



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0508447-4 B1

(22) Data do Depósito: 03/03/2005

(45) Data de Concessão: 02/01/2018



(54) Título: MEDIDOR DE FLUXO CORIOLIS DE MÚLTIPLAS FASES

(51) Int.Cl.: G01F 1/84; G01F 1/74; G01F 15/02; G01N 9/00

(30) Prioridade Unionista: 02/03/2005 US 11/069,931, 03/03/2004 US 60/549,161

(73) Titular(es): INVENSYS SYSTEMS, INC.

(72) Inventor(es): MICHAEL S. TOMBS; MANUS P. HENRY; MIHAELA D. DUTA; ROBBIE LANSANGAN; ROBERT E. DUTTON; WADE M. MATTAR

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MEDIDOR DE FLUXO CORIOLIS DE MÚLTIPLAS FASES"**.

Campo Técnico

Esta descrição se refere a medidores de fluxo.

5 Antecedentes

Medidores de fluxo fornecem informação a cerca de materiais que são transferidos através de um conduto ou tubo de fluxo. Por exemplo, os medidores de fluxo de massa fornecem uma indicação da massa de material que é transferida através de um conduto. Similarmente, os medidores de fluxo de densidade, ou densitômetros, fornecem uma indicação da densidade de um material que flui através de um conduto. Os medidores de fluxo de massa também podem prover uma indicação da densidade do material.

Por exemplo, os medidores de fluxo de massa do tipo Coriolis se baseiam no efeito Coriolis, no qual o material que flui através de um conduto é afetado por uma força Coriolis, experimentando, portanto, uma aceleração. Muitos medidores de fluxo de massa do tipo Coriolis induzem uma força Coriolis através da oscilação senoidal de um conduto em torno de um eixo de pivotamento ortogonal ao comprimento do conduto. Em tais medidores de fluxo de massa, a força de reação Coriolis experimentada pela massa de fluido móvel é transferida para o conduto propriamente dito e é manifestada como uma deflexão ou um deslocamento do conduto na direção do vetor de força Coriolis no plano de rotação.

Sumário

De acordo com um aspecto geral, um sistema inclui um controlador que é operável para receber um sinal de sensor proveniente de um primeiro sensor conectado a um tubo de fluxo vibrável contendo um fluxo de fluido de três fases que inclui um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás, o controlador sendo adicionalmente operável para analisar o sinal de sensor para determinar um parâmetro de fluxo aparente do fluxo de fluido, um segundo sensor que é operável para determinar uma condição de fluxo aparente do fluxo de fluido, e um módulo de correções que é operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo aparente e

determinar um parâmetro de fluxo corrigido a partir daí.

Implementações podem incluir uma ou mais das seguintes características. Por exemplo, o módulo de correções pode ser adicionalmente operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo
5 aparente e determinar uma condição de fluxo corrigida a partir daí. O parâmetro de fluxo aparente pode incluir uma densidade em massa aparente do fluxo de fluido, ou uma velocidade de escoamento de massa em bruto aparente do fluxo de fluido.

O segundo sensor pode incluir uma sonda de fração de líquido
10 que é operável para determinar uma medição de fração de líquido que identifica uma fração de volume do primeiro líquido com relação ao segundo líquido, ou um sistema de determinação de fração de vazio que é operável para determinar uma fração de vazio do gás dentro do fluxo de fluido.

Um sistema de determinação de velocidade de escoamento de
15 componentes pode ser incluído, o qual é operável para determinar uma velocidade de escoamento do primeiro líquido dentro do fluxo de fluido. O sistema de determinação de velocidade de escoamento de componentes pode ser implementado no controlador, no módulo de correções, no segundo sensor, ou em um computador hóspede em comunicação com o controlador, o
20 módulo de correções, ou o segundo sensor.

Um sistema de determinação de velocidade de escoamento de componentes pode ser incluído, o qual é operável para determinar uma velocidade de escoamento do gás dentro do fluxo de fluido. A implementação do módulo de correções pode ser associada com um processador do controlador, ou com um processador do segundo sensor. Um computador hóspede
25 pode estar em comunicação com o controlador ou o segundo sensor e operável para implementar o módulo de correções.

No sistema, o segundo sensor pode ser operável para emitir um primeiro valor de condição de fluxo aparente para o controlador para uso na
30 determinação de um primeiro valor de parâmetro de fluxo corrigido, e o controlador pode ser operável para emitir o primeiro valor de parâmetro de fluxo corrigido para o segundo sensor para determinação de um primeiro valor de

condição de fluxo corrigida, e o segundo sensor pode ser operável para emitir um segundo valor de condição de fluxo corrigida para o controlador para uso na determinação do valor de parâmetro de fluxo corrigido.

O módulo de correção pode incluir uma rede neural que é operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo aparente e emitir o parâmetro de fluxo corrigido e uma condição de fluxo corrigida. A rede neural pode incluir um primeiro modelo de correção que é específico a um tipo do segundo sensor e condição de fluxo e que é operável para emitir uma condição de fluxo corrigida, e um segundo modelo de correção que é específico a um tipo do parâmetro de fluxo aparente e que é operável para emitir o parâmetro de fluxo corrigido, onde o primeiro modelo de correção pode ser operável para corrigir a condição de fluxo aparente com base na condição de fluxo aparente e no parâmetro de fluxo corrigido, e o segundo modelo de correção pode ser operável para corrigir o parâmetro de fluxo aparente no parâmetro de fluxo aparente e na condição de fluxo corrigida.

O controlador pode ser operável para corrigir o parâmetro de fluxo aparente com base em uma relação teórica entre o parâmetro de fluxo aparente e o parâmetro de fluxo corrigido. O controlador pode ser operável para corrigir o parâmetro de fluxo aparente com base em uma relação empírica entre o parâmetro de fluxo aparente e o parâmetro de fluxo corrigido.

O sistema pode incluir um conduto que conecta o segundo sensor e o tubo de fluxo vibrável, de tal modo que o fluxo de fluido flua através do segundo sensor, do tubo, e do tubo de fluxo vibrável. O primeiro líquido, o segundo líquido e o gás podem ser co-misturados entre si dentro do fluxo de fluido durante a determinação da condição de fluxo pelo segundo sensor.

De acordo com outro aspecto geral, é determinada uma densidade em massa aparente de um fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo, o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás. Uma velocidade de escoamento de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases e uma primeira velocidade de escoamento de massa do primeiro líquido são determinadas com base na densi-

dade em massa aparente e na velocidade de escoamento de massa em bruto aparente.

Implementações podem incluir uma ou mais das seguintes características. Por exemplo, pode ser determinada uma condição de fluxo aparente do fluxo de múltiplas fases diferente da densidade em massa aparente e da velocidade de escoamento de massa em bruto aparente, onde a determinação da primeira velocidade de escoamento de massa do primeiro líquido compreende a determinação da primeira velocidade de escoamento de massa com base na condição de fluxo aparente. Na determinação da primeira velocidade de escoamento de massa do primeiro líquido, uma condição de fluxo corrigida pode ser determinada com base na condição de fluxo aparente. Na determinação da condição de fluxo corrigida, podem ser determinadas uma densidade em massa corrigida e uma velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida.

A determinação da condição de fluxo aparente pode incluir a determinação de uma medição de fração de líquido aparente de uma fração de volume do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases e/ou a determinação de uma fração de vazio de gás aparente do gás dentro do fluxo de múltiplas fases.

A determinação da primeira velocidade de escoamento de massa do primeiro líquido pode incluir a determinação de uma densidade em massa corrigida, com base na densidade em massa aparente, e a determinação de uma velocidade de escoamento de massa em bruto, com base na velocidade de escoamento de massa aparente. A determinação da densidade em massa aparente e a determinação da velocidade de escoamento de massa em bruto podem incluir a determinação de uma condição de fluxo corrigida com base na condição de fluxo aparente.

De acordo com outro aspecto geral, um medidor de fluxo inclui um tubo de fluxo vibrável contendo um fluxo de três fases que inclui um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás, e um acionador conectado ao tubo de fluxo e operável para conferir movimento ao tubo de fluxo, um sensor conectado ao tubo de fluxo e operável para detectar o movimento do tu-

bo de fluxo e gerar um sinal de sensor, e um controlador conectado para receber o sinal de sensor e determinar uma primeira velocidade de escoamento de uma primeira fase dentro de um fluxo de três fases através do tubo de fluxo, com base no sinal de sensor.

5 De acordo com outro aspecto geral, um método de aperfeiçoar uma saída de um medidor de fluxo inclui a determinação de uma densidade em massa aparente de um fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo, o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás, a determinação de uma velocidade de escoamento de
10 massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases, a determinação de uma condição de fluxo aparente do fluxo de múltiplas fases, e a correção da densidade em massa aparente ou a velocidade de escoamento de massa aparente, com base na densidade em massa aparente, na velocidade de escoamento de massa aparente e na condição de fluxo aparente.

15 De acordo com outro aspecto geral, um método de aperfeiçoar uma saída de uma sonda de fração de líquido inclui a determinação de uma densidade em massa aparente de um fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo, o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás, a determinação de uma velocidade de escoamento de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases, a determinação de uma fração de líquido aparente do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases, e a correção da fração de líquido aparente para se obter
20 uma fração de líquido corrigida, com base na densidade em massa aparente, na velocidade de escoamento de massa aparente e na fração de líquido aparente.
25

Implementações podem incluir uma ou mais das seguintes características. Por exemplo, uma fração de vazão de gás do gás dentro do fluxo de múltiplas fases pode ser determinada com base na densidade em massa aparente, na velocidade de escoamento de massa aparente e na fração de líquido corrigida.
30

De acordo com outro aspecto geral, um método de se obter uma medição de fração de vazão de gás inclui a determinação de uma densidade

em massa aparente de um fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo, o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás, a determinação de uma velocidade de escoamento de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases, a determinação de uma fração de vazio de gás aparente do gás dentro do fluxo de múltiplas fases, e a correção da fração de vazio de gás aparente para se obter uma fração de vazio de gás corrigido, com base na densidade em massa aparente, na velocidade de escoamento de massa aparente e na fração de vazio de gás aparente.

10 Implementações podem incluir uma ou mais das seguintes características. Por exemplo, uma fração de líquido do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases pode ser determinada com base na densidade em massa aparente, na velocidade de escoamento de massa aparente e na fração de líquido corrigida.

15 De acordo com outro aspecto geral, um sistema inclui um conduto apresentando um fluxo de fluido através do mesmo, o fluxo de fluido incluindo pelo menos um primeiro componente líquido, um segundo componente líquido e um componente de gás, um tubo de fluxo vibrável em série com o conduto e apresentando o fluxo de fluido através do mesmo, um primeiro sensor operável para determinar uma primeira propriedade aparente do fluxo de fluido através do conduto, um segundo sensor conectado ao tubo de fluxo e operável para detectar a informação a cerca de um movimento do tubo de fluxo, um acionador conectado ao tubo de fluxo e operável para conferir energia ao tubo de fluxo, um sistema de controle e de medição operável para
20 medir uma segunda propriedade aparente e uma terceira propriedade aparente do fluxo de fluido, e um sistema de correções operável para determinar uma primeira propriedade corrigida, uma segunda propriedade corrigida e uma terceira propriedade corrigida, com base na primeira propriedade aparente, na segunda propriedade aparente e na terceira propriedade aparente.

30 De acordo com outro aspecto geral, um sistema inclui um controlador que é operável para determinar uma primeira propriedade aparente de um fluxo de fluido, no qual um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás

são co-misturados, um medidor que é operável para medir uma segunda propriedade aparente do fluxo de fluido, e um módulo de correções que é operável para introduzir a primeira propriedade aparente e emitir uma primeira propriedade corrigida, onde o medidor é operável para introduzir a primeira propriedade corrigida e a segunda propriedade aparente e emitir uma segunda propriedade corrigida.

Os detalhes de uma ou mais implementações são mostrados nos desenhos anexos e na descrição abaixo. Outras características se tornarão evidentes a partir da descrição e dos desenhos e a partir das reivindicações.

Descrição dos Desenhos

A figura 1A é uma ilustração de um medidor de fluxo Coriolis que usa um tubo de fluxo curvo.

A figura 1B é uma ilustração de um medidor de fluxo Coriolis que usa um tubo de fluxo reto.

A figura 2 é um diagrama de bloco de um medidor de fluxo Coriolis.

A figura 3 é um fluxograma que ilustra uma operação do medidor de fluxo Coriolis da Figura 2.

A figura 4 é um fluxograma que ilustra técnicas para determinar as velocidades de escoamento de líquido e gás para um fluxo de duas fases.

