3}\pi\rho_f a^3 \frac{du}{dt} \quad (8)$$

O movimento do fluido de fluxo é assumido para corresponder ao movimento do conduto de fluxo. O movimento da bolha ou partícula é calculado como:

$$Velocidadedefluido = u = A_f \cos(\omega t) \quad (9)$$

$$Velocidadedepartícula = v = A_p \cos(\omega t + \phi) \quad (10)$$

As equações acima podem ser usadas para encontrar movimento de partícula no meio oscilante de um medidor de fluxo vibratório dentro de cerca de mais ou menos dez por cento de precisão para a amplitude vibracional e diferença de fase na maioria das situações.

As seis entradas necessárias para resolver as equações acima para movimento de bolha são: a frequência de resposta vibracional (f), a amplitude de resposta vibracional (A_f), a densidade de fluido (ρ_f), a densidade de partícula (ρ_p) das partículas de material estranho arrastado no fluido de fluxo, a viscosidade dinâmica do fluido de fluxo (μ_f), e a distribuição de tamanho de partícula (a) do material estranho arrastado no fluido de fluxo. A frequência de resposta vibracional (f) e a amplitude de resposta vibracional (A_f) podem ser

determinadas a partir de uma resposta vibracional de o um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B), tais como a partir de um sinal de resposta vibracional gerado pelos desvios (105, 105'). A densidade de fluido (ρ_f) pode ser especificada por um cliente, tal como no caso de um fluido de fluxo conhecido, ou pode ser obtida por medição. A densidade de partícula (ρ_p) pode ser especificada por um cliente ou alternativamente pode ser determinável a partir da lei de gases ideais no caso de gás arrastado, dada uma temperatura medida e pressão do fluido de fluxo. A viscosidade dinâmica (μ_f) pode ser especificada por um cliente, tal como no caso de um fluido de fluxo conhecido, ou pode ser obtida por medição. A distribuição de tamanho de partícula (a) pode ser especificada por um cliente, tal como no caso de um fluido de fluxo conhecido, ou pode ser obtida por medição, incluindo medições acústicas ou de radiação de bolhas ou partículas de material estranho no fluido de fluxo.

FIG. 5 é um gráfico de razão de desacoplamento contra razão de densidade para o medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa ou muito elevada de acordo com a invenção. O gráfico ainda inclui resultados para vários números de Stokes (δ) inversos. O número de Stokes inverso (δ) pode ser usado para caracterizar mais sucintamente as condições para evitar desacoplamento relacionado à frequência e efeitos de SOS/compressibilidade.

O gráfico mostra cinco números de Stokes (δ) inversos diferentes e as razões resultantes de desacoplamento. Pode ser visto a partir do gráfico que gases arrastados e sólidos arrastados reagem contrariamente em termos de desacoplamento, com os gases arrastados exibindo maior movimento que o fluido de massa e partículas sólidas exibindo menos movimento. Mesmo assim, a situação ideal é quando todas as fases dentro do conduto de fluxo movem-se exatamente na mesma amplitude e fase (isto é, onde $A_p/A_f=1$). Pode também ser visto que à medida que tamanho de bolha de gás aumenta, a quantidade de desacoplamento aumenta. Desacoplamento de partícula sólida também se move

para longe do caso ideal de 1:1 movimento quando tamanho de partícula de sólido aumenta.

O número de Stokes inverso (δ) compreende:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega a^2}} \quad (11)$$

onde o número de Stokes inverso (δ) considera a viscosidade cinemática de fluido de fluxo (η), a frequência vibracional (ω) em radianos, e o raio de partícula ou bolha (a), em metros do material estranho. A viscosidade cinemática (η) compreende a viscosidade dinâmica (μ) dividida pela densidade (ρ) do fluido, isto é, $\eta = \mu/\rho$. O material estranho pode incluir gases arrastados ou sólidos arrastados, como previamente discutido. O número de Stokes inverso (δ), portanto, pode ser usado para determinar mais completamente e precisamente os limites de frequência vibracional superior e inferior que são possíveis através apenas de uma especificação de frequência.

Aumentar o número de Stokes inverso (δ) move a razão de desacoplamento (A_p/A_f) mais próxima da unidade, indicando uma redução em movimento relativo. À medida que a razão de densidade aumenta além de cerca de 50, a razão de desacoplamento é primariamente dependente do número de Stokes inverso (δ). Isso é especialmente importante porque todas as misturas gás/líquido têm razões de densidade elevadas, geralmente acima de 100. Deste modo, para as condições de fluxo multifásico mais comuns em um medidor de fluxo vibratório, a extensão do erro de medição depende primariamente do número de Stokes inverso (δ). Se o número de Stokes inverso (δ) é muito pequeno, o resultado se aproxima do caso invíscido de uma razão de desacoplamento de 3:1, enquanto se o parâmetro for grande, o movimento relativo é restrito e a razão de desacoplamento aproxima-se de 1:1. O número de Stokes inverso (δ) ilustra que o equilíbrio entre viscosidade cinemática de fluido, tamanho de partícula, e frequência é importante, não de qualquer uma dessas variáveis sozinhas. No entanto, a frequência é controlada por

características de projeto de medidor, enquanto viscosidade e tamanho de partícula ou bolha dependem de condições de processo complexas e frequentemente incontroláveis.

O número de Stokes inverso (δ) em algumas formas de realização de frequência vibracional muito baixa compreende um número acima de cerca de 3,5. O número de Stokes inverso (δ) em algumas formas de realização de frequência vibracional muito baixa compreende um número acima de cerca de 1,0. O número de Stokes inverso (δ) em formas de realização de frequência vibracional muito baixa compreende um número acima de cerca de 0,5.

Para o propósito de operar um medidor de fluxo vibratório em uma frequência vibracional elevada com relação a efeitos de desacoplamento, o número de Stokes inverso (δ) pode ser usado para determinar se a frequência vibracional muito elevada é elevada o suficiente. O número de Stokes inverso (δ) em algumas formas de realização de frequência vibracional muito elevada compreende um número menor que cerca de 0,1. O número de Stokes inverso (δ) em algumas formas de realização de frequência vibracional muito elevada compreende um número menor que cerca de 0,01.

Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de resposta vibracional de até cerca de 5 Hz. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de resposta vibracional de até cerca de 10 Hz. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de resposta vibracional de até cerca de 20 Hz. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de resposta vibracional de até cerca de 30 Hz. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de

resposta vibracional de até cerca de 40 Hz. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar a uma frequência muito baixa de resposta vibracional de até cerca de 49 Hz. Frequências de modo de flexão desejadas podem ser alcançadas através de considerações de projeto de medidor, ou alternativamente através de vibração fora de ressonância em uma frequência menor ou maior especificada.

Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar em uma amplitude de resposta vibracional acima de cerca de 1 mm. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar em uma amplitude de resposta vibracional acima de cerca de 2 mm. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar em uma amplitude de resposta vibracional acima de cerca de 5 mm. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório 5 pode ser projetado para operar em uma amplitude de resposta vibracional acima de cerca de 10 mm.

FIG. 6 mostra uma porção do medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa 5 de acordo com a invenção. Essa figura mostra o medidor de fluxo 5 empregando uma grande razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) de acordo com algumas formas de realização da invenção. A grande razão de aspecto de altura-para-comprimento (H/L) diminui a rigidez de medidor de fluxo e a frequência de operação de medidor de fluxo.

Além disso, a figura mostra uma mudança nas posições de nó vibracional. As linhas tracejadas na figura mostram barras de braçadeira típica 120 e 120'. Barras de braçadeira são comumente empregadas para fixar nós de flexão e estabelecer um eixo de flexão. Barras de braçadeira fixam os condutos de fluxo em relação entre si, onde dois condutos de fluxo são empregados, e formam um nó de flexão vibracional. As barras de braçadeira 120 e 120' estabelecem um eixo de flexão W--W, onde apenas as porções de conduto de

fluxo acima do eixo de flexão W--W são deixadas vibrar. O eixo de flexão W--W restringe uma frequência vibracional e tipicamente mantém uma frequência elevada.

A fim de modificar a frequência de operação, a localização do eixo de flexão pode ser movida. Consequentemente, a frequência de operação pode ser reduzida por uma localidade de eixo de flexão apropriada, tal como apropriadamente localizando posições de nó vibracional. Em algumas formas de realização, isso pode ser conseguido movendo as barras de braçadeira, como mostrado por barras de braçadeira 122 e 122' na figura. As barras de braçadeira 122 e 122' estabelecem o eixo de flexão W''--W''. Em outras formas de realização, isso pode ser conseguido eliminando o conjunto de barras de braçadeira. Em tais formas de realização, o eixo de flexão pode ser determinado pelos flanges 101 e 101' ou pode ser conseguido pelos coletores 102 e 102'. Deve ser notado que esses são apenas dois métodos possíveis para abaixar frequência através de modificações de geometria do conduto de fluxo. Outros métodos são contemplados e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações.

Uma consequência de um fluido de fluxo multifásico é que medições de fluido precisas são afetadas e impedidas durante tais períodos de multifase. Os efeitos de multifase podem estar presentes mesmo na presença de condições de fluxo multifásico de moderadas a brandas. A natureza do fluido de fluxo multifásico pode manifestar-se em efeitos de compressibilidade/velocidade de som (SOS) e em efeitos de desacoplamento entre componentes do fluido de fluxo multifásico. Os dois efeitos podem ser controlados ou eliminados pela seleção própria de frequência vibracional e amplitude.

Os fluidos de fluxo multifásico podem incluir gases arrastados, especialmente fluxos de gás borbulhante. Os fluxos multifásicos podem incluir sólidos arrastados ou partículas sólidas arrastadas, misturas tais como concreto,

pastas fluidas, etc. Além disso, fluxos multifásicos podem incluir líquidos de densidades diferentes, tais como água e componentes de petróleo, por exemplo. As fases podem ter diferentes densidades, ou viscosidades.

Em um fluxo multifásico, a vibração de um conduto de fluxo não necessariamente move os gases/sólidos arrastados completamente em fase com o fluido de fluxo. Esta anomalia vibracional é referida como desacoplamento ou deslizamento. Bolhas de gás, por exemplo, podem tornar-se desacopladas do fluido de fluxo, afetando a resposta vibracional e quaisquer características de fluxo subsequentemente derivadas. Bolhas pequenas tipicamente movem-se com o fluido de fluxo conforme o medidor de fluxo é vibrado. No entanto, bolhas maiores não movem com o fluido de fluxo durante vibração do conduto de fluxo. Ao invés disso, as bolhas podem ser desacopladas do fluido de fluxo e podem mover-se independentemente, com bolhas de gases arrastados movendo-se mais longe e mais rápido do que o fluido de fluxo durante cada movimento vibracional. Isso adversamente afeta a resposta vibracional do medidor de vazão. Isto também acontece com partículas sólidas arrastadas no fluido de fluxo, onde as partículas de sólido são cada vez mais prováveis de dissociar do movimento do fluido de fluxo em frequências vibracionais crescentes. O desacoplamento pode ainda ocorrer onde o fluxo multifásico inclui líquidos de diferentes densidades e/ou viscosidades. A ação de desacoplamento foi verificada como sendo afetada por vários fatores, tais como a viscosidade do fluido de fluxo e a diferença em densidade entre o fluido de fluxo e o material estranho, por exemplo.

O tamanho das bolhas pode variar, dependendo da quantidade de gás presente, da pressão do fluido de fluxo, da temperatura, do grau de mistura do gás no fluido de fluxo, e de outras propriedades de fluxo. A extensão da diminuição em desempenho não está apenas relacionada a quanto gás total está presente, mas também ao tamanho das bolhas de gás individuais no fluxo. O

tamanho das bolhas afeta a precisão da medição. Bolhas maiores ocupam mais volume, conduzindo a flutuações na densidade e densidade medida do fluido de fluxo. Devido à compressibilidade de um gás, as bolhas podem mudar em massa ainda não necessariamente mudam em tamanho. Inversamente, se a
5 pressão muda, o tamanho de bolha pode correspondentemente mudar, expandindo à medida que a pressão cai ou contraindo na medida em que a pressão aumenta. Isso pode também causar variações na frequência natural ou ressonante do medidor de fluxo.