As figuras 5A e 5B são gráficos que ilustram uma porcentagem de erro em uma medição de uma fração de vazio e uma fração de líquido, respectivamente.

A figura 6 é um gráfico que ilustra um erro de fluxo de massa como uma função de uma queda na densidade para um tubo de fluxo apresentando uma orientação específica e sobre uma faixa de fluxo selecionada.

A figura 7 é um fluxograma que ilustra técnicas para corrigir medições de densidade.

A figura 8 é uma tabela que mostra uma relação entre uma queda de densidade aparente e uma velocidade de escoamento de massa aparente do fluxo de duas fases.

A figura 9 é um fluxograma que ilustra técnicas para determinar as medições de fração de vazio.

A figura 10 é um fluxograma que ilustra técnicas para determinar medições de velocidade de escoamento de massa corrigidas.

5 A figura 11 é uma tabela que mostra uma relação entre uma velocidade de escoamento de massa aparente e uma queda de densidade corrigida do fluxo de duas fases.

As figuras 12 a 14 são gráficos que ilustram exemplos de correções de densidade para inúmeros tubos de fluxo.

10 As figuras 15 a 20 são gráficos que ilustram exemplos de correções de velocidade de escoamento de massa para inúmeros tubos de fluxo.

A figura 21 é um diagrama de bloco de um sistema de medidor de fluxo.

15 A figura 22 é um diagrama de uma primeira implementação do sistema da Figura 21.

A figura 23 é um diagrama de bloco de uma segunda implementação do sistema da Figura 21.

A figura 24 é um diagrama de bloco de uma implementação do sistema de correções 2108 das Figuras 21 a 23.

20 A figura 25 é um fluxograma que ilustra uma primeira operação dos medidores de fluxo das Figuras 21 a 23.

A figura 26 é um fluxograma que ilustra um primeiro exemplo das técnicas da Figura 25.

25 A figura 27 é um fluxograma que ilustra um segundo exemplo das técnicas da Figura 25.

A figura 28 é um fluxograma que ilustra um terceiro exemplo das técnicas da Figura 25.

A figura 29 é um fluxograma que ilustra técnicas para determinar velocidades de escoamento componentes para um fluxo de três fases.

30 A figura 30 é um fluxograma que ilustra técnicas mais específicas para executar as determinações da Figura 29.

As figuras 31A-31D são gráficos que ilustram a correção de uma

velocidade de escoamento de massa de um líquido de duas fases em um fluxo de três fases.

A figura 32 é um gráfico que mostra um erro de fluxo de massa como uma função da velocidade de escoamento de massa para óleo e água.

5 A figura 33 é um gráfico que mostra um erro de fração de vazio de gás como uma função da fração de vazio de gás real.

A figura 34 é uma representação gráfica de um modelo de rede neural.

10 A figura 35 é uma representação gráfica de unidades do modelo da Figura 34.

As figuras 36A, 36B, e 37A-D ilustram resultados dos dados de fluxo de duas fases aos quais é aplicado o modelo das Figuras 34 e 35.

As figuras 38-68 são gráficos que ilustram resultados de prova e/ou modelagem de várias implementações descritas acima com relação às
15 Figuras 1-37, ou implementações afins.

Descrição Detalhada

Tipos de medidores de fluxo incluem medidores de fluxo digitais. Por exemplo, a Patente Norte-americana 6.311.136, que é aqui incorporada para referência, descreve o uso de um medidor de fluxo digital e tecnologia
20 afim incluindo técnicas de processamento e de medição de sinal. Tais medidores de fluxo digitais podem ser muito precisos em suas medições, com pouco ruído ou ruído insignificante, e podem ser capazes de permitir uma ampla faixa de ganhos positivos e negativos nos circuitos de alimentação para acionar o conduto. Tais medidores de fluxo digitais são, portanto, vanta-
25 josos em uma variedade de cenários. Por exemplo, a Patente Norte-americana cedida em comum 6.505.519, que é aqui incorporada para referência, descreve o uso de uma ampla faixa de ganho, e/ou o uso de ganho negativo, para impedir o enguiço e para exercitar o controle do tubo de fluxo com maior precisão, mesmo durante condições difíceis, tal como o fluxo de
30 duas fases (por exemplo, um fluxo contendo uma mistura de líquido e gás).

Embora medidores de fluxo digitais sejam especificamente discutidos abaixo com relação, por exemplo, às Figuras 1 e 2, deve ser enten-

dido que também existem medidores de fluxo analógicos. Embora tais medidores de fluxo analógicos possam ser propensos a inconvenientes típicos de circuitos analógicos, por exemplo, medições de baixa precisão e ruído elevado com relação aos medidores de fluxo digitais, eles também podem ser compatíveis com as várias técnicas e implementações discutidas aqui. Desse modo, na seguinte discussão, o termo "medidor de fluxo" ou "medidor" é usado para indicar qualquer tipo de dispositivo e/ou sistema no qual um sistema de medidor de fluxo Coriolis usa vários sistemas de controle e elementos afins para medir um fluxo de massa, uma densidade, e/ou outros parâmetros de material(ais) que se move(m) através de um tubo de fluxo ou outro conduto.

A figura 1A é uma ilustração de um medidor de fluxo digital que usa um tubo de fluxo curvo 102. Especificamente, o tubo de fluxo curvo 102 pode ser usado para medir uma ou mais características físicas de um fluido (móvel), por exemplo, conforme indicado acima. Na Figura 1A, um transmissor digital 104 troca os sinais de sensor e de comando com tubo de fluxo curvo 102, de modo a tanto detectar uma oscilação do tubo de fluxo curvo 102 como para acionar a oscilação do tubo de fluxo curvo 102 de acordo. Com a determinação rápida e precisa dos sinais do sensor e de comando, o transmissor digital 104, indicado acima, confere uma operação rápida e precisa do tubo de fluxo curvo 102. Exemplos do transmissor digital 104 que são usados com um tubo de fluxo curvo são providos, por exemplo, na Patente Norte-americana cedida em comum 6.311.136.

A figura 1B é uma ilustração de um medidor de fluxo digital que usa um tubo de fluxo reto 106. Mais especificamente, na Figura 1B, o tubo de fluxo reto 106 interage com o transmissor digital 104. Tal tubo de fluxo reto opera similarmente ao tubo de fluxo curvo 102 em um nível conceitual, e apresenta várias vantagens/desvantagens com relação ao tubo de fluxo curvo 102. Por exemplo, o tubo de fluxo reto 106 pode ser mais fácil de ser (completamente) enchido e esvaziado do que o tubo de fluxo curvo 102, simplesmente devido à geometria de sua construção. Em operação, o tubo de fluxo curvo 102 pode operar em uma frequência de 50-110 Hz, por exem-

5 plo, enquanto o tubo de fluxo reto 106 pode operar em uma frequência de 300-1000 Hz, por exemplo. O tubo de fluxo curvo 102 representa tubos de fluxo apresentando uma variedade de diâmetros, e pode ser operado em múltiplas orientações, tal como, por exemplo, em uma orientação vertical ou horizontal.

Com referência à Figura 2, um medidor de fluxo de massa digital 200 inclui o transmissor digital 104, um ou mais sensores de movimento 205, um ou mais acionadores 210, um tubo de fluxo 215 (que pode também ser denominado de conduto, e que pode representar ou o tubo de fluxo curvo 102, ou o tubo de fluxo reto 106, ou algum outro tipo de tubo de fluxo), e um sensor de temperatura 220. O transmissor digital 104 pode ser implementado com o uso de um ou mais destes itens, por exemplo: um processador, um Processador de Sinal Digital (DSP), um circuito integrado de lógica programável com uma alta densidade de portas (FPGA), um circuito integrado de aplicação específica (ASIC), outra lógica programável ou circuitos integrados, ou lógica programável com um núcleo de processador. Deve ser entendido que, conforme descrito na Patente 6.311.136, conversores do digital para o analógico associados podem ser incluídos para operação dos acionadores 210, enquanto os conversores do analógico para o digital podem ser usados para converter sinais de sensor dos sensores 205 para uso pelo transmissor digital 104.

O transmissor digital 104 gera uma medição, por exemplo, da densidade e/ou fluxo de massa de um material que flui através do tubo de fluxo 215, com base pelo menos nos sinais recebidos dos sensores de movimento 205. O transmissor digital 104 também controla os acionadores 210 para induzir o movimento no tubo de fluxo 215. Este movimento é detectado pelos sensores de movimento 205.

As medições de densidade do material que flui através do tubo de fluxo estão relacionadas, por exemplo, com a frequência do movimento do tubo de fluxo 215 que é induzido no tubo de fluxo 215 por uma força motriz suprida pelos acionadores 210, e/ou à temperatura do tubo de fluxo 215. Similarmente, o fluxo de massa através do tubo de fluxo 215 está relaciona-

do com a fase e a frequência do movimento do tubo de fluxo 215, bem como com a temperatura do tubo de fluxo 215.

A temperatura no tubo de fluxo 215, que é medida com o uso do sensor de temperatura 220, afeta certas propriedades do tubo de fluxo, tais como sua rigidez e dimensões. O transmissor digital 104 pode compensar estes efeitos de temperatura. Também, na Figura 2, um sensor de pressão 225 está em comunicação com o transmissor 104, e é conectado ao tubo de fluxo 215 de modo a ser operável para detectar uma pressão de um material que flui através do tubo de fluxo 215.

Deve ser entendido que tanto a pressão do fluido que entra no tubo de fluxo 215 como a queda de pressão através de pontos relevantes no tubo de fluxo podem ser indicadores de certas condições de fluxo. Também, enquanto sensores de temperatura externos podem ser usados para medir a temperatura de fluido, tais sensores podem ser usados além de um sensor de medidor de fluxo interno designado para medir uma temperatura representativa para calibrações de tubo de fluxo. Também, alguns tubos de fluxo usam múltiplos sensores de temperatura para a finalidade de corrigir medições para um efeito de temperatura diferencial entre o fluido do processo e o ambiente (por exemplo, a temperatura de um invólucro de um alojamento do tubo de fluxo). Conforme discutido em maiores detalhes abaixo, um uso potencial para as medições de temperatura e pressão de fluido de entrada é o de calcular as densidades reais de um líquido e gás em um fluxo de duas fases, com base nas fórmulas predefinidas.

Uma sonda de fração de líquido 230 se refere a um dispositivo para medir uma fração de volume do líquido, por exemplo, água, quando um líquido no tubo de fluxo 215 incluir água e outro fluido, tal como óleo. Naturalmente, tal sonda, ou sondas similares, podem ser usadas para medir a fração de volume de um fluido diferente de água, se tal medição for preferida ou se o líquido não incluir água. Na descrição abaixo, um líquido medido é geralmente assumido como sendo água para fins de exemplo, de modo que a sonda de fração de líquido 230 seja geralmente denominada de sonda de fração de água 230, ou sonda de corte de água 230.

Um sensor de fração de vazio 235 mede uma porcentagem de um material no tubo de fluxo 215 que está na forma gasosa. Por exemplo, a água que flui através do tubo de fluxo 215 pode conter ar, talvez na forma de bolhas. Tal condição, na qual o material que flui através do tubo de fluxo 215 contém mais de um material, é geralmente denominada de "fluxo de duas fases". Em particular, o termo "fluxo de duas fases" pode se referir a um líquido e um gás; contudo, o termo "fluxo de duas fases" pode também se referir a outras combinações de materiais, tais como dois líquidos (por exemplo, óleo e água).

Há várias técnicas, representadas geralmente na Figura 2 pelo sensor de fração de vazio 235, para medir a fração de vazio de gás em um fluxo de duas fases de líquido e gás. Por exemplo, há vários sensores ou sondas, os quais podem ser inseridos no fluxo para determinar uma fração de vazio de gás. Como outro exemplo, um tubo venturi (isto é, um tubo com um gargalo comprimido que determina as pressões e velocidades de fluido por meio da medição das pressões diferenciais geradas no gargalo à medida que um fluido atravessa o tubo), que conta com o fato de o gás geralmente se mover com uma velocidade mais alta do que o(s) líquido(s) através de uma restrição, pode ser usado para determinar um gradiente de pressão e assim permitir uma determinação da fração de vazio de gás. A medição das frações de vazio de gás pode também ser conseguida com o uso do equipamento que é totalmente externo ao tubo de fluxo. Por exemplo, medições a sonar podem ser tomadas para determinar a fração de vazio de gás. Como um exemplo específico de tal sistema com base sonar, pode ser usado o sistema de monitoramento de fração de vazio de gás SONARtrac™ produzido pela CiDRA Corporation of Wallingford, Connecticut.

Nesta descrição, uma quantidade de gás em um fluido fluente, medida pelo sensor de fração de vazio, ou de outro modo determinada, é denominada de fração de vazio ou α , e é definida como $\alpha = \text{volume de gás} / \text{volume total} = \text{volume de gás} / (\text{volume de líquido} + \text{volume de gás})$. Consequentemente, uma quantidade denominada aqui de fração de líquido é definida como $1 - \alpha$.

Em muitas aplicações onde as medições de fluxo de massa são exigidas, a fração de vazio do fluxo pode ser tão alta quanto 20, 30, 40% ou mais. Entretanto, mesmo em frações de vazios muito pequenas de 0,5%, a teoria fundamental oculta sob o medidor de fluxo Coriolis se torna menos aplicável.

Além disso, a presença de gás no fluxo de fluido também pode afetar tanto um valor real como um valor medido de uma densidade de fluxo de fluido, geralmente fazendo com que a medição de densidade seja inferior ou seja lida a menor do que se o fluxo de fluido contivesse apenas o componente líquido. Isto é, deve ser entendido que uma densidade ρ_{liquid} de um líquido que flui sozinho através de um tubo de fluxo será maior do que uma densidade real ρ_{true} de um fluxo de duas fases contendo o líquido e um gás, uma vez que uma densidade do gás (por exemplo, ar) será geralmente mais baixa do que uma densidade do líquido (por exemplo, água) no fluxo de duas fases. Em outras palavras, haverá uma redução da densidade, quando o gás for acrescentado a um fluxo de líquido que anteriormente continha apenas o líquido.

Além deste fenômeno físico, a medição de um medidor Coriolis de um fluxo de fluido de duas fases contendo gás pode emitir uma leitura de densidade ρ_{apparent} que é uma medição ostensível da densidade em massa do fluxo de duas fases (por exemplo, da água e do ar combinados). Esta medição bruta ρ_{apparent} será geralmente diferente (inferior) da densidade em massa real ρ_{true} do fluxo de duas fases. Por exemplo, a frequência ressonante usada pelo medidor de fluxo pode ser correta para uma situação na qual apenas o componente líquido está presente, mas, devido ao relativo movimento do gás no fluxo de fluido, que serve para mascarar uma inércia do tubo de fluxo (isto é, faz com que uma quantidade de inércia seja menor do que seria esperado para um fluxo de líquido apenas), a medição da densidade pode ser lida a menor. Deve ser entendido que muitos medidores de fluxo convencionais da técnica anterior não tratavam deste problema, uma vez que a maioria de tais medidores Coriolis deixam de continuar a operar (por exemplo, enguiçam ou emitem medições imprecisas) mesmo em quan-

tidades mais insignificantes de fração de vazio.

A Patente Norte-americana No. 6.505.519, que é acima incorporada para referência, descreve que tal variação de ρ_{apparent} (isto é, uma leitura de densidade em massa indicada de um fluxo de duas fases que é emitido por um medidor de fluxo Coriolis) de ρ_{true} (isto é, uma densidade em massa real do fluxo de duas fases) pode ser caracterizada por uma variedade de técnicas. Como resultado, uma ρ_{apparent} medida pode ser corrigida para se obter uma densidade em massa real $\rho_{\text{corrected}}$, que é, pelo menos aproximadamente, igual a ρ_{true} .

Relativamente similar, uma velocidade de escoamento de massa em bruto indicada MF_{apparent} (isto é, uma velocidade de escoamento de massa de todo o fluxo de duas fases) medida por um medidor de fluxo Coriolis pode ser diferente em uma quantidade prognosticável ou caracterizável de uma velocidade real de escoamento de massa em bruto MF_{true} . Deve ser entendido que as técnicas de correção para a velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida MF_{true} podem ser diferentes das técnicas para a correção da densidade. Por exemplo, várias técnicas para corrigir uma MF_{apparent} medida para se obter uma MF_{true} real (ou, pelo menos, $MF_{\text{corrected}}$) são discutidas na Patente Norte-americana No. 6.505.519.

Exemplos de técnicas detalhadas para corrigir ρ_{apparent} e MF_{apparent} são discutidas em maiores detalhes abaixo. Em geral, contudo, com relação à Figura 2, o transmissor digital é mostrado como incluindo um sistema de correção de densidade 240 que tem acesso a um banco de dados de correção de densidade 245, e um sistema de correção de velocidade de escoamento de massa 250 que tem acesso a um banco de dados de correção de fluxo de massa 255. Conforme discutido em maiores detalhes abaixo, os bancos de dados 245 e 255 podem conter, por exemplo, algoritmos de correção que foram derivados teoricamente ou obtidos empiricamente, e/ou tabelas de correção que conferem valores corrigidos de fluxo de massa ou densidade para um determinado conjunto de parâmetros de entrada. Os bancos de dados 245 e 255 podem também armazenar uma variedade de outros tipos de informação que podem ser úteis na execução das correções

de fluxo de massa e densidade. Por exemplo, o banco de dados de correção de densidade pode armazenar inúmeras densidades ρ_{liquid} correspondendo a líquidos específicos (por exemplo, água ou óleo).

Além disso, na Figura 2, um sistema de determinação/correção de fração 260 é operável para determinar uma fração de vazio de um fluxo de duas fases incluindo um líquido e um gás. Em uma implementação, por exemplo, o sistema de determinação/correção de fração de vazio 260 pode determinar uma fração de vazio real α_{true} da densidade corrigida $\rho_{\text{corrected}}$. Em outra implementação, o sistema de determinação/correção de fração de vazio 260 pode introduzir uma medição de fração de vazio aparente ou indicada obtida pelo sensor de fração de vazio 235, e pode corrigir esta medição com base em uma caracterização de erro similar às técnicas de fluxo de massa e densidade indicadas acima. Em outra implementação, o sensor de fração de vazio 235 pode ser operável para diretamente medir uma fração de vazio real α_{true} , em cujo caso o sistema de determinação/correção de fração de vazio 260 simplesmente introduz esta medição.

Uma vez que os fatores de $\rho_{\text{corrected}}$, $MF_{\text{corrected}}$, e $\alpha_{\text{corrected}}$ tenham sido determinados, e talvez em conjunção com outras quantidades conhecidas ou descobertas, um sistema de determinação de velocidade de escoamento de massa componente de fluxo 265 opera para simultaneamente determinar uma velocidade de escoamento de massa para o componente de fase líquida e uma velocidade de escoamento de massa para o componente de fase gasosa. Isto é, o transmissor 104 é operável para determinar velocidades de escoamento individuais MF_{liquid} e MF_{gas} dos componentes de fluxo, em oposição a meramente determinar a velocidades de escoamento em bruto do fluxo de duas fases combinado ou total MF_{true} . Embora, conforme indicado, tais medições possam ser determinadas e/ou emitidas simultaneamente, elas podem também ser determinadas separadamente ou independentemente uma da outra.

Uma vez que as velocidades de escoamento de componente MF_{liquid} e MF_{gas} tenham sido determinadas na maneira geralmente indicada acima, estas determinações iniciais podem ser aperfeiçoadas por meio de

um processo que conta com velocidades superficiais dos componentes de fluxo, velocidades de deslizamento entre os componentes, e/ou um regime de fluxo identificado do fluxo. Desta maneira, podem ser obtidos valores aperfeiçoados para velocidades de escoamento MF_{liquid} e MF_{gas} , ou podem
 5 ser obtidos no decorrer do tempo na medida em que essas velocidades de escoamento mudam.

Velocidades superficiais são denominadas aqui de velocidades que existiriam, se a mesma velocidade de escoamento de massa de uma determinada fase estivesse percorrendo como uma única fase através do
 10 tubo de fluxo 215. Um sistema de determinação/correção de velocidade superficial 270 é incluído no transmissor 104 para, por exemplo, determinar uma velocidade superficial aparente ou corrigida de um gás ou líquido no fluxo de duas fases.

Velocidades de deslizamento se referem a uma condição na
 15 qual as fases gasosa e líquida em um fluxo de duas fases apresentam diferentes velocidades médias. Isto é, uma velocidade média de um gás AV_{gas} é diferente de uma velocidade média de um líquido AV_{liquid} . Assim, um deslizamento de fase S pode ser definido como $S = AV_{gas}/AV_{liquid}$.

Um regime de fluxo é um termo que se refere a uma caracterização da maneira na qual o fluxo de duas fases através do tubo de fluxo 215
 20 um com relação ao outro e/ou ao tubo de fluxo 215, e pode ser expresso, pelo menos parcialmente, em termos das velocidades superficiais recém-determinadas. Por exemplo, um regime de fluxo é conhecido como "regime de bolhas", no qual o gás é aprisionado como bolhas dentro de um líquido.
 25 Como outro exemplo, o termo "regime porções" se refere a uma série de "bocados" ou "porções" de líquido separados por receptáculos de gás relativamente grandes. Por exemplo, no fluxo vertical, o gás em um regime de fluxo de porções pode ocupar quase toda uma área de seção transversal do tubo de fluxo 215, de modo que o fluxo resultante seja alternado entre a
 30 composição de alto conteúdo de líquido e alto conteúdo de gás. Outros regimes de fluxo são conhecidos como existindo e como apresentando certas características definidas, incluindo, por exemplo, o regime de fluxo anular, o

regime de fluxo disperso, e o regime de fluxo de espuma, e outros.

A existência de um regime de fluxo específico é conhecida como sendo influenciada por uma variedade de fatores, incluindo, por exemplo, uma fração de vazio de gás no fluxo de fluido, uma orientação do tubo de
5 fluxo 215 (por exemplo, vertical ou horizontal), um diâmetro do tubo de fluxo 215, os materiais incluídos dentro do fluxo de duas fases, e as velocidades (e velocidades relativas) dos materiais dentro do fluxo de duas fases. Dependendo destes e de outros fatores, um fluxo de fluido específico pode transitar entre vários regimes de fluxo sobre um período determinado de
10 tempo.

Informação a cerca do deslizamento de fase pode ser determinada, pelo menos em parte, a partir de conhecimento de regime de fluxo. Por exemplo, no regime de fluxo de bolhas, assumindo-se que as bolhas são uniformemente distribuídas, pode haver pouco movimento relativo entre as
15 fases. Quando as bolhas forem reunidas e combinadas para formarem uma distribuição menos uniforme da fase gasosa, um certo deslizamento poderá ocorrer entre as fases, com o gás tendendo a atravessar por completo a fase líquida.

Na figura 2, é incluído um sistema de determinação de regime
20 de fluxo 275, o qual tem acesso a um banco de dados 280 dos mapas de regime de fluxo. Desta maneira, a informação a cerca de um regime de fluxo existente, incluindo a informação de deslizamento de fase, pode ser obtida, armazenada, e acessada para uso nas velocidades de escoamento de massa de gás e líquido simultaneamente determinantes dentro de um fluxo de
25 duas fases.

Na Figura 2, deve ser entendido que os vários componentes do transmissor digital 104 estão em comunicação mútua, embora elos de comunicação não sejam explicitamente ilustrados, para fins de clareza. Além disso, deve ser entendido que os componentes convencionais do transmissor digital 104 não são ilustrados na Figura 2, mas são assumidos como e-
30 xistindo dentro do transmissor digital 104, ou sendo acessíveis ao transmissor digital 104. Por exemplo, o transmissor digital 104 irá tipicamente incluir

sistemas de medição de velocidade de escoamento de massa e densidade (em massa), bem como circuitos de comando para acionar o acionador 210.

A figura 3 é um fluxograma 300 que ilustra uma operação do medidor de fluxo Coriolis 200 da Figura 2. Especificamente, a Figura 3 ilustra técnicas por meio das quais o medidor de fluxo 200 da Figura 2 é operável para simultaneamente determinar as velocidades de escoamento de líquido e gás MF_{liquid} e MF_{gas} para um fluxo de duas fases.

Na Figura 3, é determinado que um fluxo de gás/líquido de duas fases exista no tubo de fluxo 215 (302). Isto é feito, por exemplo, por um operador durante a configuração do densitômetro/medidor de fluxo de massa para o fluxo de gás/líquido. Como outro exemplo, esta determinação pode ser feita automaticamente com o uso de uma característica do medidor Coriolis para detectar a existência uma condição de fluxo de gás-líquido de duas fases. No último caso, tais técnicas são descritas em maiores detalhes, por exemplo, na Patente Norte-americana No. 6.311.136 e Patente Norte-americana No. 6.505.519, incorporadas acima para referência.