Em um conduto vibrando, a aceleração do conduto vibrante leva as
10 bolhas a se moverem. A aceleração de conduto é determinada por uma frequência vibracional e a amplitude vibracional. No caso de gás arrastado, as bolhas são aceleradas na mesma direção como a aceleração do conduto. As bolhas movem-se mais rápido e mais que o conduto de fluxo. O movimento de bolha mais rápido (e deslocamento de fluido resultante) leva um pouco do
15 fluido a mover-se mais lentamente que o conduto de fluxo, causando um deslocamento líquido no centro de gravidade da mistura de fluido para trás do centro do conduto vibrante. Esta é a base do problema de desacoplamento. Como um resultado, taxa de fluxo e características de densidade são subnotificadas (fluxo negativo e erros de densidade) quando ar arrastado está
20 presente.

Pastas fluidas apresentam um problema similar. No caso de pastas fluidas, entretanto, as partículas sólidas são frequentemente mais pesadas que o componente líquido. Abaixo da aceleração do conduto vibrante, as partículas mais pesadas movem-se menos do que o líquido. Mas devido a essas partículas
25 pesadas moverem-se menos, o centro de gravidade da mistura de fluido ainda se move ligeiramente para trás a partir do centro do conduto. Isso novamente resulta em fluxo negativo e erros de densidade.

Nos casos gás-líquido, sólido-líquido, e líquido-líquido, o

movimento diferencial da fase arrastada é acionado pela diferença em densidade entre a fase arrastada e o componente líquido. Se a compressibilidade do gás é negligenciada, então as mesmas equações podem ser usadas para descrever o comportamento de todos três cenários.

5 A compensação para o desacoplamento de fluido tem sido difícil devido a existir vários fatores que determinam quantas bolhas movem-se com relação ao fluido. Viscosidade de fluido é um fator óbvio. Em um fluido muito viscoso, bolhas (ou partículas) são efetivamente congeladas no lugar no fluido e erro de fluxo pequeno resulta. Em uma frequência vibracional muito baixa, o
10 fluido de fluxo agirá como um fluido muito viscoso, isto é, como se a viscosidade fosse infinita. Em uma frequência vibracional muito elevada, o fluido de fluxo vai atuar como um fluido não viscoso, isto é, como se a viscosidade fosse aproximadamente zero.

Viscosidade é uma medida da resistência de um fluido que está
15 sendo deformado por tensão de cisalhamento ou por tensão extensional. Em geral, é a resistência de um líquido para fluir, uma quantificação da espessura do fluido. Viscosidade pode ser pensada como uma medida de atrito de fluido. Todos fluidos reais têm alguma resistência à tensão, mas um fluido que não tem resistência à tensão de cisalhamento é conhecido como um fluido ideal ou
20 fluido invíscido.

Outra influência em mobilidade de bolha é o tamanho de bolha. O arrasto em uma bolha é proporcional à área de superfície, considerando que a força flutuante é proporcional ao volume. Portanto, bolhas muito pequenas têm um arrasto elevado para a razão de flutuabilidade e tendem a mover-se com o
25 fluido. Bolhas pequenas subsequentemente causam erros pequenos. Inversamente, bolhas grandes tendem a não mover-se com o fluido e resultam em erros grandes. O mesmo vale para partículas sólidas, como partículas pequenas tendem a mover-se com o fluido e causam erros pequenos.

Outro problema causado por vibração são os efeitos de velocidade de som (SOS) ou compressibilidade. Esses efeitos tornam as medições de fluxo de massa e densidade cada vez mais imprecisas para fluxos gasosos à medida que a frequência vibracional aumenta.

- 5 A diferença de densidade é outro fator. Uma força flutuante é proporcional à diferença em densidade entre o fluido e o gás. Uma pressão elevada pode ter uma densidade elevada o suficiente para afetar a força flutuante e reduzir o efeito desacoplante. Além disso, bolhas grandes ocupam mais volume, levando a flutuações verdadeiras na densidade do fluido de fluxo.
- 10 Devido à compressibilidade de um gás, as bolhas podem mudar em quantidade de gás e ainda não necessariamente mudar em tamanho. Inversamente, se a pressão muda, o tamanho de bolha pode correspondentemente mudar, expandindo à medida que a pressão cai ou contraindo na medida em que a pressão aumenta. Isso pode também causar variações em uma frequência
- 15 natural ou ressonante do medidor de fluxo e variações na densidade de duas fases real.

- Fatores de segunda ordem também podem ter um efeito em mobilidade de bolha e partícula. A turbulência em um fluido de taxa de fluxo elevada pode quebrar bolhas de gás grandes em menores, deste modo reduzindo
- 20 erro de desacoplamento. Tensioativos reduzem tensão de superfície de bolhas e diminuem sua tendência a coalescer. Válvulas podem diminuir tamanho de bolha através de turbulência aumentada enquanto os cotovelos dos dutos podem aumentar o tamanho de bolha forçando-as juntas através de força centrífuga.

- Como um resultado de projeto de medidor cuidadoso, o medidor
- 25 de fluxo vibratório 5 pode ser operado em frequências muito baixas ou em frequências muito elevadas. Uma operação em frequência muito baixa resultará em um desacoplamento de gás ou um desacoplamento de sólidos sendo mantido em cerca de uma razão de desacoplamento de 1:1, onde material

estranho no fluido de fluxo multifásico move-se substancialmente com o fluido de fluxo. Além disso, uma operação em frequência muito baixa resultará em características de fluxo similares a um fluxo cuja viscosidade é muito elevada.

Isso é verdade se o material estranho compreende componentes de gás, líquido ou sólido. Isso é verdade se o material estranho é de uma densidade moderadamente diferente que o fluido de fluxo ou se o material estranho tem uma densidade muito diferente. Como uma consequência, o material estranho arrastado não afetará substancialmente as medições realizadas pelo medidor de fluxo 5 e o medidor de fluxo 5 produzirá satisfatoriamente medições precisas e confiáveis. Além disso, o medidor de fluxo vibratório 5 operará consistentemente e previsivelmente indiferente de fração vazia de gás (GVF) e/ou fração de sólidos, enquanto estando apto a satisfatoriamente medir o fluido de fluxo mesmo à medida que a composição do fluido de fluxo multifásico varia. Além disso, operando o medidor de fluxo 5 em uma frequência muito baixa, não serão encontrados efeitos de compressibilidade porque modos acústicos transversais aparecem em frequências muito maiores.

Uma operação em frequência muito elevada resultará em uma razão de desacoplamento de gás sendo mantido em cerca de uma razão de desacoplamento de 3:1. Uma operação em frequência muito elevada resultará em uma razão de desacoplamento de sólidos sendo mantido em cerca de uma razão de desacoplamento de $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$. Além disso, a operação em frequência muito elevada resultará em características de fluxo similares a um fluxo cuja viscosidade é efetivamente zero.

A eletrônica do medidor 20 gera um sinal de acionamento para o acionador 104 e assim pode ser configurada para acionar/vibrar o conjunto de medidor de fluxo 10 a uma frequência muito baixa ou na frequência muito elevada. Como é uma prática comum em medidores de fluxo vibratório, isso implica uma eletrônica do medidor 20 gerar um sinal de acionamento de a

5 frequência pré-determinada e amplitude, em que a frequência pré-determinada e amplitude pode ser afetada e modificada por realimentação tomada a partir dos sinais de desvio. Por exemplo, o sinal de acionamento pode ser controlado de acordo com a realimentação a fim de alcançar uma frequência ressonante (isto é, natural) em uma resposta vibracional como medida pelos sensores de desvio 105 e 105'.

10 A eletrônica do medidor 20 pode ser configurada para gerar uma frequência muito baixa ou muito elevada de várias formas. A eletrônica do medidor 20 pode ser configurada durante fabricação, tal como apropriadamente programando uma memória de uma eletrônica do medidor 20. Alternativamente, a eletrônica do medidor 20 pode ser configurada com a frequência durante um processo de calibração, por exemplo, onde uma programação de frequência em algumas formas de realização pode depender da rigidez de medidor medida ou determinada como determinado pelo processo de
15 calibração. Em alternativa, a frequência pode ser derivada ou determinada durante uma operação de partida de medidor. Por exemplo, a frequência pode ser baseada em valores pré-armazenados ou inseridos pelo usuário. Isso pode incluir, por exemplo, a frequência que é baseada em informação pré-armazenada ou inserida pelo usuário com relação à natureza do fluido de fluxo
20 multifásico.

Desacoplamento piora com frequência crescente, até um máximo de cerca de uma razão de desacoplamento de 3:1 para gases, onde o gás em um caso de pior caso mover-se-á cerca de três vezes a distância atravessada pelo componente líquido durante vibração. O componente líquido move-se
25 primariamente com o conduto de fluxo. Para uma partícula sólida, o pior caso é uma razão de desacoplamento de cerca de 0:1, onde a partícula sólida é substancialmente estacionária durante oscilação de conduto. Isso ocorre quando a frequência é elevada e a densidade de partícula é elevada.

Desacoplamento é, em geral, uma função complicada de muitos parâmetros de entrada, que torna a mesma muito difícil de compensar em medições de medidor de fluxo. No entanto, foi verificado que o efeito de desacoplamento é insignificante para bolhas de gás pequenas. Similarmente, onde o fluido de fluxo é altamente viscoso, o desacoplamento pode não ocorrer ou pode apenas ocorrer com frequências vibracionais muito elevadas. Além disso, em cenários de gases arrastados, se o material estranho é bem misturado com o fluido de fluxo, diminuindo o tamanho de bolha e/ou exatamente distribuindo o gás, então o desacoplamento pode ser reduzido ou efetivamente eliminado em alguns casos. Também, uma viscosidade de fluido de fluxo elevado reduz ou elimina desacoplamento e aumenta precisão de medição. No entanto, as características do fluido de fluxo podem ocorrer na natureza e o tamanho de bolha e a viscosidade podem precisar ser aceitos como tal.

Um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa pode ser projetado para ser imune de efeitos de multifases incluindo tanto os efeitos de SOS/compressibilidade como os efeitos de desacoplamento. É claro, onde o volume de material estranho arrastado vira grande o suficiente, mesmo um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa pode sofrer alguns efeitos, mas um medidor de fluxo de frequência muito baixa ainda exibirá precisão muito maior e confiabilidade que medidores de fluxo vibratório de frequência moderada ou elevada de técnica anterior.

FIG. 7 mostra um diagrama de corpo livre simples que ilustra a fonte de erros em fluxo multifásico em medidores de fluxo vibratório. Considerar duas parcelas de fluido de igual densidade e tamanho comutando locais devido a mistura de fluido induzida turbulenta durante uma oscilação dos tubos de fluxo, como mostrado no lado esquerdo da figura.

Devido às densidades das partículas de fluido serem iguais no cenário de fase simples do conduto de fluxo esquerdo, nenhuma mudança na

localização do centro de gravidade (CG) ocorre e a frequência natural do sistema não é afetada. No entanto, em misturas multifase, como mostrado em no conduto de fluxo direito da figura, as duas parcelas de fluido ou partículas que comutam locais durante uma oscilação são de diferentes densidades, causando uma mudança na localização do CG do tubo. Por exemplo, se uma bolha move-se mais que o tubo em cada oscilação, então um pouco de fluido deve mover-se na direção oposta para preencher o vazio deixado pela bolha. Este deve ser o caso porque um tamanho de bolha e massa constantes e uma fase líquida incompressível são assumidos.

- 10 Quando a densidade de partícula difere da densidade de fluido, forças adicionais tais como massa adicionada e forças de arrasto causam um movimento de partícula que é relativo ao fluido em cada oscilação. Essas forças agem na mesma direção em cada partícula, causando deslocamentos não aleatórios que são coordenados com cada ciclo de oscilação.
- 15 Consequentemente, uma mudança na localização do CG do tubo ocorre de acordo com uma frequência de acionamento.

FIG. 8 mostra o movimento de uma partícula relativamente leve de raio α , dentro de um tubo de um medidor de fluxo vibratório cheio com um fluido de fluxo mais denso. A partícula move-se em uma distância total de A_p relativa a uma matriz inercial estacionária, com cada quarto de oscilação do tubo a partir da linha de meio para pico. Esse movimento relativo é definido como $A_p - A_f$ porque o tubo move-se para frente por A_f durante cada quarto de oscilação.