Uma vez que seja estabelecida a existência de fluxo de duas fases, uma densidade em massa aparente $p_{corrected}$ é estabelecida (304) pelo sistema de correção de densidade 240, usando o banco de dados de correção de densidade 245 do transmissor 104. Isto é, uma densidade indicada $p_{apparent}$ é corrigida para se obter $p_{corrected}$. Técnicas para executar esta correção são discutidas em maiores detalhes abaixo.

Uma vez que $p_{corrected}$ seja determinada, uma fração de vazio de gás corrigida $\alpha_{corrected}$ poderá ser determinada (306) pelo sistema de determinação/correção de fração de vazio 260. Também, uma velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida $MF_{corrected}$ é determinada (308) pelo sistema de correção de velocidade de escoamento de massa 250. Como com a densidade, técnicas para se obter a fração de vazio corrigida α_{true} e a velocidade de escoamento de massa $MF_{corrected}$ são discutidas em maiores detalhes abaixo.

Na Figura 3, deve ser entendido a partir do fluxograma 300 que as determinações de $p_{corrected}$, $\alpha_{corrected}$, e $MF_{corrected}$ podem ocorrer em inú-

meras seqüências. Por exemplo, em uma implementação, a fração de vazio corrigida $\alpha_{corrected}$ é determinada com base na densidade corrigida anteriormente calculada $\rho_{corrected}$, em consequência do que a velocidade de escoamento de massa corrigida $MF_{corrected}$ é determinada com base em $\alpha_{corrected}$.

- 5 Em outra implementação, $\alpha_{corrected}$ e $\rho_{corrected}$ podem ser calculadas uma independente da outra, e/ou $\rho_{corrected}$ e $MF_{corrected}$ podem ser calculadas uma independente da outra.

Uma vez que a densidade corrigida $\rho_{corrected}$, a fração de vazio corrigida $\alpha_{corrected}$, e a velocidade de escoamento de massa corrigida $MF_{corrected}$ são conhecidas, então, as velocidades de escoamento de massa dos componentes de gás e líquido são determinadas (310) pelo sistema de determinação de velocidade de escoamento de massa de componente de fluxo 265. Técnicas para determinar as velocidades de escoamento de componente de líquido/gás são discutidas em maiores detalhes abaixo com relação à Figura 4.

Uma vez determinadas, as velocidades de escoamento de componente de líquido/gás podem ser emitidas ou exibidas (312) para uso por um operador do medidor de fluxo. Desta maneira, o operador é provido, talvez simultaneamente, com informação a cerca tanto da velocidade de escoamento de massa de líquido MF_{liquid} como da velocidade de escoamento de massa de gás MF_{gas} de um fluxo de duas fases.

Em alguns exemplos, esta determinação pode ser suficiente (314), em cujo caso a emissão das velocidades de escoamento de componente de líquido/gás completa a emissão do fluxo de processo. Entretanto, em outras implementações, a determinação das velocidades de escoamento de massa de componentes individuais pode ser aperfeiçoada com o fatoramento na informação a cerca, por exemplo, das velocidades superficiais dos componentes de gás/líquido, do(s) regime(s) de fluxo do fluxo, e do deslizamento de fase, caso haja algum, entre os componentes.

Em particular, as velocidades superficiais do gás e líquido, SV_{gas} e SV_{liquid} são determinadas, como segue. A velocidade superficial do gás SV_{gas} é definida como:

$$SV_{\text{gas}} = MF_{\text{gas}} / (\rho_{\text{gas}} * A_T) \quad \text{Eq. 1}$$

onde a quantidade A_T representa uma área da seção transversal do tubo de fluxo 215, que pode ser tomada em um ponto onde uma fração de vazio do fluxo é medida. Similarmente, uma velocidade superficial líquida SV_{liquid} é definida como:

$$SV_{\text{liquid}} = MF_{\text{liquid}} / (\rho_{\text{liquid}} * A_T) \quad \text{Eq. 2}$$

Conforme mostrado nas Equações 1 e 2, a determinação das velocidades superficiais neste contexto conta com a determinação anterior de MF_{gas} e MF_{liquid} . Deve ser entendido a partir da descrição acima e a partir da Figura 3 que MF_{gas} e MF_{liquid} representam velocidades de escoamento de massa corrigida ou real, $MF_{\text{gas}}^{\text{corrected}}$ e $MF_{\text{liquid}}^{\text{corrected}}$, uma vez que estes fatores são calculados com base em ρ_{true} , α_{true} , e MF_{true} . Como resultado, as velocidades superficiais SV_{gas} e SV_{liquid} representam valores corrigidos $SV_{\text{gas}}^{\text{corrected}}$ e $SV_{\text{liquid}}^{\text{corrected}}$. Além disso, os valores de densidade ρ_{gas} e ρ_{liquid} se referem, como acima, a densidades conhecidas do líquido e gás em questão, que podem ser armazenadas no banco de dados de correção de densidade 245. Conforme discutido em maiores detalhes abaixo com relação às técnicas para calcular a densidade corrigida $\rho_{\text{corrected}}$, os valores de densidade ρ_{gas} e ρ_{liquid} podem ser conhecidos como uma função da temperatura ou pressão existente, conforme detectado pelo sensor de temperatura 220 e sensor de pressão 225.

- 5 Com o uso de velocidades superficiais e outros fatores conhecidos ou calculados, alguns dos quais podem ser armazenados no banco de dados dos mapas de regime de fluxo 280, um regime de fluxo relevante e/ou deslizamento de fase podem ser determinados (318) pelo sistema de determinação/correção de regime de fluxo 275. Uma vez que velocidades superficiais, o regime de fluxo, e o deslizamento de fase são conhecidos, correções adicionais podem ser feitas à densidade em massa aparente ρ_{true} , à velocidade de escoamento de massa em bruto aparente $MF_{\text{corrected}}$, e/ou à fração de vazio corrigida $\alpha_{\text{corrected}}$. Desta maneira, conforme ilustrado na Figura 3,
- 10

podem ser determinadas as velocidades de escoamento de componente MF_{gas} e MF_{liquid} .

O(s) regime(s) de fluxo no fluxo de líquido/gás de duas fases pode ser descrito por contornos em um gráfico que traça a velocidade superficial do líquido versus a velocidade superficial do gás. Como recém-descrito, um aperfeiçoamento às determinações de $\rho_{corrected}$, $\alpha_{corrected}$, e/ou $MF_{corrected}$ pode ser obtido estabelecendo primeiro um valor aproximado das velocidades de escoamento de líquido e gás, e aplicando então um modelo mais detalhado para o regime de fluxo identificado. Por exemplo, em uma GVF relativamente baixa e fluxo relativamente alto, há um regime de fluxo no qual o fluido aerado se comporta como um fluido homogêneo com pouco ou nenhum erro tanto no fluxo de massa como na densidade. Isto pode ser detectado como um fluxo homogêneo que não exige qualquer correção, simplesmente usando a observação do ganho de acionamento que mostra pouco ou nenhum aumento em tal cenário, em vez de uma queda significativa na densidade observada.

A figura 4 é um fluxograma 400 que ilustra técnicas para determinar as velocidades de escoamento de líquido e gás MF_{liquid} MF_{gas} para um fluxo de duas fases. Isto é, o fluxograma 400 representa, em geral, um exemplo de técnicas para determinar as velocidades de escoamento de líquido e gás (310), conforme descrito acima com relação à Figura 3.

Na Figura 4, a determinação de velocidades de escoamento de líquido e gás (310) começa com a introdução da densidade corrigida, da fração de vazio, e dos fatores de velocidade de escoamento de massa $\rho_{corrected}$, $\alpha_{corrected}$, e $MF_{corrected}$ (402). Em um primeiro exemplo, (404), as velocidades de escoamento de líquido e gás são determinadas (406) usando as Equações 3 e 4:

$$MF_{gas} = \alpha_{corrected} (\rho_{gas}/\rho_{true}) (MF_{corrected}) \quad \text{Eq. 3}$$

$$MF_{liquid} = (1 - \alpha_{corrected})(\rho_{liquid}/\rho_{corrected}) (MF_{corrected}) \quad \text{Eq. 4}$$

As equações 3 e 4 assumem que não há qualquer velocidade de deslizamento (isto é, deslizamento de fase) entre as fases de líquido e gás

(isto é, a velocidade média da fase gasosa, AV_{gas} , e a velocidade média da fase líquida, AV_{liquid} , são iguais). Esta suposição é consistente com o fato de que, no primeiro exemplo, as velocidades superficiais e os regimes de fluxo (e, portanto, o deslizamento de fase) não foram determinados.

- 5 No segundo exemplo e posteriormente (404), é feita uma determinação, talvez pelo sistema de determinação/correção de regime de fluxo 275, de se o deslizamento de fase existe (408). Caso contrário, então, as equações 3 e 4 são usadas novamente (406) ou o processo é terminado.

- 10 Se o deslizamento de fase não existir (408), definido acima como $S = AV_{gas}/AV_{liquid}$, os termos MF_{gas} e MF_{liquid} são calculados com o uso da área da seção transversal do tubo de fluxo 215, A_T , como também usado no cálculo de velocidades superficiais nas equações 1 e 2 (410). Usando a definição de deslizamento S recém-fornecida,

$$MF_{gas} = \rho_{gas} (\alpha_{corrected} A_T) (AV_{gas}) = \rho_{gas} (\alpha_{corrected} A_T)(S)(AV_{liquid}) \quad \text{Eq. 5}$$

$$MF_{liquid} = \rho_{liquid} ((1-\alpha_{corrected}) A_T) (AV_{liquid}) \quad \text{Eq. 6}$$

- 15 Uma vez que $MF_{corrected} = MF_{gas} + MF_{liquid}$, as equações 5 e 6 podem ser solucionadas para AV_{liquid} para se obter a equação 7:

$$AV_{liquid} = MF_{true} / (A_T (\rho_{gas}\alpha_{corrected} + \rho_{liquid}(1-\alpha_{corrected}))) \quad \text{Eq. 7}$$

Como resultado, as velocidades de escoamento de líquido e gás são determinadas (406) com o uso das equações 8 e 9:

$$MF_{liquid} = [\rho_{liquid} (1-\alpha_{corrected}) / (\rho_{gas}\alpha_{corrected} + \rho_{liquid} (1-\alpha_{corrected}))] [MF_{corrected}] \quad \text{Eq. 8}$$

$$MF_{gas} = MF_{corrected} - MF_{liquid} \quad \text{Eq. 9}$$

- 20 Conforme descrito acima, o gás aprisionado no líquido forma um fluxo de duas fases. Medições de tal fluxo de duas fases com um medidor de fluxo Coriolis resultam em parâmetros indicados $\rho_{apparent}$, $\alpha_{apparent}$, e $MF_{apparent}$ para densidade, fração de vazio, e velocidade de escoamento de massa, respectivamente, do fluxo de duas fases. Devido à natureza do fluxo de duas fases em relação a uma operação do medidor de fluxo Coriolis, estes valores indicados são incorretos em um fator prognosticável. Como resultado, os
- 25 parâmetros indicados podem ser corrigidos para se obter parâmetros reais

$\rho_{corrected}$, $\alpha_{corrected}$, e $MF_{corrected}$. Por sua vez, os valores reais corrigidos podem ser usados para simultaneamente determinar velocidades de escoamento individuais dos dois componentes (gás e líquido).

As figuras 5A e 5B são gráficos que ilustram um erro percentual em uma medição de fração de vazio e fração de líquido, respectivamente. Na Figura 5A, o erro percentual é um erro percentual de densidade que é dependente de vários desenhos parâmetros operacionais e de desenho, e geralmente se refere ao desvio da densidade aparente (indicada) originária da densidade real combinada que seria esperada, dada a porcentagem (%) de gás no líquido.

Na Figura 5B, é ilustrada a fração de líquido real versus fração de líquido indicada. A figura 5B mostra os resultados, para o desenho de medidor de fluxo relevante, de diversos tamanhos de linha de velocidades de escoamento. Em termos mais gerais, a relação funcional pode ser mais complexa e depende tanto do tamanho de linha como da velocidade de escoamento. Na Figura 5B, é mostrado um ajuste polinomial simples, o qual pode ser usado para corrigir a fração de líquido aparente.

Outras técnicas de representação por meio de um gráfico podem ser usadas; por exemplo, a fração de vazio real pode ser traçada contra a fração de vazio indicada. Por exemplo, a Figura 6 é um gráfico que ilustra um erro de fluxo de massa como uma função de uma queda na densidade para um tubo de fluxo apresentando uma orientação específica sobre uma faixa de fluxo selecionada.

A figura 7 é um fluxograma 700 que ilustra técnicas para corrigir as medições de densidade (304, na Figura 3). Na Figura 7, o processo começa com uma introdução do tipo do tubo de fluxo 215 que é usado (702), que pode incluir, por exemplo, se o tubo de fluxo 215 é curvo ou reto, bem como outros fatos relevantes, tal como um tamanho ou a orientação do tubo de fluxo 215.