Quando uma bolha move-se muito à frente no fluido durante uma oscilação, alguma quantidade de fluido deve preencher de volta o volume deixado vazio. Isso causa uma mudança na localização do CG. A mudança em localização de CG pode ser calculada em termos de parâmetros de medidor e fluido para determinar, por exemplo, o erro de medição de densidade esperado

para um medidor de fluxo vibratório com fluxo multifásico. O mesmo exercício pode ser feito para fluxo de massa, embora desacoplamento como uma função de comprimento ao longo do conduto de fluxo deve então ser considerado. Várias suposições são feitas na seguinte derivação de erro de densidade devido ao desacoplamento. O movimento de partícula em um meio de fluido oscilante é bem definido por uma razão de amplitude e ângulo de fase, entretanto é apenas possível derivar uma expressão analítica para erro de densidade devido ao desacoplamento em um medidor de fluxo usando uma aproximação de CG, quando o ângulo de fase entre a partícula e o fluido é assumido como sendo zero. A suposição de ângulo de fase zero é perfeitamente atendida para o caso de um fluido infinitamente viscoso ou um fluido invíscido, por exemplo, quando o conduto de fluxo é vibrado em frequência muito baixa ou muito elevada respectivamente. Para outros cenários, o ângulo de fase é geralmente menor que vinte graus, assim espera-se uma boa primeira aproximação de erro de densidade para a faixa de parâmetros de medidor e fluido encontrada para um medidor de fluxo vibratório. Um volume de tubo constante, tamanho de partícula, e massa de partícula durante oscilação são também assumidos. Essas suposições são bem atendidas para qualquer tipo de inclusão de material estranho, indiferente da densidade de inclusão.

FIG. 9 mostra um movimento relativo total entre a partícula e fluido em uma oscilação de um quarto único do tubo de fluxo, incluindo a mudança de localização de CG. O movimento do CG devido ao movimento desacoplado de partículas em um tubo de fluxo oscilante pode ser calculado. O movimento do CG causa um erro de medição que depende das densidades dos componentes e quão longe as partículas desacoplam. A via de um movimento de partícula relativo ao fluido traça um cilindro tridimensional com hemisférios de raio a em ambas as extremidades.

O volume total de partícula e fluido afetado pelo movimento da

partícula relativo ao fluido em um quarto de oscilação é definido como a seguir.

$$\text{Volume de líquido deslocado} = (A_p - A_f)(\pi a^2) \quad (12)$$

$$\text{Volume de partícula deslocada} = \frac{4}{3}\pi a^3 \quad (13)$$

As expressões acima são multiplicadas por respectivas densidades para encontrar a massa de cada componente deslocado. Trabalhar em termos de massa permite fluido arbitrário e densidade de partículas.

$$\text{Massa de líquido deslocado} = \rho_f (A_p - A_f)(\pi a^2) \quad (14)$$

$$\text{Massa de partícula deslocada} = \rho_p \left(\frac{4}{3}\pi a^3 \right) \quad (15)$$

Usando FIG. 9, a localização do CG de cada um dos componentes de partícula e líquido é calculada antes e após a oscilação.

FIG. 10 dá as localizações do CG das partículas e dos componentes líquidos, referenciados a partir da linha pontilhada em FIG. 9 para o CG de cada componente, rotulados (1) a (4). Nota-se o sinal negativo incluído no cálculo da primeira massa m_1 (1). Isso é requerido porque essa massa deve ser subtraída do cilindro de fluido (2), que de outra forma está cheio de fluido.

A massa total do compósito que se move é definida por:

$$M = \sum m_i = \pi a^2 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p \quad (16)$$

O CG do fluido deslocado antes da partícula mover-se de zero a pico é definido como a seguir:

$$\bar{Q}_{\text{antes}} = \frac{\sum m_i \bar{q}_i}{\sum m_i} = \frac{\frac{2}{3}\pi a^3 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{1}{2}\pi a^2 \rho_f (A_p - A_f)^2}{\pi a^2 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p} \quad (17)$$

O CG do fluido deslocado após partícula mover-se de zero a pico é definido como a seguir:

$$\bar{Q}_{\text{depois}} = \frac{-\frac{2}{3}\pi a^3 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{1}{2}\pi a^2 \rho_f (A_p - A_f)^2 + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p (A_p - A_f)}{\pi a^2 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p} \quad (18)$$

A distância total que o CG move-se na matriz de referência relativa pode ser encontrada subtraindo-se equação (17) de equação (18).

$$\Delta \bar{Q} = \bar{Q}_{\text{depois}} - \bar{Q}_{\text{antes}} = \frac{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p (A_p - A_f) - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_f (A_p - A_f)}{\pi a^2 \rho_f (A_p - A_f) + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p} \quad (19)$$

A expressão pode ser simplificada a fim de mais claramente expor os parâmetros importantes.

$$\Delta \bar{Q} = \frac{\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)(A_p - A_f)}{1 + \frac{3}{4a}\left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)(A_p - A_f)} \quad (20)$$

Se a razão de densidade for exatamente unitária ($\rho_f/\rho_p = 1$), como para um fluido de fase simples, então pode não ocorrer mudança na localização do CG. Se as bolhas são pequenas quase desaparecendo, então $A_p = A_f$ e pode não ocorrer mudança na localização do CG. No limite de razão de densidade pequena ($\rho_f/\rho_p \ll 1$), como para o caso de uma partícula sólida pesada em um fluido de densidade negligenciável, a mudança de localização do CG reduz para $-A_f$ porque A_p aproxima-se de zero, como requerido pelo modelo. Nesse caso, a partícula é tão pesada que ela permanece estacionária na matriz de referência inercial enquanto o fluido move-se em torno da mesma. Finalmente, para o caso de uma partícula sem massa em um líquido, a razão de densidade aproxima-se de infinito ($\rho_f/\rho_p \rightarrow \infty$) e a mudança de localização do CG depende apenas do tamanho de partícula, $\Delta Q = -4a/3$.

A massa compósita M definida por equação (16) experimenta o deslocamento em CG (ΔQ) definido por equação (19) em cada oscilação. Esse conhecimento do movimento do CG não dá imediatamente uma expressão para medição de erro de densidade. Ao invés disso, uma massa fictícia que é

estacionária na matriz inercial durante cada oscilação do tubo de fluxo é determinada de modo a produzir o mesmo movimento global do CG. Pode então ser assumido que essa massa estacionária está ausente da medição de densidade porque seu movimento é inteiramente desacoplado do movimento de tubo. Como um resultado, a frequência natural do sistema aumenta, e no caso de um densitômetro vibratório, resulta erro de densidade negativo.

Da perspectiva de um observador estacionário na matriz inercial, um fluido de fase simples de massa (m_f) no tubo de um medidor de fluxo vibratório tem momento (p) definido pela massa do fluido multiplicado pela velocidade senoidal de tubo, dando ($p = m_f A_f \omega \cos(\omega t)$). A partir da perspectiva de um observador movendo-se com o tubo, o fluido de fase simples não tem momento porque a velocidade do CG do fluido é exatamente zero ($\Delta Q = 0$). No entanto, quando múltiplas fases estão presentes, pode ser mostrado que o movimento do CG da mistura não é zero com relação a uma matriz de referência relativa movendo-se com o tubo ($\Delta Q \neq 0$). Isso resulta em momento não zero na matriz relativa. Pode ser demonstrado que esse momento, causado por desacoplamento, resulta em erros de medição de densidade.

O momento produzido pela massa e movimento conhecidos do CG ($M, \Delta Q$) é primeiro calculado a partir do movimento de partícula conhecido. Uma massa estacionária fictícia é então encontrada que produz o mesmo momento líquido em cada oscilação. Momento para uma massa composta é simplesmente a massa total vezes a velocidade do CG da composta. Para o caso do fluido desacoplado e partícula, o CG de massa M desloca-se por uma magnitude ΔQ em cada quarto de oscilação. Porque o movimento é assumido para ser senoidal com frequência angular (ω) e fase zero, o momento (p) pode ser definido em termos do deslocamento de harmônico do CG.

$$p = M \frac{d}{dt} [\Delta Q \sin(\omega t)] = \omega \Delta Q M \cos(\omega t) \quad (21)$$

FIG. 9 representa uma possível configuração de massas

movimentando-se sobre distância que produz o momento definido em equação (21). No entanto, existe infinitas outras configurações possíveis de certas massas moverem-se certas distâncias que poderia produzir o mesmo momento líquido na matriz relativa. A configuração que produz o momento equivalente e que é composta de uma massa que permanece estacionária na matriz de referência inercial é desejada. Essa massa não é medida pelo medidor de fluxo vibratório porque é inteiramente desacoplada do movimento do tubo.

Equação (22) encontra a massa efetiva total de fluido (M'), que deveria estar estacionária na matriz inercial para produzir um momento equivalente como o produzido por equação (21). O termo $(-A_f)$ aparece porque a massa estacionária efetiva é necessária em termos do sistema de coordenadas inerciais. Os cálculos de CG acima se referiram à armação relativa com coordenada (q). No entanto, o valor de (q) é necessário onde o CG da massa é estacionário na matriz inercial. Devido a ($x = q + A_f$), para uma massa estacionária ser encontrada que ($x = 0$) e ($q = -A_f$). Isso descreve o fato que uma massa movendo-se em uma distância $(-A_f)$ no (q) sistema coordenado é na verdade estacionária com relação à matriz inercial. Assumir momento equivalente requer que a massa estacionária (M') seja definida como a seguir.

$$M[\Delta\bar{Q}\omega\cos(\omega t)] = M'[-A_f\omega\cos(\omega t)] \quad (22)$$

$$M' = -\frac{M\Delta\bar{Q}}{A_f} \quad (23)$$

$$M' = \frac{4}{3}\pi a^3(\rho_f - \rho_p)\left(\frac{A_p}{A_f} - 1\right) \quad (24)$$

Equação (24) dá uma massa estacionária efetiva devido ao movimento de uma partícula simples de raio especificado, com razão de desacoplamento e densidade associada. A massa é dependente do volume da partícula, da diferença de densidade, e da extensão de movimento desacoplado. Para o caso mais geral de uma faixa de tamanho de partículas e densidade de partículas, a expressão para massa estacionária requer um somatório sobre cada

partícula no tubo de fluxo. É assumido que a amplitude de deslocamento de cada partícula poderia ser diferente, dependendo do tamanho de partícula e densidade de partícula. A densidade de fluido e a amplitude de deslocamento de fluido, entretanto, são assumidas como sendo constantes para cada partícula.

- 5 Deste modo, ρ_f e A_f não necessitam de índices no seguinte somatório, enquanto quaisquer quantidades referindo-se a partícula necessitam. Considerar uma mistura consistindo de uma bolha e uma partícula de sólido em suspensão em um tubo cheio com água que é oscilante em amplitude A_f . A razão de desacoplamento (A_p/A_f) é maior do que unidade para a bolha e menor que
- 10 unidade para a partícula de sólido, e deste modo M' consistiria de dois termos separados representando a perda efetiva em massa do movimento desacoplado individual de cada partícula. Assumindo existir N partículas, cada uma das quais tendo uma densidade associada, raio, e resposta de amplitude, a massa efetiva total de fluido desacoplado M' é dada pela equação:

$$M' = \sum_{i=1}^N \left[\frac{4}{3} \pi a_i^3 (\rho_f - \rho_{p,i}) \left(\frac{A_{p,i}}{A_f} - 1 \right) \right] \quad (25)$$

- 15 Se uma densidade de partícula e tamanho constantes são assumidos, então um movimento equivalente é esperado para cada partícula e os índices não são mais necessários em a , ρ_p , ou A_p . Isso permite a remoção do somatório de equação (25), dando:

$$M' = N \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_f - \rho_p) \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right) \quad (26)$$

- É reconhecido que N multiplicado pelo volume de cada partícula é simplesmente o volume total de partícula dentro do tubo de fluxo. Equação (26) é agora dividida pelo volume total de tubo, que é a soma dos volumes de partícula e fluido, dando:
- 20

$$\rho' = \frac{\text{Vol}_p}{\text{Vol}_p + \text{Vol}_f} (\rho_f - \rho_p) \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right) \quad (27)$$

Dividir por um volume conhecido revela uma quantidade de

densidade da qual foi previamente uma quantidade de massa. A definição da fração de volume de partícula, α , é simplesmente o volume de partícula dividido pelo volume total. Deste modo, a porção não contribuinte efetiva de densidade é definida em termos da fração de volume de partícula, α , como em:

$$\rho' = \alpha (\rho_f - \rho_p) \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right) \quad (28)$$

5 A densidade real de mistura e a densidade desacoplada são definidas em termos da fração de volume da fase dispersada, α , dando:

$$\rho_{real} = \rho_f (1 - \alpha) + \rho_p \alpha \quad (29)$$

$$\rho_{desacoplado} = \rho_f (1 - \alpha) + \rho_p \alpha - (\rho_f - \rho_p) \alpha \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right) \quad (30)$$

Lembra-se que a densidade real do fluido multifase no medidor de fluxo vibratório dada por equação (29) é a densidade de mistura, não a densidade de líquido. Equação (30) representa a densidade que seria medida pelo medidor de fluxo vibratório devido ao movimento das partículas desacopladas. O erro de densidade de mistura verdadeira devido ao desacoplamento pode ser encontrado subtraindo-se a equação (29) de equação (30), dando:

$$\rho_{erro} = \rho_{desacoplado} - \rho_{real} = -(\rho_f - \rho_p) \alpha \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right) \quad (31)$$

Alternativamente, o erro de densidade pode ser expresso em forma de porcentagem, que permite uma melhor comparação entre densidades de fluido amplamente variadas.

$$\rho_{erro, \%} = 100 \left(\frac{\rho_{desacoplado} - \rho_{real}}{\rho_{real}} \right) = 100 \left(\frac{-(\rho_f - \rho_p) \alpha \left(\frac{A_p}{A_f} - 1 \right)}{\rho_f (1 - \alpha) + \rho_p \alpha} \right) \quad (32)$$

Aqui, o termo (ρ_f) é a densidade do fluido de fluxo, o termo (ρ_p) é a densidade das partículas arrastadas, o termo (A_p/A_f) é a razão de desacoplamento, e o termo (α) é a fração de volume de partícula (isto é, um tamanho de partícula ou distribuição de tamanho de partícula). Como uma

inspeção desses resultados, considerar os casos extremos de uma bolha em um fluido invíscido ou um fluido infinitamente viscoso, cujas razões de desacoplamento são explicitamente conhecidas. Aqui uma densidade de partícula de zero é assumida, embora para o caso infinitamente viscoso, isso não é necessário porque o desacoplamento é eliminado completamente para uma partícula de qualquer densidade. Para um fluido invíscido e partícula de menos massa, a razão de desacoplamento é exatamente três (isto é, 3:1), e para um fluido infinitamente viscoso a razão de desacoplamento é exatamente unidade. Para cada uma destas condições, equação (30) reduz ao seguinte:

$$\rho_{\text{desacoplado, inviscido, bolha}} = \rho_f (1 - 3\alpha) \quad (33)$$

$$\rho_{\text{desacoplado, viscoso, bolha}} = \rho_f (1 - \alpha) \quad (34)$$

Esses resultados são equivalentes para aqueles encontrados em trabalhos prévios tais como *Hemp & Yeung* (2003). A densidade máxima negligenciada de duas vezes a fração vazia vezes a densidade de fluido é encontrada para o caso de uma bolha em um fluido invíscido, enquanto nenhuma densidade negligenciada é prevista para uma bolha em um fluido infinitamente viscoso. Portanto, se uma mistura com 1% de fração vazia de gás está presente, o erro de densidade é esperado para estar entre 0 e -2%, dependendo da viscosidade, tamanho de bolha, frequência de medidor, e outros parâmetros. Deve ser notado que essa regra de polegar é apenas válida para partículas com massa insignificante. Por exemplo, se a massa da partícula é maior do que do líquido, a magnitude do erro de densidade pode, na verdade, ser maior do que duas vezes a fração de volume de partícula.

De acordo com a equação (31), a densidade medida de um fluido borbulhante será erroneamente baixa porque a razão de desacoplamento é maior do que um. Isso é intuitivo, conforme bolhas movem-se mais distante através do fluido em cada oscilação, levando o fluido a se mover para trás para preencher o volume deixado vazio. O resultado é uma densidade aparente que é

menor que a densidade verdadeira de mistura. Erro é também encontrado como sendo crescentemente negativo para bolhas maiores, como é esperado porque bolhas grandes desacoplam mais e aumentam a massa não participante. Para o caso de uma partícula sólida densa em um líquido, a razão de desacoplamento é menor que um e a diferença de densidade, $\rho_f - \rho_p$, é negativa, levando o último termo em equação (30) a ser negativo similar ao caso de uma bolha. Isso é esperado porque uma partícula sólida não se move tão longe quanto o fluido, assim novamente ocorre um deslocamento para trás no CG do tubo em que o componente pesado move-se menos em média do que o próprio tubo.

FIG. 11 é um gráfico de erro de densidade de desacoplamento contra densidade de partícula. O fluido é água com 1 cP de viscosidade, 998 kg/m³ de densidade, e uma frequência de oscilação e amplitude de 100 Hz e 0,37 mm (0,015 in), respectivamente. Como pode ser visto no gráfico, o erro de densidade devido ao desacoplamento é sempre negativo, indiferente de densidade de partícula (exceto no caso de nenhum desacoplamento, para qual o erro de densidade é zero). O cenário sem desacoplamento ocorre quando a partícula é da mesma densidade como o fluido ou quando forças viscosas são tão elevadas que nenhum movimento relativo ocorre. FIG. 11 é baseada em equação (32) para o erro de densidade, expressado em forma de porcentagem, assumindo nenhum ângulo de fase entre a partícula e fluido. O erro de densidade aproxima-se do máximo teórico de -2α para bolhas sem massa, embora seja limitado um pouco por efeitos viscosos. Se viscosidade fosse se aproximar de zero, o erro de densidade a 0 kg/m³ de densidade de partícula aproximaria o valor esperado de -2%.

O efeito de outros parâmetros de projeto de medidor e propriedades de fluido em erro de densidade durante fluxo multifásico também foi investigado. É assumido que não há nenhuma diferença de fase entre a partícula e o fluido. A aproximação de erro de densidade dada por equação (32)

é empregada.

FIG. 12 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para viscosidade de fluido contra tamanho de partícula. Erro de densidade é controlado primariamente pela razão de desacoplamento ao invés do ângulo de fase, como mostrado na figura. Como esperado, erro de densidade é minimizado por bolhas pequenas em fluidos de viscosidade elevada e cresce com tamanho de bolha crescente e/ou com viscosidade decrescente. Porque a densidade de partícula é insignificante, os resultados seguem uma regra de polegar em que o erro de densidade varia entre zero e menos duas vezes a fração vazia, dependendo dos parâmetros tais como tamanho de bolha e viscosidade. Para partículas grandes em fluidos de baixa viscosidade, o caso quase invíscido de -2% de erro de densidade para 1% de fração de volume de gás pode ser alcançado.

FIG. 13 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para viscosidade de fluido contra densidade de partícula. Como esperado, erros aumentam à medida que a razão de fluido para densidade de partícula desvia-se da razão de fase simples de 1:1. Os erros de densidade mais severos resultam de bolhas de gás ou partículas altamente densas em fluidos relativamente invíscidos. Para o caso de densidades de partícula elevadas, nota-se que a magnitude do erro de densidade pode exceder duas vezes a fração de volume de partícula. À medida que a densidade de partícula aumenta, a razão de amplitude (A_p/A_f) torna-se pequena, significando que a partícula somente move-se com cada oscilação a partir da perspectiva de um observador de laboratório. Deste modo, uma partícula crescentemente pesada é crescentemente estacionária, causando um grande movimento de volta para trás do CG do tubo de fluxo e um grande erro de densidade negativa correspondente.

FIG. 14 é uma plotagem de superfície de erro de densidade para amplitude de conduto contra frequência vibracional. A figura mostra erro de

densidade como uma função de parâmetros de projeto de medidor. O erro de densidade pode ser minimizado usando um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa. Adicionalmente, o medidor de fluxo pode vibrar em uma amplitude muito baixa, concorrente com a frequência muito baixa. Por exemplo, em uma amplitude de tubo constante de cerca de 0,5 mm, o erro de densidade é 0,35% maior para um medidor de fluxo vibratório oscilando a 400 Hz que um medidor de fluxo vibratório oscilando a 100 Hz, e 0,5% maior para um medidor de 1000 Hz. Na mesma amplitude, erro de densidade é apenas -0,4% para um medidor de fluxo vibrando a 10 Hz, e erro é virtualmente eliminado para frequência menores que 1 Hz.

Uma frequência vibracional muito baixa pode ser alcançada vibrando o conjunto de medidor de fluxo 10 em um primeiro modo de flexão. O primeiro modo de flexão compreende uma frequência ressonante do conjunto de medidor de fluxo 10, em que o comprimento de um conduto de fluxo move-se em uma direção única. Uma frequência vibracional elevada pode compreender vibrar o conjunto de medidor de fluxo 10 em um segundo ou maior modo de flexão. Em maiores modos de flexão, nós de vibração adicional existem em um conduto de fluxo. As porções de conduto em qualquer lado desse nó vibracional movem-se em direções opostas.

Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada 5 pode operar em uma frequência muito elevada como um resultado de projeto de medidor de fluxo. Em algumas formas de realização, o medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada 5 pode operar em uma frequência muito elevada como um resultado da configuração de um sinal de acionamento.

FIG. 15 é um gráfico que mostra resultados de simulação de erro de densidade total de um modo de frequência muito baixa, um modo de frequência médio, e um modo de frequência muito elevada de um medidor de

fluxo Coriolis. Deve ser visto que, em tamanhos de partícula muito pequenos, qualquer desacoplamento é insignificante, tal como a razão de desacoplamento (A_p/A_f) é aproximadamente um e o erro de densidade é correspondentemente insignificante. Nesse cenário de partícula pequena, efeitos de velocidade de som (SOS)/compressibilidade dominam. Como um resultado, os modos de frequência médio e elevado têm erros positivos e o modo de frequência baixa não apresenta erro de todo.

No entanto, quando bolhas ficam maiores do que alguns décimos de um milímetro em diâmetro, efeitos de desacoplamento começam a dominar os efeitos de SOS/compressibilidade e o erro se torna negativo. Nota-se que à medida que o tamanho de partícula aumenta, o erro observado irá assintoticamente convergir para os resultados de modelo invíscido, isto é, em uma razão de desacoplamento de cerca de 3:1 (A_p/A_f). Esta assíntota acontece mais cedo em termos de tamanho da bolha quando a frequência de oscilação é elevada. Portanto, se um medidor é vibrado em uma frequência elevada o suficiente, então equação (32) pode ser empregada. Equação (32) é independente de tamanho de bolha e viscosidade de fluido de fluxo.

FIG. 16 mostra um medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada de acordo com uma forma de realização da invenção. A frequência muito elevada pode ser baseada em um comprimento efetivo do um ou mais condutos de fluxo 103A, 103B e a geometria do medidor de fluxo 5, como previamente discutido. O comprimento efetivo em algumas formas de realização pode ser controlado pela geometria do conduto de fluxo. Além disso, a frequência de acionamento pode ainda ser afetada por uma ou mais massas de balanço que podem ser opcionalmente fixadas ao um ou mais condutos de fluxo 103A, 103B, conforme necessário.

Na figura, o medidor de fluxo 5 tem um grande comprimento L em proporção a uma altura H relativamente pequena. O medidor de fluxo

vibratório de frequência muito elevada 5 portanto pode ter uma razão (H/L) de aspecto de altura-para-comprimento baixa. Por exemplo, uma razão (H/L) de aspecto de altura-para-comprimento pode ser menor que ou maior que um. Portanto, o medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada 5 de acordo com a invenção é relativamente pequeno e, portanto, fácil de acomodar na maioria das aplicações de medição.

Em algumas formas de realização, a frequência muito elevada compreende uma frequência de vibração acima de 1.500 Hz. Em algumas formas de realização, a frequência muito elevada compreende uma frequência de vibração acima de 2.000 Hz. Em algumas formas de realização, a frequência muito elevada compreende uma frequência de vibração acima de 3.000 Hz e além. No entanto, deve ser entendido que a frequência de vibração pode estar em qualquer frequência acima desses limiares, como requerido frequência muito elevada dependerá enfim de vários fatores, incluindo a composição de fluido de fluxo e a natureza do material estranho arrastado, por exemplo.

Deve ser entendido que, alternativamente, tanto um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa como um medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada podem ser usados juntos a fim de alcançar os resultados discutidos aqui. Por exemplo, dois medidores de fluxo podem medir o fluido de fluxo em diferentes frequências e os sinais de medição resultantes podem ser processados de acordo com várias formas de realização da invenção. O processamento pode ser efetuado em uma eletrônica do medidor de qualquer medidor de fluxo, ou pode ser efetuado em um dispositivo separado.