Em seguida, é determinada uma densidade isenta de gás do líquido, ρ_{liquid} (704). Esta quantidade pode ser útil no(s) seguinte(s) cálculo(s), bem como em assegurar que outros fatores que podem influenciar a

medição da densidade ρ_{apparent} , tal como a temperatura, não sejam interpretados erroneamente como efeitos de fração de vazio. Em uma implementação, o usuário pode introduzir a densidade de líquido ρ_{liquid} diretamente, juntamente com uma dependência de temperatura da densidade. Em outra implementação, fluidos conhecidos (e suas dependências de temperatura) podem ser armazenados no banco de dados de correção 245, em cujo caso o usuário pode introduzir um fluido por nome. Em ainda outra implementação, o medidor de fluxo 200 pode determinar a densidade de líquido durante um tempo de fluxo de líquido de fase única, e armazenar este valor para um futuro uso.

Uma velocidade de escoamento de massa indicada MF_{apparent} é lida do medidor Coriolis (706), e depois uma densidade indicada ρ_{apparent} é lida do medidor Coriolis (708). Depois, o sistema de correção de densidade 240 aplica ou um algoritmo teórico (710) ou uma correção tabular empírica (712) para determinar a densidade real ρ_{true} da mistura de gás/líquido. A quantidade ρ_{true} pode ser então emitida como a densidade corrigida (714).

Uma correção de densidade algorítmica (710) pode ser determinada com base no conhecimento de que, caso não existisse nenhum efeito do fluxo de duas fases da operação normal de um medidor Coriolis quando usado para medir a densidade, a densidade indicada cairia em uma quantidade derivada da equação que descreve a fração de vazio, que é explicada acima em termos do fluxo de volume e repetida aqui em termos da densidade como equação 10:

$$\alpha(\%) = [(\rho_{\text{apparent}} - \rho_{\text{liquid}}) / (\rho_{\text{gas}} - \rho_{\text{liquid}})] \times 100$$

Eq. 10

Isto pode ser suado para definir uma "queda de densidade" de quantidade, ou $\Delta \rho$, conforme mostrado na equação 11:

$$\Delta \rho = (\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{apparent}}) / \rho_{\text{liquid}} = \alpha(\%) \times ((\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{gas}}) / \rho_{\text{liquid}}) / 100$$

Eq. 11

É notado que a equação 11 mostra a quantidade $\Delta \rho$ como sendo positiva; entretanto, esta quantidade poderia ser mostrada como uma

queda negativa simplesmente pela multiplicação do lado direito da equação por -1, resultando na equação 12:

$$\Delta \rho = (\rho_{\text{apparent}} - \rho_{\text{liquid}}) / \rho_{\text{liquid}} = \alpha(\%) \times ((\rho_{\text{gas}} - \rho_{\text{liquid}}) / \rho_{\text{liquid}}) / 100 \quad \text{Eq. 12}$$

A quantidade ρ_{gas} pode ser pequena comparada a ρ_{liquid} , em cujo caso a equação 12 pode ser simplificada na equação 13:

$$\Delta \rho = (\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{apparent}}) = \alpha(\%) / 100 \quad \text{Eq. 13}$$

5 Conforme discutido extensivamente acima, as medições de densidade por meio de um medidor Coriolis, ou qualquer outro densitômetro de vibração, são geralmente subrelatadas pelo medidor, e exigem correção. Conseqüentemente, de acordo com o fluxo de duas fases, a equação 12 ou
10 queda de densidade corrigida ou real, $\Delta \rho_{\text{true}}$, e uma queda de densidade indicada ou aparente, $\Delta \rho_{\text{app}}$. Com o uso da equação 13 como um exemplo, isto resulta nas equações 14 e 15:

$$\Delta \rho_{\text{true}} = (\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{true}}) = \alpha(\%) / 100 \quad \text{Eq. 14}$$

$$\Delta \rho_{\text{app}} = (\rho_{\text{liquid}} - \rho_{\text{apparent}}) = \alpha(\%) / 100 \quad \text{Eq. 15}$$

Podem ser derivadas ou empiricamente determinadas uma relação entre $\Delta \rho_{\text{true}}$ e $\Delta \rho_{\text{apparent}}$ e a velocidade de escoamento de massa aparente, MF_{apparent} , bem como outros parâmetros, tais como, por exemplo, o
15 ganho de acionamento, o equilíbrio do sensor, a temperatura, o regime de fase, etc. Esta relação pode ser expressa conforme mostrado como $\Delta \rho_{\text{true}} = f(MF_{\text{apparent}}, \rho_{\text{apparent}}, \text{ganho de acionamento, equilíbrio de sensor, temperatura, regime de fase, e/ou outros fatores})$.

20 Como resultado, a relação pode ser geralmente derivada, ou pelo menos demonstrada para cada tubo de fluxo em cada cenário. Para um tubo de fluxo modelo, conhecido e denominado aqui como o tubo de fluxo modelo Foxboro/Invensys CFS10, foi empiricamente determinado que, para algumas condições, a relação funcional acima pode ser simplificada como
25 sendo apenas uma função Δ_{apparent} e da forma mostrada na equação 16:

$$\Delta\rho_{true} = \sum_{i=0}^M a_i (\Delta\rho_{apparent})^i \quad \text{Eq. 16}$$

Para forçar a condição para ambos os lados da equação 16 para ser zero, quando não houver quaisquer resultados de relação de queda de densidade aparente na equação 17:

$$\Delta\rho_{true} = \sum_{i=1}^M a_i (\Delta\rho_{apparent})^i \quad \text{Eq. 17}$$

M geralmente depende da complexidade da relação empírica, mas, em muitos casos, pode ser tão pequeno quanto 2 (quadrático) ou 3 (cúbico).

Uma vez que é determinada a queda da densidade real, sendo então alcançada através das equações acima, ela segue em frente para derivar a densidade real de mistura ρ_{true} , bem como as frações reais (de vazio) de líquido e gás (a última sendo discutida em maiores detalhes com relação à Figura 9).

Uma conexão tabular para densidade (712) poderá ser usada, quando, por exemplo, uma relação funcional for complexa demais ou inconveniente para ser implementada. Em tais casos, o conhecimento das quantidades $\Delta\rho_{apparent}$ e $\Delta MF_{apparent}$ pode ser usado para determinar $\Delta\rho_{true}$ por meio do emprego de uma tabela apresentando a forma de uma tabela 800 da Figura 8.

A tabela 800 pode ser, por exemplo, uma tabela de consulta tabular que pode ser, por exemplo, armazenada no banco de dados 245, ou em outra memória, para uso através de múltiplas aplicações da tabela. Adicionalmente, a tabela pode ser povoada durante um procedimento de inicialização, para armazenamento no banco de dados 245 para uma aplicação individual da tabela.

Deve ser entendido que cada ou ambas as formas algorítmica e tabular podem ser estendidas para incluir múltiplas dimensões, tais como, por exemplo, ganho, temperatura, equilíbrio, ou regime de fluxo. A correção algorítmica ou tabular pode também ser estendida para incluir outras técnicas de ajuste de superfície, tal como, por exemplo, rede neural, funções de base radial, análises de ondulações, ou análise de componentes principais.

Como resultado, deve ser entendido que tais extensões podem ser implementadas no contexto da Figura 3 durante a abordagem descrita aqui. Por exemplo, durante um primeiro exemplo, a densidade pode ser determinada, conforme descrito acima. Depois, durante um segundo exemplo, quando um regime de fluxo tiver sido identificado, a densidade poderá ser adicionalmente corrigida com o uso da informação de regime de fluxo.

A figura 9 é um fluxograma 900 que ilustra técnicas para determinar medições de fração de vazio (306 na Figura 3). Na Figura 9, o processo começa com uma introdução pelo sistema de determinação de fração de vazio 240 das densidades (corrigidas) de líquido e em massa anteriormente determinadas, ρ_{liquid} e ρ_{true} (902).

Uma densidade do gás, ρ_{gas} , é então determinada (904). Como com a densidade de líquido ρ_{liquid} , há várias técnicas para determinar ρ_{gas} . Por exemplo, ρ_{gas} pode ser simplesmente assumida como sendo uma densidade de ar, geralmente em uma pressão conhecida, ou pode ser uma densidade real conhecida do gás específico em questão. Como outro exemplo, esta densidade conhecida ρ_{gas} pode ser um dos fatores acima (isto é, densidade conhecida do ar ou gás específico) em uma pressão real ou calculada, conforme detectado pelo sensor de pressão 225, e/ou em uma temperatura real ou calculada, conforme detectada pelo sensor de temperatura 220. A temperatura e a pressão podem ser monitoradas com o uso de equipamento externo, conforme mostrado na Figura 2, incluindo o sensor de temperatura 220 e/ou o sensor de pressão 225.

Além disso, o gás pode ser conhecido como apresentando características específicas com relação aos fatores incluindo pressão, temperatura, ou compressibilidade. Estas características podem ser introduzidas juntamente com uma identificação do gás, e usadas na determinação da densidade de gás corrente ρ_{gas} . Como com o(s) líquido(s), múltiplos gases podem ser armazenados na memória, talvez juntamente com as características recém-descritas, de modo que um usuário possa acessar as características de densidade de um gás específico simplesmente com a seleção do gás por nome a partir de uma lista.

Uma vez que os fatores ρ_{liquid} , ρ_{gas} , e ρ_{true} são conhecidos, então, deve ficar claro a partir da equação 10 que a fração de vazio α_{true} pode ser facilmente determinada (906). Depois, caso necessário, a fração de líquido pode ser determinada (908) simplesmente pelo cálculo $1-\alpha_{\text{true}}$.

5 Embora a discussão acima apresente técnicas para determinar a fração de vazio α_{true} com base na densidade, deve ser entendido que a fração de vazio pode ser determinada por outras técnicas. Por exemplo, uma fração de vazio indicada α_{apparent} pode ser diretamente determinada pelo medidor de fluxo Coriolis, talvez em conjunção com outros sistemas de de-
10 terminação de fração de vazio (representados pelo sensor de fração de vazio 235 da Figura 2), e depois corrigida com base nas equações empíricas ou derivadas para se obter α_{true} . Em outras implementações, tais sistemas de determinação de fração de vazio externos podem ser usados para prover uma medição direta de α_{true} .

15 A figura 10 é um fluxograma 1000 que ilustra técnicas para determinar medições de velocidade de escoamento de massa corrigida (308 na Figura 3). Na Figura 10, o sistema de correção de velocidade de escoamento de massa 250 introduz primeiro a queda de densidade corrigida anteriormente calculada $\Delta\rho_{\text{true}}$ (1002), e depois introduz uma velocidade de escoamento de massa aparente medida MF_{apparent} (1004).
20

O sistema de correção de velocidade de escoamento de massa 250 aplica ou uma correção tabular (1006) ou algorítmica (1008) para determinar a velocidade real de escoamento de massa MF_{true} da mistura de gás/líquido. A quantidade MF_{true} pode ser então emitida como a velocidade de escoamento de massa corrigida (1010).
25

Na aplicação da correção tabular para a velocidade de escoamento de massa (1006), o conhecimento das quantidades $\Delta\rho_{\text{true}}$ e ΔMF_{true} pode ser usado para determinar MF_{true} por meio do emprego de uma tabela que apresenta a forma de uma tabela 1100 da Figura 11.

30 A tabela 1100, como com a tabela 800, pode ser, por exemplo, uma tabela de consulta tabular que pode ser, por exemplo, armazenada no banco de dados 245, ou em outra memória, para uso através de múltiplas

aplicações da tabela. Adicionalmente, a tabela pode ser povoada durante um procedimento de inicialização, para armazenamento no banco de dados 255 para uma aplicação individual da tabela.

- Valores normalizados MF_{norm_app} e MF_{norm_true} podem ser usados
- 5 no lugar dos valores reais mostrados acima, a fim de cobrir mais de um tamanho de tubo de fluxo Coriolis. Também, as entradas podem se apresentar em termos da correção, onde a correção é definida pela equação 18:

$$\Delta MF = MF_{true} - MF_{apparent} \quad \text{Eq. 18}$$

Os valores na equação 18 devem ser entendidos como representando ou valores reais ou valores normalizados.

- 10 Em uma abordagem algorítmica, como com a densidade, a correção para o fluxo de massa pode ser implementada por meio de uma relação funcional teórica ou empírica que é geralmente entendida como sendo da forma $\Delta MF = f(MF_{apparent})$, fração de vazio, ganho de acionamento, equilíbrio de sensor, temperatura, regime de fase, e/ou outros fatores).