Deve ser entendido que o medidor de fluxo vibratório 5, PI configurado para ser um medidor de fluxo vibratório de frequência muito baixa ou um medidor de fluxo vibratório de frequência muito elevada, pode ser operado em frequências de vibração múltipla. Por exemplo, o medidor de fluxo

vibratório pode ser operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que uma pluralidade de respostas vibracionais é comparada a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

5 FIG. 17 é um fluxograma 1700 de um método para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico de acordo com a invenção. Em etapa 1701, um medidor de fluxo vibratório é operado em uma ou mais frequências de operação muito baixas e uma ou mais frequências de operação muito elevadas. O medidor de fluxo
10 vibratório pode ser operado para vibrar de modo substancialmente seqüencial nas múltiplas frequências em algumas formas de realização. Alternativamente, o medidor de fluxo vibratório pode ser operado para vibrar em modo substancialmente simultâneo em uma ou mais frequências muito baixas e em uma ou mais frequências muito elevadas.

15 A uma ou mais frequências muito baixas e a uma ou mais frequências muito elevadas podem ser determinadas com base em um fluido de fluxo esperado, por exemplo. Alternativamente, a uma ou mais frequências muito baixas e uma ou mais frequências muito elevadas podem depender pelo menos um pouco de outras restrições, tal como pressão de fluido ou espaço
20 físico disponível para o medidor, por exemplo. Outras restrições são contempladas e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações.

 Por exemplo, gases arrastados no fluido de fluxo esperado podem causar erros em medição. Dependendo do tamanho de bolha e viscosidade de fluido de fluxo, um fluido de fluxo gasoso ou borbulhante em um dado nível
25 vibracional pode exibir mais erro de medição que o equivalente fluxo multifásico de sólidos arrastados. Sólidos arrastados tipicamente não exibem efeitos de compressibilidade e tendem a desacoplar para uma extensão menor que bolhas. Consequentemente, um fluido de fluxo multifásico de gases

arrastados poderia requerer uma frequência ou frequências mais extremas que um fluido de fluxo multifásico de sólidos arrastados, dependendo de condições.

O fluxo de fluido esperado pode permitir um projeto de frequência baseado no tamanho de partícula ou de bolha esperado no fluxo, ou uma faixa esperada de tamanhos. Por exemplo, o medidor de fluxo vibratório pode ser projetado em algumas formas de realização para de forma confiável fazer medições de fluido durante fluxo de duas fases incluindo bolhas/partículas pequenas a moderadas. O medidor de fluxo vibratório pode ser projetado em algumas formas de realização para medir, de modo confiável, os gases arrastados para fluxos borbulhantes mas não para fluxos incompressíveis. Alternativamente, com projeto cuidadoso, o medidor de fluxo vibratório pode ser projetado para medir de modo preciso e confiável mesmo fluxos incompressíveis. Além disso, o medidor de fluxo vibratório pode ser projetado para medir de modo preciso e confiável fluidos de fluxo multifásico incluindo ambos, bolhas e sólidos, tal como concreto ou outras misturas de cimento, por exemplo.

A determinação pode ainda considerar restrições operacionais do medidor de fluxo vibratório. As restrições operacionais podem incluir uma pressão de fluido de fluxo. As restrições operacionais podem ser independentes de ou podem incluir uma viscosidade de fluido de fluxo. As restrições operacionais podem incluir um tipo ou tipos de material estranho esperado. As restrições operacionais podem incluir um tamanho ou tamanhos de materiais estranhos esperados. As restrições operacionais podem incluir um espaço físico disponível para o medidor de fluxo vibratório.

Em etapa 1702, uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada são recebidas. As respostas vibracionais serão recebidas em resposta às frequências de acionamento muito baixas e muito altas usadas para vibrar o

conjunto de medidor de fluxo 10.

Em etapa 1703, uma ou mais características do fluido de fluxo são determinadas a partir da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e de uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada. A uma ou mais características do fluido de fluxo podem incluir uma mistura taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_{mix}$) e uma densidade de mistura (ρ_{mix}) que são altamente precisas e não substancialmente afetadas por efeitos de fluxo multifásico. A uma ou mais características do fluido de fluxo podem ainda incluir uma taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_f$) de fluido e uma taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_p$) de partícula/gás arrastado que são precisas e não substancialmente afetadas por efeitos de fluxo multifásico. A uma ou mais características do fluido de fluxo podem ainda incluir uma densidade de fluido (ρ_f) de componente que é precisa e não substancialmente afetada por efeitos de fluxo multifásico. A uma ou mais características do fluido de fluxo podem ainda incluir uma fração de fluido (ϕ_f), uma fração de partícula (ϕ_p), e uma velocidade de som de mistura (c_{mix}). Outras características de fluido de fluxo adicionais são contempladas e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações.

A determinação pode incluir usar um valor conhecido ou assumido para a razão de desacoplamento (A_p/A_f). Em frequências muito baixas, a razão de desacoplamento (A_p/A_f), quer para gases arrastados ou sólidos arrastados, pode ser assumida como sendo de cerca de 1:1. Em frequências muito elevadas, a razão de desacoplamento para gases arrastados pode ser assumida como sendo de cerca de 3:1, enquanto a razão de desacoplamento para sólidos arrastados pode ser assumida como sendo de cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$.

Em frequências muito baixas, a viscosidade do fluido de fluxo pode ser assumida como sendo aproximadamente infinita. Em frequências muito elevadas, a viscosidade do fluido de fluxo pode ser assumida como sendo

aproximadamente zero.

Como um exemplo, várias equações podem ser usadas para processar as respostas vibracionais de frequência muito baixa e muito elevada resultantes. Equação (35), abaixo, pode ser aplicada em qualquer frequência de vibração, quer elevada ou baixa. Em frequências muito baixas, entretanto, a razão de desacoplamento (A_p/A_f) será um, como previamente discutido. Como um resultado, o termo do lado direito em equação (35) é efetivamente zero, assim a densidade medida pelo medidor de fluxo vibratório é a densidade real de mistura (ρ_{mix}). Como um resultado da frequência muito baixa, é sabido que essa densidade medida de mistura (ρ_{mix}) é precisa e confiável. Também, na frequência vibracional muito baixa, o fluxo de massa ($\dot{m}_{mix}$) de mistura medido é também conhecido como sendo preciso e confiável, como previamente discutido.

Equação (35) pode também ser aplicada em uma ou mais frequências muito elevadas, tais como os exemplos mostrados em equações (45)-(46), abaixo. Em cada caso, a razão de desacoplamento vai permanecer substancialmente constante - e independente de tamanho de bolha, por exemplo - sobre a uma ou mais frequências muito elevadas (embora o termo SOS aumentará com frequência (ω) crescente).

$$\rho_{medidor} - \rho_{mix} = \frac{\rho_{mix}}{4} \left(\frac{\omega(d/2)}{c_{mix}} \right)^2 - (\rho_f - \rho_p) \phi_p \left[\frac{A_p}{A_f} - 1 \right] \quad (35)$$

$$\rho_{mix} = \rho_f \phi_f + \rho_p \phi_p \quad (36)$$

$$\phi_f + \phi_p = 1 \quad (37)$$

$$\frac{1}{\rho_{mix} c_{mix}^2} = \frac{\phi_f}{\rho_f c_f^2} + \frac{\phi_p}{\rho_p c_p^2} \quad (38)$$

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_f + \dot{m}_p \quad (39)$$

$$\frac{\dot{m}_{mix}}{\rho_{mix}} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} + \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \quad (40)$$

Em um exemplo, o medidor de fluxo vibratório é usado para

determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de óleo de um poço, onde gás é arrastado no óleo. Em cenário de pior caso, as densidades e frações do óleo e gás não são conhecidas ou assumidas, embora a pressão de fluido de fluxo e temperatura são tipicamente medidas ou conhecidas. O medidor de

5 fluxo vibratório é vibrado usando pelo menos uma frequência muito baixa e pelo menos uma frequência muito elevada. As características de fluido de fluxo desejadas comumente incluem pelo menos a mistura taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_{mix}$) e a densidade de mistura (ρ_{mix}). Além disso, a taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_f$) e a densidade (ρ_f) de componente de óleo (fluido) provavelmente são

10 desejadas. Isso pode requerer ou necessitar determinar uma fração de óleo/líquido do fluxo multifásico. A taxa de fluxo de massa ($\dot{m}_p$) e densidade (ρ_p) do componente de gás (onde bolhas de gás são as partículas arrastadas (p)) podem ou não podem ser desejadas. A densidade (ρ_p) de gás (partícula/bolha) pode ser calculada a partir da lei dos gases ideais $P = \rho_p RT$. No entanto, a

15 densidade de fluido (ρ_f) é ainda necessária. Vibrações adicionais efetuadas a frequências muito elevadas darão equações adicionais, possibilitando a solução de um número equivalente de incógnitas. Portanto, onde os termos (ϕ_f), (ϕ_p), e (c_{mix}) são desejados, duas vibrações de frequência muito elevada adicionais são necessárias, que darão os resultados mostrados em equações (45) e (46). As

20 duas frequências muito elevadas (ω_1) e (ω_2) podem compreender quaisquer frequências adequadas.

$$\rho_{mix} = \rho_f \phi_f + \rho_p \phi_p \quad (41)$$

$$\phi_f + \phi_p = 1 \quad (42)$$

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_f + \dot{m}_p \quad (43)$$

$$\frac{\dot{m}_{mix}}{\rho_{mix}} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} + \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \quad (44)$$

$$\rho_{medidor, 1} - \rho_{mix} = \frac{\rho_{mix}}{4} \left(\frac{\omega_1 (d/2)}{c_{mix}} \right)^2 - 2(\rho_f - \rho_p) \phi_p \quad (45)$$

$$\rho_{medidor} \cdot \bar{\rho}_{mix} = \frac{\rho_{mix}}{4} \left(\frac{\omega_2 (d/2)}{c_{mix}} \right)^2 - 2(\rho_f - \rho_p) \phi_p \quad (46)$$

O uso de duas ou mais versões de equação (35), isto é, produzindo os resultados mostrados em equações (45) e (46), possibilita a eliminação do termo SOS (c_{mix}) comum. As duas equações resultantes podem ser resolvidas a fim de determinar as incógnitas (ϕ_f) e (ϕ_p), então características de fluido de

5 fluxo adicionais podem ser derivadas usando equações (41) até (44). Outras equações são contempladas e estão dentro do escopo da descrição e reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Medidor de fluxo vibratório (5) para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico, o medidor de fluxo vibratório (5) compreendendo:

um conjunto de medidor de fluxo (10) incluindo um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B),

caracterizado pelo fato de que

o conjunto de medidor de fluxo (10) é configurado para gerar uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa que estão abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada para o fluido de fluxo multifásico e para gerar uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada que estão acima da frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo multifásico, em que uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) é cerca de 1:1 para a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa, cerca de 3:1 para gases arrastados a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada, e cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para sólidos arrastados na uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada, com a razão de desacoplamento (A_p/A_f) compreendendo uma razão de uma amplitude de partícula (A_p) para uma amplitude de fluido (A_f), onde ρ_p é uma densidade de partícula de material estranho e ρ_f é uma densidade de fluido de fluxo; e

eletrônica do medidor (20) acoplada ao conjunto de medidor de fluxo (10) e configurada para receber a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada e determinar a uma ou mais características do fluido de fluxo a partir da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada.

2. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação

1, caracterizado pelo fato de que a eletrônica do medidor (20) é configurada para vibrar o um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B), em que uma viscosidade é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo multifásico a uma ou mais frequências muito baixas e é configurada para vibrar o um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B), em que uma viscosidade é efetivamente zero com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo multifásico na uma ou mais frequências muito elevadas.

3. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a uma ou mais frequências muito baixas estão abaixo de um limiar de velocidade de som/compressibilidade mínimo pré-determinado do fluido multifásico.

4. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa correspondem a um número Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e em que a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada correspondem a um número Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de 0,1.

5. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o um ou mais condutos de fluxo (103A, 103B) são configurados para gerar a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada por configuração de um ou mais dentre rigidez do conduto de fluxo, comprimento do conduto de fluxo, razão de aspecto do conduto de fluxo, material de conduto de fluxo, espessura do conduto de fluxo, formato do conduto de fluxo, geometria do conduto de fluxo, ou uma ou mais posições do nó vibracional.

6. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é configurado

para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de flexão.

7. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais são comparadas a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

8. Medidor de fluxo vibratório (5) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o conjunto de medidor de fluxo (10) compreende dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo (10) que são configurados para vibrar para gerar a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e a uma ou mais respostas de frequência muito elevada.

9. Método para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico, o método caracterizado pelo fato de compreender:

vibrar um ou mais condutos de fluxo de um conjunto de medidor de fluxo vibratório em uma ou mais frequências muito baixas e gerar uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa que estão abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada para o fluido de fluxo multifásico e vibrar o um ou mais condutos de fluxo em uma ou mais frequências muito elevadas e gerar uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada que estão acima de uma frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo multifásico, independente do tamanho de material estranho ou da composição de material estranho;

receber a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada, com a uma ou mais frequências muito baixas resultando em uma razão de

desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 1:1 para a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa, e com a uma ou mais frequências muito elevadas resultando em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 3:1 para gases arrastados a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada, e cerca de igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para sólidos arrastados na uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada, onde ρ_p é uma densidade de partícula de material estranho e onde ρ_f é uma densidade de fluido de fluxo, a densidade do material estranho sendo uma densidade de uma partícula de material estranho compreendendo um de uma bolha de gás, uma partícula sólida, e um fluido em um fluido de fluxo do fluido de fluxo multifásico; e

determinar a uma ou mais características do fluido de fluxo a partir da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa e da uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada.

10. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que a uma ou mais frequências muito baixas resultando em uma viscosidade que é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo multifásico e com a uma ou mais frequências muito elevadas resultando em uma viscosidade que é efetivamente zero.

11. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que a uma ou mais frequências muito baixas estão abaixo de um limiar de velocidade do som/compressibilidade mínimo pré-determinado do fluido multifásico.

12. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito baixa correspondem a um número de Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e em que a uma ou mais respostas vibracionais de frequência muito elevada correspondem a um número de Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de

0,1.

13. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de flexão.

14. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais são comparadas a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

15. Método de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que vibrar o conjunto de medidor de fluxo vibratório em uma ou mais frequências muito baixas e em uma ou mais frequências muito elevadas compreende vibrar dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo vibratório.

16. Método de formar um medidor de fluxo vibratório para determinar uma ou mais características do fluido de fluxo de um fluido de fluxo multifásico, o método caracterizado pelo fato de compreender:

determinar uma resposta vibracional de frequência muito baixa e uma frequência resposta vibracional de frequência muito elevada pré-determinada para o medidor de fluxo vibratório com base em pelo menos um fluido de fluxo esperado, com a resposta vibracional de frequência muito baixa estando abaixo de uma frequência de desacoplamento mínima pré-determinada e com a resposta vibracional de frequência muito elevada estando acima de uma frequência de desacoplamento máxima pré-determinada para o fluido de fluxo multifásico com a resposta vibracional da frequência muito baixa resultando em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 1:1 e com a resposta vibracional de frequência muito elevada resultando em uma razão de desacoplamento (A_p/A_f) de cerca de 3:1 para gases arrastados e igual a $3/(1 + (2 * \rho_p/\rho_f))$ para sólidos arrastados, com a razão de desacoplamento (A_p/A_f)

compreendendo uma razão de uma amplitude de partícula (A_p) para uma amplitude de fluido (A_f), onde ρ_p é uma densidade de partícula de material estranho e ρ_f é uma densidade de fluido de fluxo, em que A_p representa a amplitude das partículas, A_f representa a amplitude do tudo, ρ_p representa a densidade da partícula, ρ_f representa a densidade do fluido;

selecionar uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo com base na resposta vibracional da frequência muito baixa e na resposta vibracional da frequência muito elevada, com a uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo sendo selecionada para substancialmente alcançar a resposta vibracional da frequência muito baixa e a resposta vibracional da frequência muito elevada; e

construir o medidor de fluxo vibratório empregando as selecionadas uma ou mais características de projeto de conduto de fluxo.

17. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que a resposta vibracional da frequência muito baixa resulta em uma viscosidade que é efetivamente infinita com relação ao movimento da partícula para o fluido de fluxo multifásico e com a resposta vibracional da frequência muito elevada resultando em uma viscosidade que é efetivamente zero.

18. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que a resposta vibracional da frequência muito baixa está abaixo de um limiar de velocidade do som/compressibilidade mínimo pré-determinado, independente de um tamanho de material estranho ou de uma composição de material estranho.

19. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que a resposta vibracional da frequência muito baixa corresponde a um número Stokes inverso (δ) que está acima de cerca de 3,5 e em que a resposta vibracional da frequência muito elevada corresponde a um número Stokes inverso (δ) que é menor do que cerca de 0,1.

20. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é configurado para operar em um primeiro modo de flexão e em frequências maiores de modo de flexão.

21. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que o medidor de fluxo vibratório é operado em uma pluralidade de frequências para gerar uma pluralidade de respostas vibracionais, em que a pluralidade de respostas vibracionais são comparadas a fim de determinar um início aproximado de efeitos multifásicos.

22. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que vibrar o conjunto de medidor de fluxo vibratório na resposta vibracional da frequência muito baixa e na resposta vibracional da frequência muito elevada compreende vibrar dois ou mais conjuntos de medidor de fluxo vibratório.

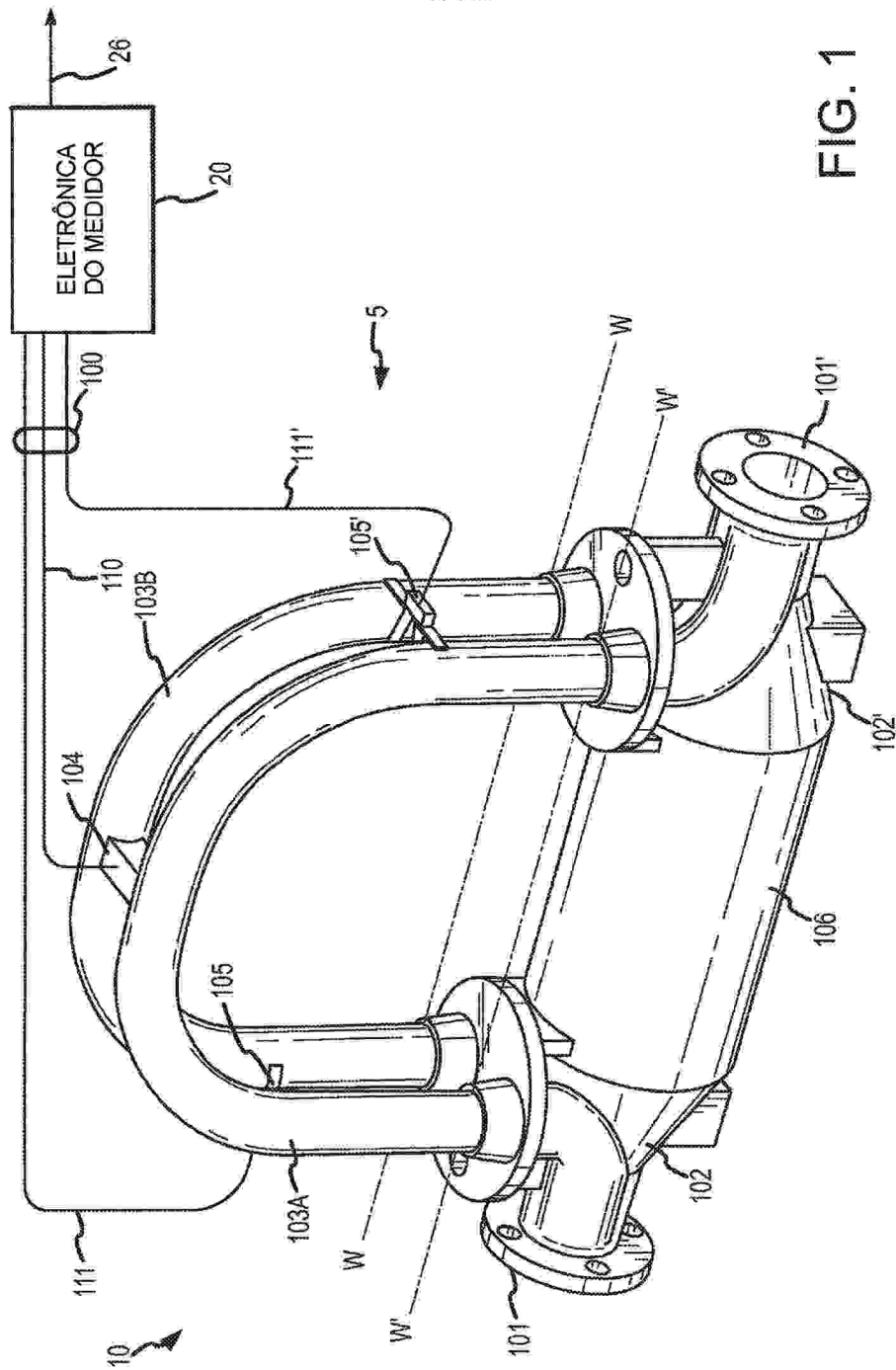


FIG. 1

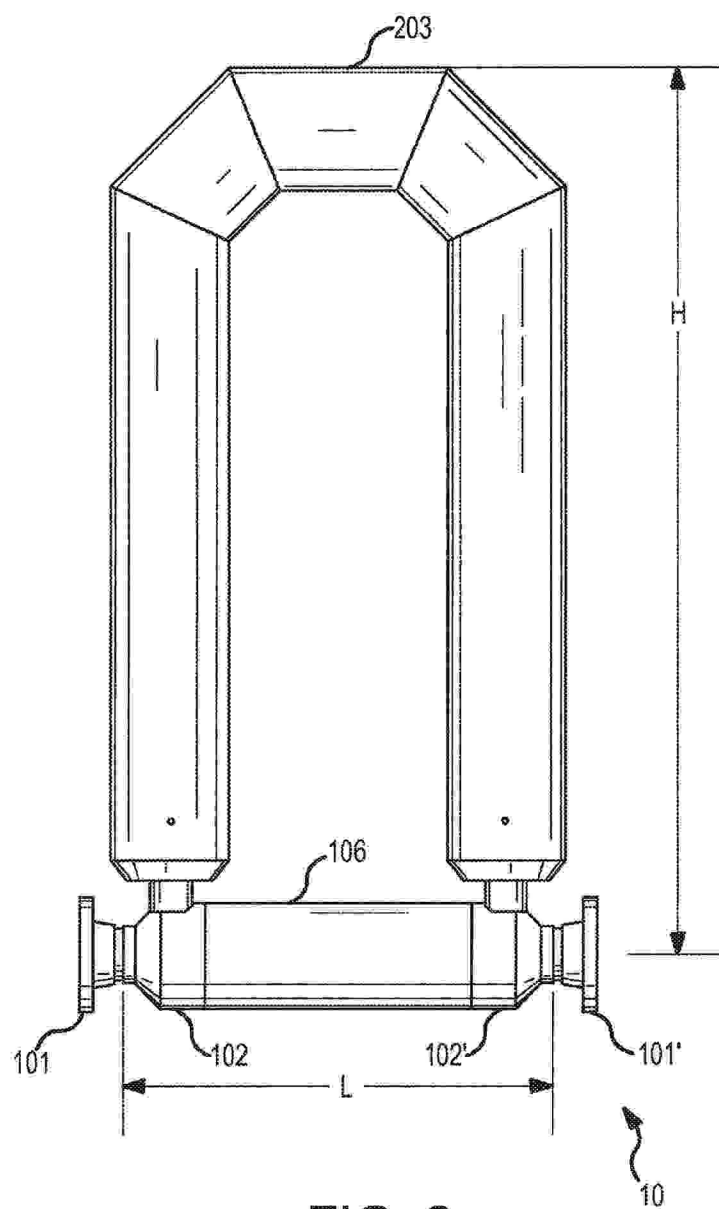


FIG. 2

MAGNITUDE DE DESACOPLOAMENTO (A_p/A_f) DENSIDADE DE FLUIDO = 0,998 g/cm³
DENSIDADE DE PARTÍCULA = 0,003 g/cm³, VISCOSIDADE 1 cP, DIÂMETRO DE PARTÍCULA = 1 mm