- 15 Para alguns casos, a função pode ser simplificada em um polinômio, tal como, por exemplo, o polinômio mostrado na equação 19:

$$\Delta MF = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N a_i b_j (\Delta \rho_{true}^i) (MF_{norm_app}^j) \quad \text{Eq. 19}$$

Para alguns conjuntos de condições, a relação funcional pode ser uma combinação de um polinômio e expoente, conforme mostrado na equação 20:

$$\Delta MF = a_1 d e^{(a_2 d^2 + a_3 d + a_4 m^2 + a_5 m)} + a_6 d^2 + a_7 d + a_8 m^2 + a_9 m$$

Eq. 20

- 20 Na equação 20, $d = \Delta P_{true}$ e $m = f(MF_{apparent})$.

Em uma implementação, m na equação 20 pode ser substituído pela velocidade líquida superficial aparente SV_{liquid} , que é fornecida conforme descrito acima pela equação 2 como $SV_{liquid} = MF_{liquid} / (\rho_{liquid} * A_T)$. Neste caso, ρ_{liquid} e a seção transversal do tubo de fluxo A_T são parâmetros conheci-

dos ou introduzidos, e podem ser conectados em tempo real para temperatura usando, por exemplo, o dispositivo de medição de temperatura disponível 220 do controlador/transmissor digital 104.

Deve ser entendido que, como com as condições de densidade
5 discutidas acima, ou cada ou ambas as formas algorítmica e tabular podem ser estendidas para incluir múltiplas dimensões, tais como, por exemplo, ganho, temperatura, equilíbrio ou regime de fluxo. A correção algorítmica ou tabular pode também ser estendida para incluir outras técnicas de ajuste de superfície, tal como, por exemplo, rede neural, funções de base radial, análises de ondulações, ou análise de componentes principais.
10

Como resultado, deve ser entendido que tais extensões podem ser implementadas no contexto da Figura 3 durante a abordagem descrita aqui. Por exemplo, durante um primeiro exemplo, a velocidade de escoamento de massa pode ser determinada conforme descrito acima. Depois,
15 durante um segundo exemplo, quando um regime de fluxo tiver sido identificado, a velocidade de escoamento de massa poderá ser adicionalmente corrigida com o uso da informação de regime de fluxo.

Todas as relações funcionais acima para a velocidade de escoamento de massa podem ser novamente expressas com o uso da fração de gás (α) ou fração de líquido ($100 - \alpha$) em vez da queda de densidade, conforme refletido na tabela 1100 da Figura 11. Também, embora os métodos acima descritos sejam dependentes do conhecimento da queda de densidade corrigida $\Delta\rho_{true}$, deve ser entendido que outras técnicas podem ser usadas para corrigir uma velocidade de escoamento de massa indicada. Por
25 exemplo, várias técnicas para corrigir as medições de velocidade de escoamento de massa de um fluxo de duas fases são discutidas na Patente Norte-americana 6.505.519, incorporada acima para referência.

Tendo sido descritas as correções de densidade, de fração de vazio, e de velocidade de escoamento de massa em termos gerais, para fins
30 de, por exemplo, simultaneamente calcular velocidades de escoamento (fases) de componente de fluxo individuais em um fluxo de duas fases, a discussão abaixo e as figuras correspondentes apresentam exemplos específi-

cos de implementações destas técnicas.

As figuras 12-14 são gráficos que ilustram exemplos de correções de densidade para inúmeros tubos de fluxo. Em particular, os exemplos se baseiam nos dados obtidos de três tubos de fluxo de água verticais, os
5 tubos de fluxo apresentando 12,7 mm (1/2 polegada), 19,05 mm (3/4 polegada) e 25,4 mm (1 polegada) de diâmetro.

Mais especificamente, os dados de 12,7 mm (1/2 polegada) foram tomados com uma velocidade de escoamento de 0,15 kg/s e uma velocidade de escoamento de 0,30 kg/s; os dados de 3/4 polegada (19,05 mm)
10 foram tomados com uma velocidade de escoamento de 0,50 kg/s e uma velocidade de escoamento de 1,00 kg/s; e os dados de 1 polegada (25,4 mm) foram tomados com uma velocidade de escoamento de 0,50 kg/s, uma velocidade de escoamento de 0,90 kg/s, e uma velocidade de escoamento de 1,20 kg/s. A figura 12 ilustra um erro, e_d , da densidade aparente da mistura de fluido-gás (fluxo de duas fases) versus a queda real na densidade da mistura de fluido-gás, $\alpha\rho_{true}$:
15

$$\Delta\rho_{true} = 100 \cdot \frac{\rho_{liquid} - \rho_{true}}{\rho_{liquid}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$e_d = 100 \cdot \frac{\rho_{apparent} - \rho_{true}}{\rho_{true}} \quad \text{Eq. 22}$$

onde, conforme acima, ρ_{liquid} é a densidade do líquido isento de gás, ρ_{true} é a densidade real da mistura de líquido-gás, e $\rho_{apparent}$ é a densidade aparente ou indicada da mistura de líquido-gás.

20 Nas Figuras 12-14, a correção é executada em termos da queda aparente na densidade da mistura, $\Delta\rho_{apparent}$, conforme mostrado na equação 23:

$$\Delta\rho_{apparent} = 100 \cdot \frac{\rho_{liquid} - \rho_{apparent}}{\rho_{liquid}} \quad \text{Eq. 23}$$

Nas Figuras 12-14, quando do ajuste dos dados, tanto a queda aparente como a queda real na densidade da mistura foram normalizadas
25 em valores entre 0 e 1 com a divisão deles por 100, onde esta normalização

se destina a assegurar a estabilidade numérica do algoritmo de otimização. Em outras palavras, as quedas normalizadas aparente e real na densidade da mistura são as quedas aparente e real na densidade da mistura definida como uma relação, do que como uma porcentagem, da densidade do líquido ρ_{liquid} , conforme mostrado na equação 24:

$$\Delta\rho_{apparent}^{normalized} = \frac{\Delta\rho_{apparent}}{100} \quad \text{Eq. 2.4}$$

A fórmula modelo, com base na equação 17, confere a equação 25:

$$\Delta\rho_{true}^{normalized} = a_1(\Delta\rho_{apparent}^{normalized})^3 + a_2(\Delta\rho_{apparent}^{normalized})^2 + a_3(\Delta\rho_{apparent}^{normalized}) \quad \text{Eq. 2.5}$$

Neste caso, os coeficientes são $a_1 = -0,51097664273685$, $a_2 = 1,26939674868129$, e $a_3 = 0,24072693119420$. As figuras 13A e 13B ilustram o modelo com os dados experimentais e os erros residuais, conforme mostrado. As figuras 14A e 14B fornecem a mesma informação, mas com cada velocidade de escoamento traçada separadamente.

Para resumir, a queda na correção da densidade é executada no transmissor 104 pelo cálculo da queda de densidade aparente $\Delta\rho_{apparent}$, usando o valor de densidade aparente $\rho_{apparent}$ e a densidade do líquido ρ_{liquid} . O valor da queda aparente na densidade é normalizado para se obter

$\Delta\rho_{apparent}^{normalized} = \frac{\Delta\rho_{apparent}}{100}$, de modo que, conforme explicado acima, a queda na densidade é calculada como uma taxa do que como uma porcentagem. O(s) modelo(s) de correção de densidade pode(m) ser aplicado(s) para se obter a queda corrigida normalizada na densidade da mistura $\Delta\rho_{true}^{normalized}$. Finalmente, este valor é não-normalizado para se obter a queda corrigida na densidade $\Delta\rho_{true} = 100 \cdot \Delta\rho_{true}^{normalized}$. Naturalmente, o cálculo final não se fará necessário, se a queda corrigida na densidade da mistura $\Delta\rho_{true}$ for definida como uma relação do que como uma porcentagem do valor real.

As figuras 15-20 são gráficos que ilustram exemplos de corre-

ções de velocidade de escoamento de massa para inúmeros tubos de fluxo. Em particular, os exemplos se baseiam nos dados obtidos de três tubos de fluxo de água verticais, os tubos de fluxo apresentando 12,7 mm (1/2 polegada), 19,05 mm (3/4 polegada) e 25,4 mm (1 polegada) de diâmetro. Mais especificamente, os dados de 12,7 mm (1/2 polegada) foram tomados com uma velocidade de escoamento de 0,15 kg/s e uma velocidade de escoamento de 0,30 kg/s; os dados de 19,05 mm (3/4 polegada) foram tomados com uma velocidade de escoamento de 0,50 kg/s e uma velocidade de escoamento de 1,00 kg/s; e os dados de 25,4 mm (1 polegada) foram tomados com 18 velocidades de escoamento entre 0,30 kg/s e velocidade de escoamento de 3,0 kg/s, com uma queda máxima na densidade de aproximadamente 30%.

As figuras 15A e 15B ilustram erros de fluxo de massa aparente para os dados usados para ajustar o modelo versus a queda corrigida na densidade da mistura Δp_{true} e velocidade de fluido superficial real normalizada; isto é, as curvas de erro de fluxo de massa aparente por linha de fluxo, juntamente com um diagrama de dispersão do erro de fluxo de massa aparente versus a queda corrigida na densidade Δp_{true} e a velocidade de fluido superficial real normalizada v_{tn} , conforme mostrado na equação 26:

$$v_m = \frac{v_t}{v_{max}}, \quad v_t = \frac{m_t}{\rho_{liquid} \cdot A_T} \quad \text{Eq. 26}$$

onde m_t é o fluxo de massa de fluido real, isto é, o valor do fluxo de massa independentemente medido, ρ_{liquid} é a densidade do líquido, A_T é a área da seção transversal do tubo de fluxo, e v_{max} é o valor máximo para a velocidade de fluido superficial (aqui considerada 12 m/s), de modo que v_{tn} forneça a relação da velocidade de fluido superficial real a partir de toda a faixa do tubo de fluxo 215. Nestes exemplos, tanto a queda na densidade da mistura como a velocidade de fluido superficial são normalizadas entre 0 e 1 antes do ajuste do modelo, para fins de assegurar a estabilidade numérica para o algoritmo de otimização modelo.

A figura 16 ilustra erros de fluxo de massa aparente versus queda corrigida na densidade da mistura e velocidade de fluido superficial apa-

rente normalizada, com limites de segurança para o modo de correção. Isto é, a Figura 16 fornece o diagrama de dispersão dos erros de fluxo de massa aparente versus a queda corrigida na densidade e, desta vez, a velocidade

de fluido superficial aparente normalizada $v_n = \frac{v}{v_{max}} = \frac{m}{v_{max} \cdot \rho \cdot A}$, onde m

- 5 é o fluxo de massa de fluido aparente (isto é, conforme medido pelo transmissor 104). Superpostos no gráfico estão os limites que definem a região segura para o modelo, isto é, a região para a qual o modelo é esperado como fornecendo uma precisão similar com aquela para os dados de ajuste. Com o uso desta nomenclatura, o erro de fluxo de massa aparente e é for-

10 necido por
$$e = 100 \cdot \frac{m - m_t}{m_t}.$$

A fórmula modelo para esta situação é mostrada como a equação 27:

$$e_n = a_1 dd_{cn} \cdot e^{a_2 dd_{cn}^2 + a_3 dd_{cn} + a_4 v_n^2 + a_5 v_n} + a_6 dd_{cn}^2 + a_7 dd_{cn} + a_8 v_n^2 + a_9 v_n \quad \text{Eq. 27}$$

onde

$$e_n = \frac{e}{100} = \frac{m - m_t}{m_t} \quad \text{Eq. 28}$$

- 15 onde, nas equações 27 e 28, dd_{cn} é a queda corrigida normalizada na densidade da mistura, e v_n é a velocidade superficial aparente normalizada do líquido.

- Neste caso, os coeficientes são: $a_1 = 4,78998578570465$, $a_2 = 4,20395000016874$, $a_3 = -5,93683498873342$, $a_4 = 12,03484566235777$, $a_5 = -7,70049487145105$, $a_6 = 0,69537907794202$, $a_7 = -0,52153213037389$, $a_8 = 0,36423791515369$, e $a_9 = -0,16674339233364$.
- 20

- A figura 17 ilustra um diagrama de dispersão para os resíduos do modelo, juntamente com os coeficientes e fórmula do modelo; isto é, mostra resíduos do modelo versos a queda corrigida na densidade da mistura e a velocidade real de fluido normalizada. As figuras 18A-18D e as Figu-
- 25

ras 19A-19D fornecem erros residuais do modelo para todo o conjunto de dados usados para ajustar o modelo e os dados atuais sozinhos, respectivamente. Finalmente, as Figuras 20A e 20B ilustram a superfície do modelo tanto interpolando como extrapolando fora da área de ajuste segura. A partir das Figuras 16, 20A e 20B, devem ser entendidos o fluxo de massa aparente (velocidade de líquido superficial) e a queda nos limites de densidade para o modelo.