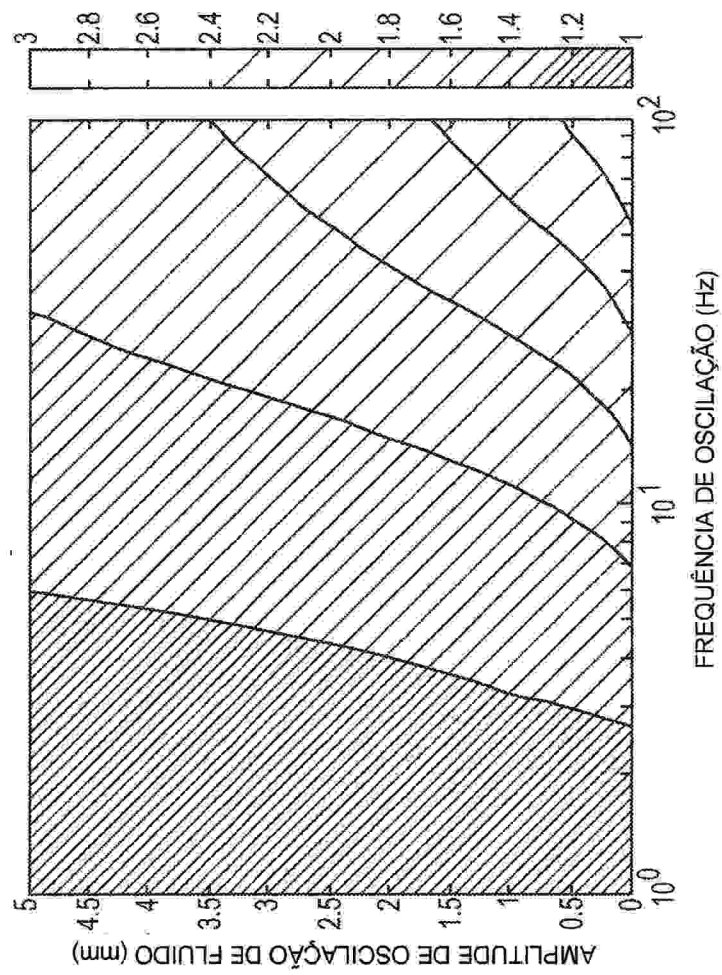


FIG. 3

ÂNGULO DE FASE ENTRE PARTÍCULA E FLUIDO (GRAUS), DENSIDADE DE FLUIDO 0,998 g/cm³,
DENSIDADE DE PARTÍCULA = 0,003 g/cm³, VISCOSIDADE 1 cP., DIÂMETRO DE PARTÍCULA = 1 mm

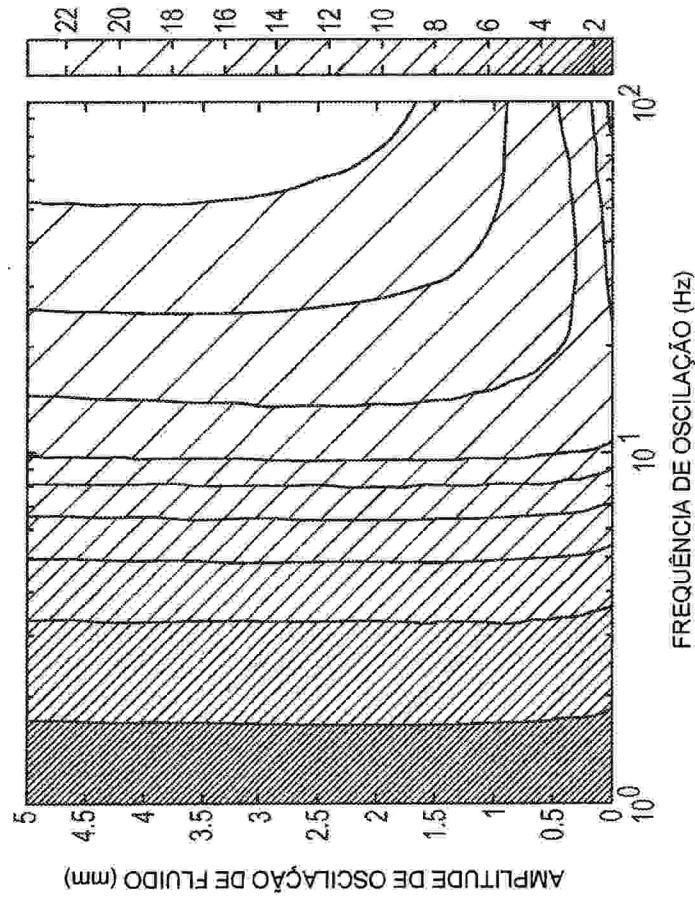


FIG. 4

RAZÃO DE DESACOPLOAMENTO CONTRA RAZÃO DE DENSIDADE
VARIANDO VISCOSIDADE E DENSIDADE DE PARTÍCULA

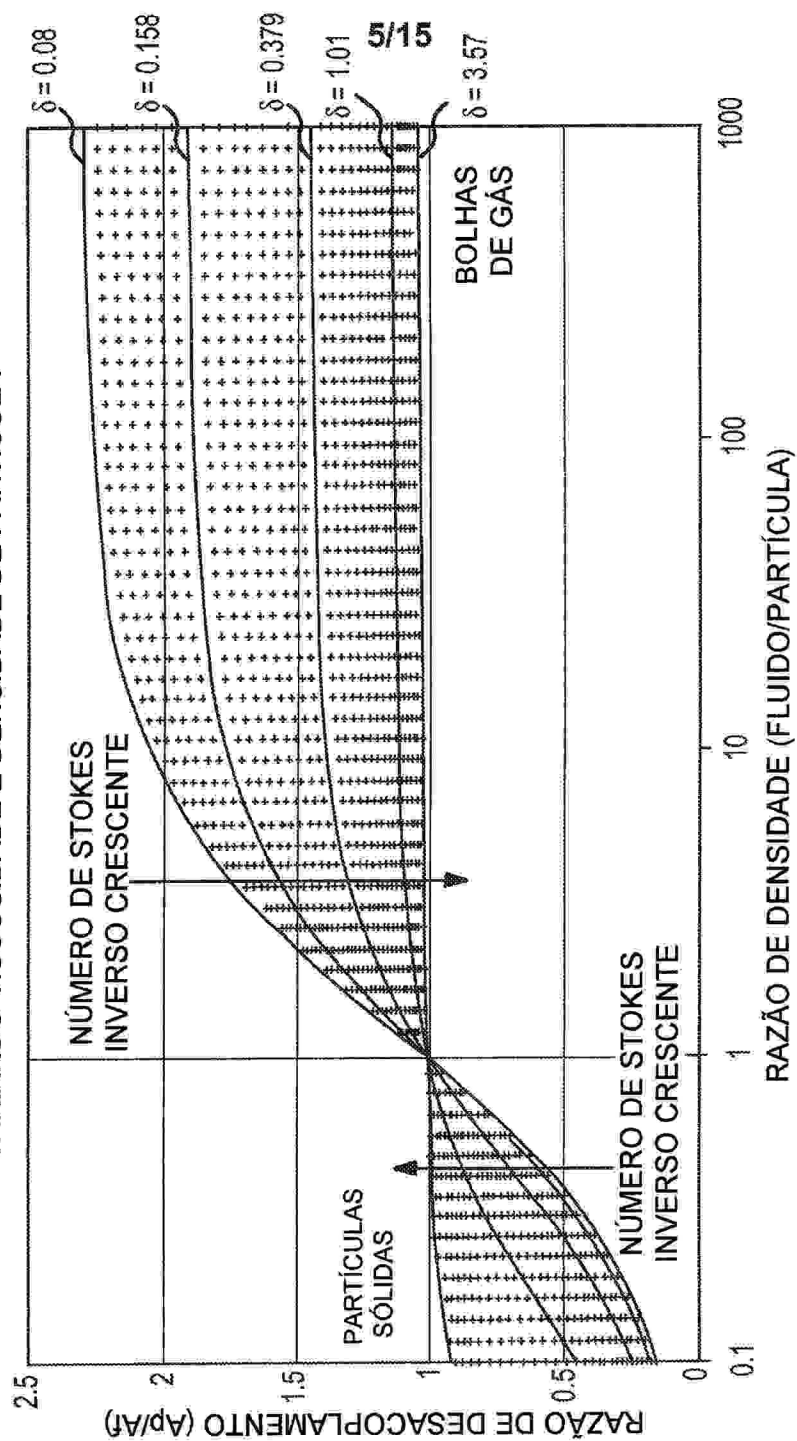


FIG. 5

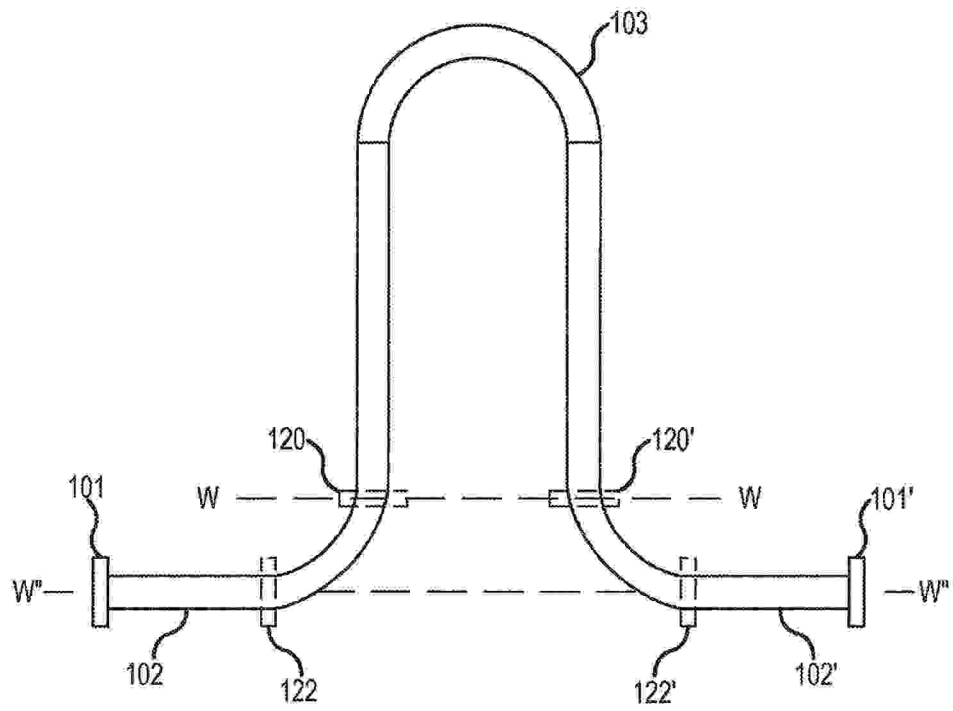


FIG. 6

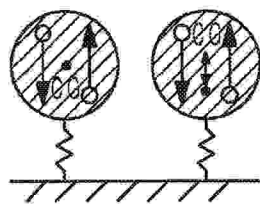


FIG. 7

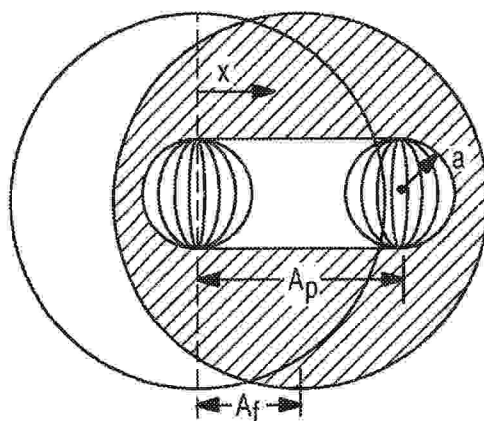


FIG. 8

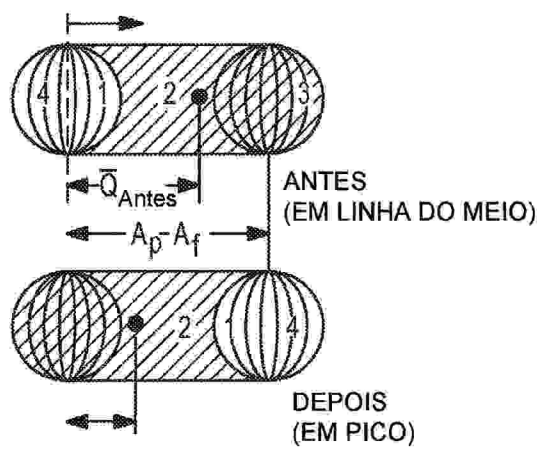


FIG.9

COMPONENTE	MASSA	CENTRO DE GRAVIDADE ANTES	CENTRO DE GRAVIDADE DEPOIS
(1) HEMISFÉRIO DE FLUIDO	$m_1 = -\rho_f \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \right)$	$\bar{q}_1 = \frac{3a}{8}$	$\bar{q}_1 = (A_p - A_f) \cdot \frac{3a}{8}$
(2) CILINDRO DE FLUIDO	$m_2 = \rho_f (\pi a^2) (A_p - A_f)$	$\bar{q}_2 = \frac{A_p - A_f}{2}$	$\bar{q}_2 = \frac{A_p - A_f}{2}$
(3) HEMISFÉRIO DE FLUIDO	$m_3 = \rho_f \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \right)$	$\bar{q}_3 = (A_p - A_f) + \frac{3a}{8}$	$\bar{q}_3 = \frac{3a}{8}$
(4) ESFERA DE PARTÍCULA	$m_4 = \rho_p \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \right)$	$\bar{q}_4 = 0$	$\bar{q}_4 = A_p - A_f$

FIG.10

ERRO DE DENSIDADE DE MISTURA DEVIDO AO DESACOPLAMENTO
 (1% FRAÇÃO DE VOLUME) FREQUÊNCIA = 100 Hz,
 DENSIDADE DE FLUIDO = 0,998 g/cm³, DIÂMETRO DE PARTÍCULA = 1 mm

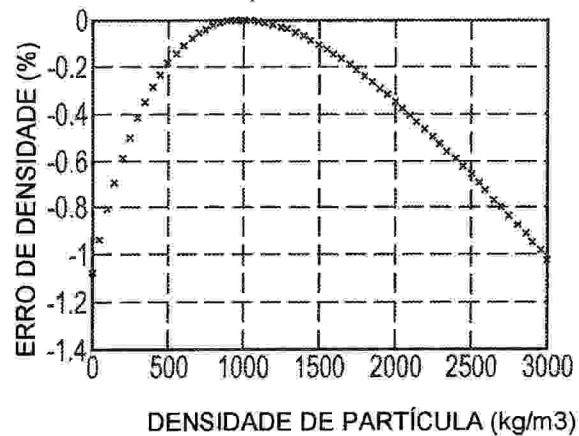


FIG.11

ERRO DE DENSIDADE (%) DEVIDO AO DESACOPLAMENTO
(1% FRAÇÃO DE VOLUME) DENSIDADE DE FLUIDO = 0,998 g/cm³,
DENSIDADE DE PARTÍCULA = 0,003 g/cm³, FREQUÊNCIA = 100 Hz

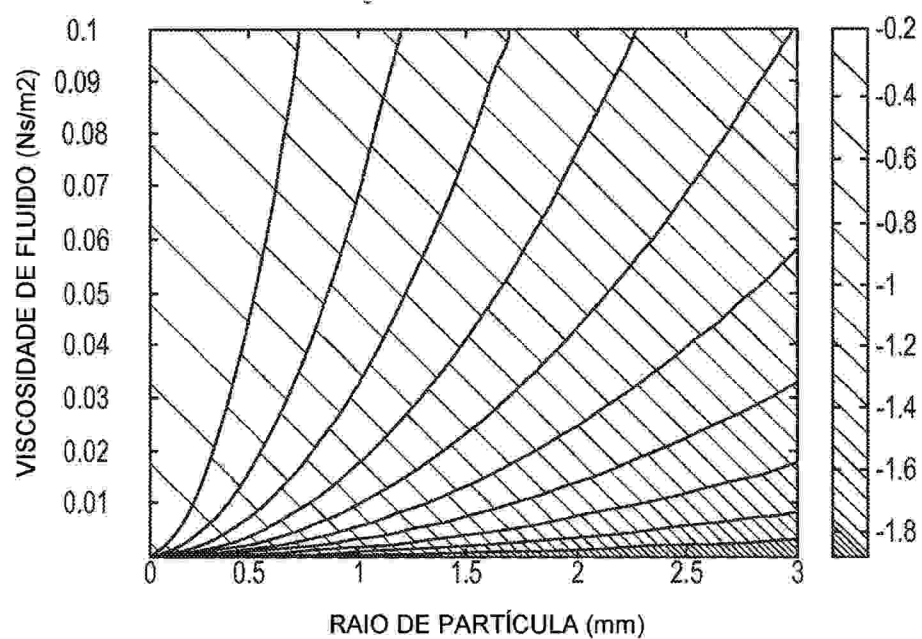


FIG.12

ERRO DE DENSIDADE (%) DEVIDO AO DESACOPLAMENTO
(1% FRAÇÃO DE VOLUME) DENSIDADE DE FLUIDO = 0,998 g/cm³,
FREQUÊNCIA = 100 Hz, DIÂMETRO DE PARTÍCULA = 1 mm

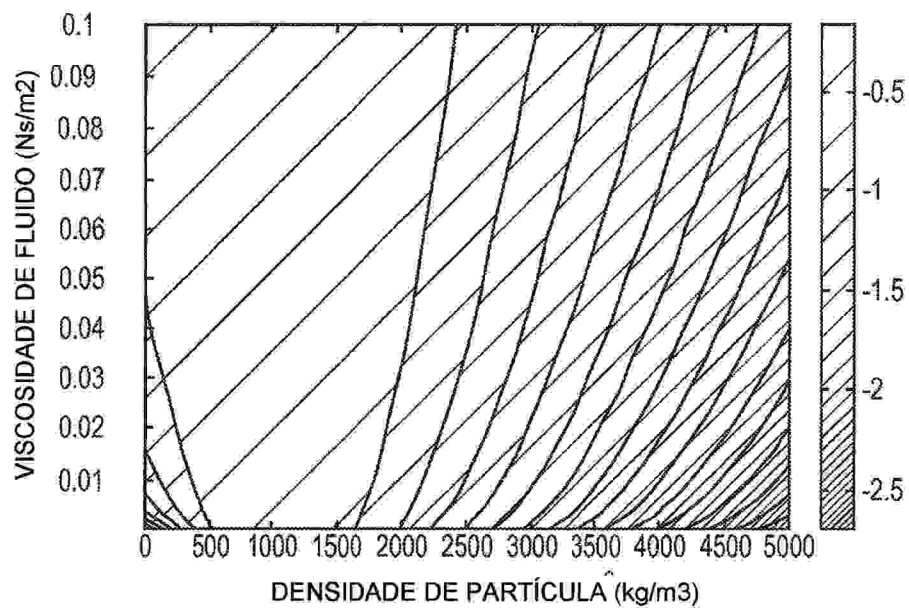


FIG.13

ERRO DE DENSIDADE (%) DEVIDO AO DESACOPLAMENTO (1% FRAÇÃO DE VOLUME) DENSIDADE DE FLUIDO = 0,998 g/cm³, DENSIDADE DE PARTÍCULA = 0,003 g/cm³, VISCOSIDADE = 1 cP, DIÂMETRO DE PARTÍCULA = 1 mm

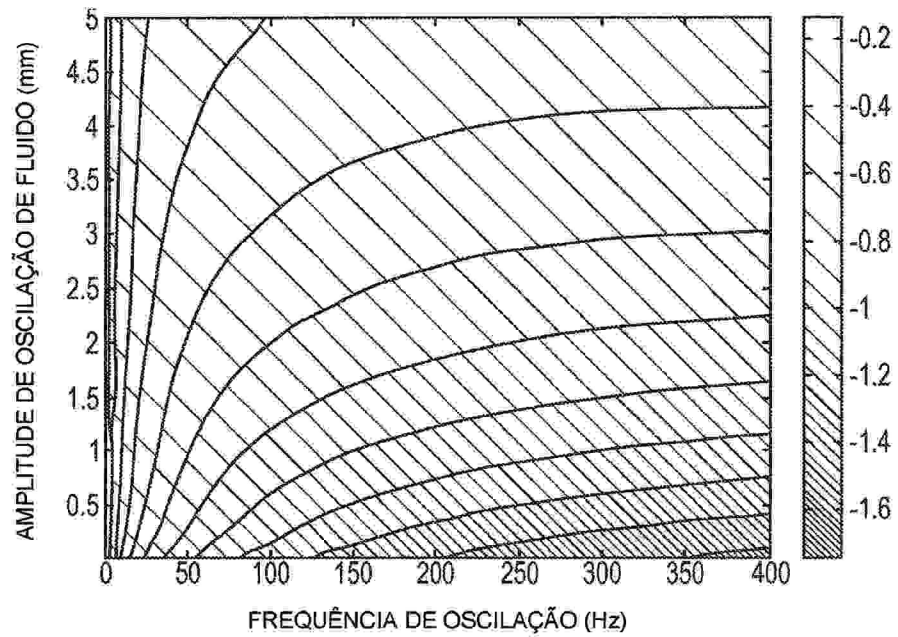


FIG.14

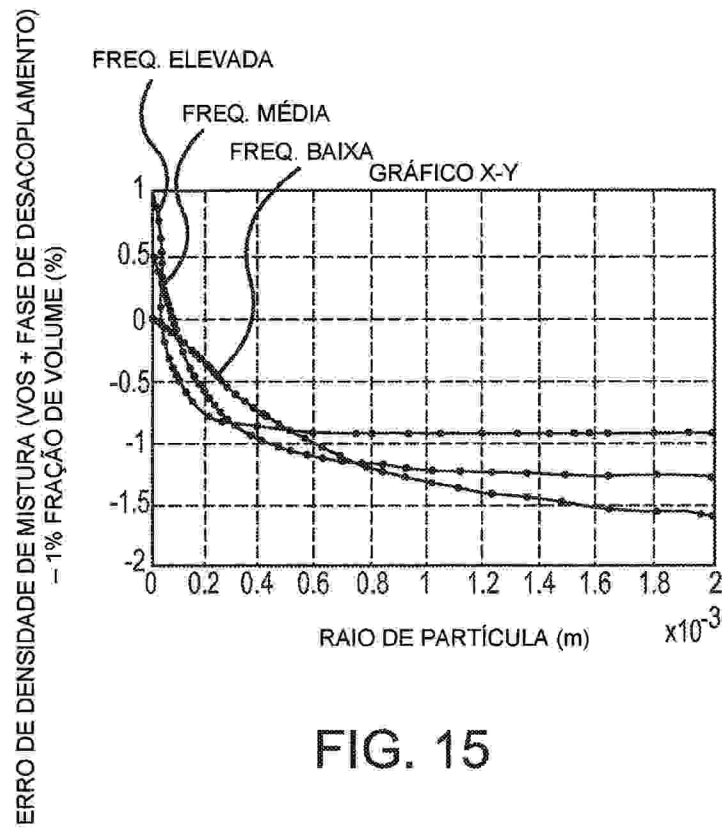


FIG. 15

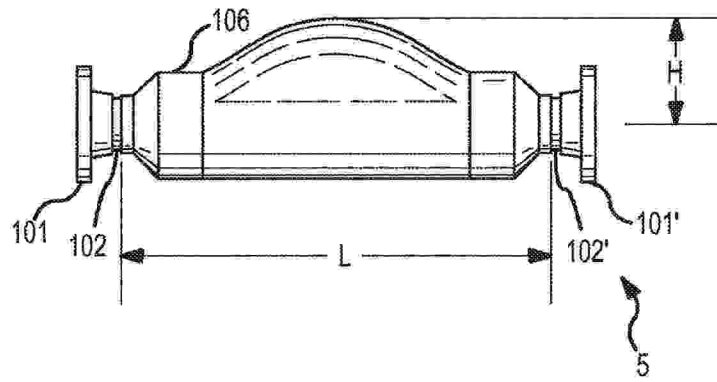


FIG. 16

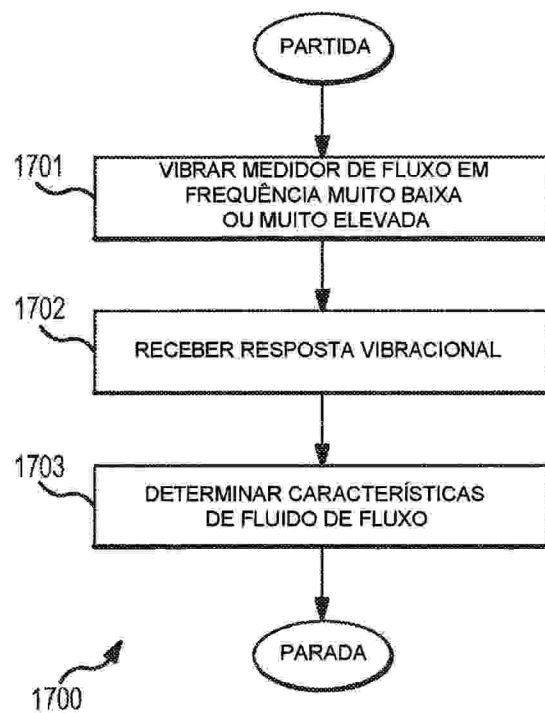


FIG.17