Para resumir, a correção de fluxo de massa no transmissor 104 é assumida neste exemplo com o cálculo de uma queda aparente na densidade, com a correção da mesma com o uso do(s) método(s) descrito(s) acima, e com a normalização do valor resultante pela divisão do mesmo por 100 (ou o uso da queda corrigida normalizada obtida na densidade originária do modelo de densidade). Depois, uma velocidade de fluido superficial normalizada v_n é calculada, e o modelo é aplicado para se obter uma estimativa do erro de fluxo de massa normalizado e_n , onde este valor confere o erro do fluxo de massa aparente como uma relação do fluxo de massa real. O valor obtido pode ser não-normalizado pela multiplicação do mesmo por 100, para assim se obter o erro de fluxo de massa como uma porcentagem do fluxo de massa real. Finalmente, o fluxo de massa aparente pode ser corrigido com o

$$m_c = \frac{m}{e_n + 1}$$

erro de fluxo de massa não-normalizado

Conforme será apreciado, a descrição acima apresenta uma ampla faixa de aplicações para aperfeiçoar a precisão de medição e a correção de um medidor Coriolis durante condições de fluxo de duas fases. Em particular, as técnicas descritas acima são particularmente úteis nas aplicações de medição, onde o fluxo de massa da fase líquida e o fluxo de massa da fase gasosa têm que ser medidos e/ou corrigidos em um alto nível de precisão. Uma aplicação exemplificativa é a medição do fluxo de massa da fase líquida e a medição da fase gasosa nos ambientes de produção de óleo e gás.

A discussão acima é provida no contexto do medidor de fluxo digital da Figura 2. Contudo, deve ser entendido que pode ser usado qual-

quer medidor de fluxo ou densitômetro de vibração e oscilação, analógico ou digital, que é capaz de medir o fluxo de múltiplas fases que inclui uma fase gasosa de uma certa porcentagem. Isto é, alguns medidores de fluxo serão apenas capazes de medirem os fluidos do processo que incluem uma fase,
5 gasosa, quando essa fase gasosa for limitada a uma pequena porcentagem de todo o fluido do processo, tal como, por exemplo, menos de 5%. Outros medidores de fluxo, tal(tais) como o(s) medidor de fluxo(s) digital(tais) mencionado(s) acima, são capazes da operação, mesmo quando a fração de vazio de gás atingir 40% ou mais.

10 Muitos dos cálculos e equações acima fornecidas são descritos em termos da densidade, da velocidade de escoamento de massa, e/ou da fração de vazio. Entretanto, deve ser entendido que os mesmos resultados ou resultados similares podem ser alcançados com o uso das variações destes parâmetros. Por exemplo, em vez de um fluxo de massa, pode ser usado
15 um fluxo volumétrico. Adicionalmente, em vez da fração de vazio, deve ser usada uma fração de líquido.

A discussão acima fornece exemplos de medição de velocidades de escoamento de componentes em um fluxo de duas fases. Os medidores de fluxo podem também ser usados para medir fluxos misturados adicionais.
20 Por exemplo, um fluxo de "três fases" ou um "fluxo de duas fases misturado" se refere a uma situação na qual dois tipos de líquidos são misturados com um gás. Por exemplo, uma mistura fluida de óleo e água pode conter ar (ou outro gás), formando assim um "fluxo de três fases", onde a terminologia se refere aos três componentes do fluxo, e não implica, em geral, que um material sólido seja incluído no fluxo.
25

A figura 21 é um diagrama de bloco de um sistema de medidor de fluxo 2100. O sistema de medidor de fluxo 2100 pode ser usado, por exemplo, para determinar velocidades de escoamento de componentes individuais dentro de um fluxo de três fases. Por exemplo, o sistema 2100 pode
30 ser usado para determinar uma quantidade de óleo dentro de um fluxo de óleo, água e gás que percorre através de um tubo em uma instalação de extração de óleo, durante um determinado período de tempo.

O sistema de medidor de fluxo 2100 pode também ser usado para se obter medições altamente precisas do transmissor digital 104, tais como, por exemplo, as medições de densidade ou as medições de velocidade de escoamento de massa. O sistema 2100 pode também ser usado, por exemplo, para se obter uma medição aperfeiçoada de um sensor externo, tal como, por exemplo, a sonda de fração de líquido 230, ou o sensor de fração de vazio 235, com relação a que medições poderiam ser obtidas com o uso do(s) sensor(es) externo(s) sozinho(s).

Na Figura 21, o transmissor digital 104 inclui um sistema de determinação de fração de vazio 2102, um sistema de determinação de densidade 2104, e um sistema de determinação de velocidade de escoamento de massa 2106 (além de inúmeros componentes que não são mostrados para fins de clareza, por exemplo, um gerador de sinal de comando, ou um sistema de detecção de múltiplas fases, ou qualquer dos componentes ilustrados ou discutidos com relação à Figura 2). Isto é, conforme deve ser entendido a partir da descrição acima, que os sistemas 2102, 2104 e 2106 podem ser usados para medir parâmetros correspondentes de um fluxo de fluido dentro do fluxo 215. Além disso, conforme também explicado acima, na medida em que o fluxo de fluido contém gás e/ou líquidos misturados, as medições emitidas para os sistemas 2102, 2104, 2106 geralmente representam valores brutos ou aparentes para os parâmetros correspondentes, que finalmente podem ser corrigidos com um sistema de correção 2108.

Por exemplo, uma velocidade de escoamento de massa aparente de um fluxo de fluido de três fases dentro do tubo de fluxo 215 pode ser emitida para o sistema de correções 2108 para correção usando um módulo de correção de velocidade de escoamento de massa 2112, enquanto uma densidade aparente do fluxo de fluido de três fases dentro do tubo de fluxo 215 pode ser emitida para o sistema de correções 2108 para correção usando um módulo de correção de densidade 2118. De algum modo similar, uma medição ou determinação de uma fração de vazio aparente dentro do fluxo de fluido pode ser corrigida usando um módulo de correção de densidade 2114, enquanto uma medição ou determinação de uma fração de líquido

aparente (por exemplo, fração de água da sonda 230) pode ser corrigida usando um módulo de correção de fração de água 2116. Conforme descrito em maiores detalhes abaixo, os vários módulos de correção 2112-2118 podem trabalhar um em conjunção com outro, e/ou com outros componentes, a fim de se obter seus respectivos valores corrigidos.

Uma vez obtidos, os valores corrigidos, tais como a velocidade de escoamento de massa, a densidade, a fração de água, ou a fração de vazio (ou alguma combinação dos mesmos) podem ser emitidos para um computador hóspede 2110 para determinação de velocidades de escoamento de massa individuais de cada dos três componentes do fluxo de fluido de três fases, usando um sistema de determinação de velocidade de escoamento de componente 2120. Como resultado, e conforme mencionado acima, podem ser determinadas as velocidades de escoamento individuais e/ou quantidades de cada dos três componentes.

Mais geralmente, um exemplo do sistema 2100 inclui três elementos gerais usados para se obter valores de medição corrigidos e/ou velocidades de escoamento de componentes individuais: o transmissor 104, um ou mais sensores externos individuais genericamente identificados com um numeral de referência 2122, e um ou mais elementos do sistema de correção 2108. Naturalmente, muitas combinações, variações, e implementações destes elementos podem ser usadas, vários exemplos das quais são discutidos em maiores detalhes abaixo.

Por exemplo, em algumas implementações, o transmissor digital 104 pode não incluir o sistema de determinação de fração de vazio 2102. Em alguns casos, o sistema de determinação de fração de vazio 2102 pode ser incluído com, ou associado com, a sonda de fração de líquido 230, ou pode ser desnecessário, dependendo de um tipo ou configuração do sensor de fração de vazio 235. Em tais casos, na medida em que seja necessário, a fração de vazio pode ser determinada a partir de saídas dos módulos de correção 2112, 2116, e/ou 2118.

Além disso, embora os sensores externos 2122 sejam mostrados na Figura 21 como estando em comunicação com o transmissor digital

104 e o tubo de fluxo 215, deve ser entendido que os sensores externos 2122 podem obter suas respectivas medições em inúmeras maneiras. Por exemplo, exemplos do sensor de temperatura 220, do sensor de pressão 225, e do sensor de fração de vazio 230 são descritos acima, com relação, por exemplo, à Figura 2. Além disso, a sonda de fração de líquido 235 pode se apresentar em série com o tubo de fluxo 215 com relação a um tubo principal para transportar o fluxo de fluido de três fases, e pode manter a comunicação separada com o transmissor 104, o sistema de correções 2108 e/ou o computador hospede 2110.

10 Na Figura 21, o sistema de correções 2108 é mostrado como sendo separado do transmissor digital 104 e do computador hospede 2110. Em algumas implementações, contudo, o sistema de correções 2108 pode ser localizado dentro do transmissor digital 104, do computador hospede 2110, ou pode ser associado com um ou mais sensores externos 2122. Em
15 ainda outras implementações, porções do sistema de correções 2108 podem ser incluídas dentro de diferentes seções do sistema 2100. Por exemplo, as correções de velocidade de escoamento de massa e de densidade podem ser executadas no transmissor digital 104, enquanto correções de fração de água podem ser executadas na sonda de fração de líquido 230.

20 Em algumas implementações, o sistema de correções 2108 pode incluir todos os módulos 2112-2118 (conforme mostrado), ou algum subconjunto dos mesmos, ou pode incluir outros módulos, não especificamente ilustrados na Figura 21 (por exemplo, um módulo de correções para corrigir uma densidade do componente de dois líquidos dentro do fluxo de três fa-
25 ses, tal como a mistura de óleo/água em um fluxo de fluido de óleo/água/gás). Além disso, alguns ou todos os ditos módulos de correção podem ser integrados entre si. Por exemplo, as correções de velocidade de escoamento de massa e de densidade podem ser incorporadas em um módulo, enquanto o módulo de correção de fração de água 2116 pode ser se-
30 parado.

Ao longo das mesmas linhas, deve ser entendido que o sistema de determinação de velocidade de escoamento de componente 2120 pode

ser situado em inúmeros locais dentro do sistema 2100. Por exemplo, o sistema de determinação de velocidade de escoamento de componente 2120 pode ser localizado dentro do sistema de correções 2108, ou pode ser localizado dentro do transmissor digital 104.

- 5 Vários exemplos das implementações acima e outras implementações, bem como exemplos de técnicas específicas para se obter as medições de fluxo corrigidas e velocidades de escoamento de componentes individuais, são descritos abaixo em maiores detalhes. Em geral, contudo, deve ser entendido que o sistema 2100 e outras implementações do mesmo permitem que todo ou substancialmente todo o fluxo de fluido de três fases flua
- 10 continuamente através do tubo de fluxo 215 e através de um tubo associado ou outro conduto para transportar o material de fluxo de três fases.

 Como resultado, determinações das velocidades de escoamento de componentes individuais não exigem a separação do fluxo de fluido de

15 três fases em fluxos separados contendo um ou mais dos componentes constituintes. Por exemplo, quando o fluxo de três fases contiver óleo, água e gás, não será necessário separar o gás da combinação de líquido de água/óleo a fim de executar as medições (por exemplo, velocidade de escoamento de massa) na porção de óleo do fluxo de óleo/líquido resultante.

20 Conseqüentemente, as medições confiáveis de uma quantidade de óleo produzida, por exemplo, em uma instalação de produção de óleo, podem ser feitas de modo fácil, rápido, confiável e de baixo custo.

 A figura 22 é um diagrama de uma primeira implementação do sistema 2100 da Figura 21. Na Figura 22, a sonda de fração de líquido 230 é

25 ilustrada como uma sonda de fração de água que está em série com o transmissor digital 104 com relação ao fluxo de fluido de três fases através de um tubo 2202. Exemplos de usar medições da sonda de fração de água 230 na determinação de medições de fluxo são providos em maiores detalhes abaixo.

30 Também, na Figura 22, é ilustrado um misturador-amostrador estático 2004, o qual serve para homogeneizar o fluido de três fases. O misturador-amostrador 2204 pode também ser usado para outras medições. Por

exemplo, o misturador-amostrador 2204 pode ser usado para validar as medições da sonda de fração de água 230, ou outras medições. Em uma implementação, o misturador-amostrador 2204 pode ser usado para extrair uma porção do fluxo de três fases de óleo/água/gás por meio de sifão para evaporação do gás a partir do mesmo, para a confirmação independente de uma fração de água dentro da composição de dois líquidos resultante. De alguma maneira similar, um transmissor de pressão 2206 pode ser usado em várias técnicas de pós-processamento para validar ou confirmar as medições do sistema.

10 A figura 23 é um diagrama de bloco de uma segunda implementação do sistema da Figura 21. Na Figura 23, a sonda de fração de líquido 230 é ilustrada como uma sonda de fração de água de microondas 230a e/ou uma sonda de fração de água de infravermelhos 230b. Um suprimento de energia 2302 para suprir energia para o sistema é também ilustrado. O tubo de fluxo 215 da Figura 23 deve ser entendido como contendo, por exemplo, o tubo de fluxo curvado 102 da Figura 1A, embora, naturalmente, possa ser usado o tubo de fluxo reto 106 da Figura 1B, ou outro tubo de fluxo.

Além disso, na Figura 23, os sensores 230a, 230b e/ou 2206 são 20 ilustrados como estando em comunicação bidirecional com o transmissor 104, incluindo um sinal de controle padrão 4-20mA. Enquanto isso, o transmissor 104 está em comunicação com o computador hóspede 2110 por meio de uma conexão Modbus RS485.

Também conforme mencionado acima, a Figura 23 ilustra diversas possíveis localizações para o sistema de correções 2108. Por exemplo, 25 conforme mostrado, o sistema de correções 2108 pode ser localizado em, ou associado com, um processador associado com o computador hóspede 2110, ou com o transmissor digital 104, e/ou sonda de fração de água 230a (e/ou outro sensor externo 230b).

30 A figura 24 é um diagrama de bloco de uma implementação do sistema de correções 2108 das Figuras 21-23. Na Figura 24, e como deve ficar aparente a partir da descrição acima da Figura 21, o sistema de corre-

ções 2108 introduz, a partir do transmissor 104, medições, tal como uma medição aparente (ou bruta) de uma fração de líquido (por exemplo, fração de água) do fluxo de três fases, juntamente com a velocidade de escoamento de massa em bruto aparente e a densidade em massa aparente.

5 O sistema de correções 2108, neste exemplo, inclui um modelo de erro de fração de água 2402 e um modelo de erro Coriolis 2404. Os modelos 2402 e 2404, conforme mostrado, permitem os cálculos das medições correspondentes corrigidas, ou a estimativa das medições reais correspondentes de fração de água, de velocidade de escoamento de massa e de
10 densidade. Em outras palavras, conforme se tornará evidente a partir da discussão acima dos fluxos de fluido de duas fases 2402 e 2404, a modelagem de configurações e parâmetros de fluxo conhecidos, de modo que os parâmetros de fluxo subseqüentemente medidos possam ser correlacionados com a modelagem, resulta por meio de interpolação, por exemplo.

15 Por exemplo, conforme discutido em maiores detalhes abaixo, os modelos 2402 e 2404 podem ser implementados para prover ajustes polinomiais de parâmetros de fluxo (aparentes) medidos. Em outros exemplos, os modelos 2402 e 2404 podem representar modelos de correção de rede neural para corrigir fração de água e fluxo de massa/densidade.

20 No exemplo da Figura 24, quando a medição disponível incluir uma fração de água aparente, então as medições corrigidas resultantes permitirão o cálculo do parâmetro adicional de fração de vazio de gás. Contrariamente, se uma fração de vazio de gás aparente estivesse disponível, do que uma medição de fração de água aparente, então o sistema de corre-
25 ções poderia emitir um medição de fração de vazio corrigida (permitindo assim a estimativa subseqüente de uma fração de água real). Em cada caso, ou em casos similares, o sistema de correções 2108 pode emitir as medições corrigidas para o sistema de determinação de velocidade de escoamento de componente 2120 para o cálculo das velocidades de escoamento
30 de massa de componentes individuais.

 A figura 24 ilustra um exemplo no qual as saídas de cada modelo 2402 e 2404 são alimentadas entre si, a fim de se obter resultados se-

qüencialmente melhores, antes de emitir um valor final para fração de água, velocidade de escoamento de massa (em bruto) e densidade (em massa) corrigidas, e, em seguida, calcular os fluxos de componentes individuais. Em
 5 fração de água aparente pode ser dependente de, e variar com, uma quantidade de gás dentro do fluxo de fluido de três fases (isto é, a fração de vazio de gás). Contudo, um valor preciso da fração de vazio de gás pode não estar, em geral, disponível até depois que uma estimativa da medição de fração de água real tenha sido determinada.

10 Portanto, conforme ilustrado, com a alimentação dos valores de uma primeira determinação de um valor de fração de água corrigido do modelo de erro de fração de água 2402 de volta para o modelo de erro Coriolis 2404, pode ser obtida uma estimativa aperfeiçoada da velocidade de escoamento de massa corrigida, da densidade e da fração de vazio de gás, e, em
 15 seguida, alimentada novamente no modelo de erro de fração de água. Este processo pode continuar, por exemplo, até que um nível desejado de precisão seja alcançado, ou até que uma quantidade determinada de tempo tenha decorrido.

Na Figura 24, os modelos 2402 e 2404 podem ser ortogonais
 20 entre si, de modo que um possa ser substituído sem afetar a operação do outro. Por exemplo, se uma nova sonda de fração de água for usada (por exemplo, a sonda 230a no lugar da sonda 230b da Figura 3), então, um modelo de erro de fração de água correspondente poderá ser similarmente substituído, enquanto o modelo de erro Coriolis pode continuar a ser usado.

25 Em outras implementações, e, por exemplo, quando uma sonda de fração de água específica, um medidor Coriolis, e uma configuração dos mesmos um com relação ao outro, forem conhecidos e assumidos como sendo inalterados, então, poderá ser possível construir um único modelo de erro que introduza todas as três medições de fração de água, velocidade de
 30 escoamento de massa, e densidade, e emitir valores corrigidos de todos os três (juntamente com possivelmente, uma fração de vazio de gás corrigida). Em tais implementações, pode não ser necessário alimentar resultados se-

qüenciais de volta para o modelo de erro a fim de se obter todos os três (ou quatro, ou mais) valores corrigidos.

A figura 25 é um fluxograma 2500 que ilustra uma primeira operação do medidor de fluxo das Figuras 21-23. Mais particularmente, a Figura 5 25 representa uma descrição de alto nível de muitas técnicas e combinações de técnicas diferentes, exemplos específicos de alguns dos quais (juntamente com outros exemplos) são apresentados em maiores detalhes abaixo.

Na Figura 25, é determinada a existência de um fluxo de três fases, sendo obtidas medições aparentes (2502). Por exemplo, o transmissor 104 pode obter uma densidade em massa aparente e uma velocidade de escoamento de massa aparente, e a sonda de fração de líquido 230 pode obter uma medição de fração de água aparente. Conforme mostrado na Figura 21, estas medições podem ser então emitidas para o sistema de correção 2108.

15 Desta maneira, podem ser obtidas uma fração de água corrigida (2504), uma densidade em massa corrigida (2506), uma velocidade de escoamento de massa em bruto (2508), e uma fração de vazio de gás corrigida (2510). Conforme ilustrado, há muitas variações para se obter estas medições corrigidas.

20 Por exemplo, a velocidade de escoamento de massa corrigida pode ser determinada com base apenas em medições aparentes, tal como a velocidade de escoamento de massa aparente, ou pode ser determinada com base nestes fatores juntamente com uma medição de densidade e/ou fração de vazio de gás já corrigida. Comentários similares se aplicam, por exemplo, a técnicas para se obter medições de densidade e/ou fração de 25 vazio de gás corrigidas. Também deve ficar evidente que outros fatores e parâmetros podem ser usados no cálculo de valores corrigidos que não são necessariamente mostrados na Figura 25, tais como, por exemplo, temperatura, pressão, densidades do líquido e gás dos componentes de fluxo, ou 30 outros parâmetros, conhecidos ou medidos.

Além disso, conforme mencionado acima, uma determinada correção pode ser obtida múltiplas vezes, com as últimas correções se basean-

do nas correções intervenientes de outros parâmetros. Por exemplo, uma primeira medição de fração de água corrigida pode ser obtida, e pode então ser revisada com base em uma determinação de fração de vazio seguinte, para se obter uma segunda medição de fração de água corrigida.

5 Uma vez que alguns ou todos os parâmetros corrigidos sejam obtidos, podem ser obtidas velocidades de escoamento de componentes individuais para um ou mais do primeiro componente líquido, do segundo componente líquido, e do componente de gás (2512). Depois, estas saídas, e/ou os valores corrigidos propriamente ditos, podem ser exibidos ou de outra forma emitidos (2514).

A figura 26 é um fluxograma 2600 que ilustra um primeiro exemplo das técnicas da Figura 25. Em particular, nas Figuras 21-25, a correção da densidade em massa pode ser associada com a determinação de uma medição de fração de água, usando a sonda de fração de água 230.

15 Desse modo, na Figura 26, é assumida uma existência de um fluxo de três fases apresentando um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás, e o processo começa com uma determinação de uma medição de fração de água aparente (2602). Depois, é determinada a densidade da mistura de dois líquidos (2604).

20 Com base neste conhecimento, é determinada uma fração de vazio de gás aparente α_{apparent} (2606). Em seguida, em uma implementação, o processo 2600 continua com uma determinação dos valores corrigidos da densidade em massa e da velocidade de escoamento de massa em bruto (2608), por exemplo.

25 Uma vez que estes valores são conhecidos, uma correção para a fração de vazio de gás $\alpha_{\text{corrected}}$ pode ser executada (2610), resultando em uma nova determinação revisada de fração de vazio de gás (2606). Desta maneira, uma correção da medição de fração de água inicial pode ser executada (2612), de modo a levar em consideração um efeito do gás dentro do
30 fluxo de três fases na medição de fração de água inicial (2602), e assim obter uma medição de fração de água aperfeiçoada.

Em seguida, a medição de fração de água aperfeiçoada pode

ser usada para determinar e aperfeiçoar a medição de densidade de líquido (2604), que, por sua vez, pode ser usada para determinar uma medição de fração de vazio de gás corrigida ou aperfeiçoada (2606). Como resultado, podem ser obtidas as medições de densidade em massa e velocidade de escoamento de massa em bruto adicionalmente corrigidas (2608).

O processo 2600, ou variações do mesmo, pode ser continuado até que resultados satisfatórios para os valores corrigidos da densidade em massa, da velocidade de escoamento de massa em bruto, da fração de água, e/ou da fração de vazio de gás tenham sido determinados. Depois, podem ser determinadas velocidades de escoamento de massa individuais para os três componentes (por exemplo, óleo, água, e gás) do fluxo de múltiplas fases.

Equações específicas e discussão para implementar os processos do exemplo 2500 e 2600, bem como para os exemplos subseqüentes, são providas abaixo. Neste contexto, também são providos exemplos específicos de como e quais parâmetros selecionados são usados.

Por exemplo, a fração de água em um fluxo de duas fases será definida como a fração de volume de água na mistura de duas fases (por exemplo, óleo-água), quando desprovida de gás. Sob esta condição, a fração de água é fornecida pela equação 29:

$$WC = \frac{\rho_{liquid} - \rho_{oil}}{\rho_w - \rho_{oil}} \quad \text{Eq. 29}$$

onde ρ_{liquid} é a densidade da mistura de óleo-água, ρ_{oil} e ρ_w são as densidades de óleo puro e de água pura, respectivamente. Naturalmente, os componentes de líquido do óleo e água são apenas exemplos, podendo, contudo, ser usados outros líquidos.

De modo geral, no caso de um fluxo de óleo-água de duas fases, onde nenhum gás está presente, o medidor de fluxo Coriolis pode medir a mistura da densidade (em massa), ρ_{liquid} , e a velocidade de escoamento de massa da mistura, MF. A fração de água da mistura é então calculada com

base na equação 29. Esta técnica é descrita em maiores detalhes, por exemplo, Patente Norte-americana No. 5.029.482, cedida para Chevron Research Company, e pode ser útil em derivar a fração de água de uma medição de densidade usando um medidor de fluxo Coriolis.

- 5 A velocidade de escoamento volumétrica da mistura de líquido (óleo-água) pode ser derivada usando a equação 30:

$$VF_{liquid} = \frac{MF_{liquid}}{\rho_{liquid}} \quad \text{Eq. 30}$$

- Nesse modo, as duas medições independentes de densidade (mistura) em massa e velocidade de escoamento de massa pelo medidor de fluxo Coriolis suprem informação para satisfazer a exigência de conclusão matemática, onde dois componentes estão presentes no fluxo combinado.
- 10

- As equações 29 e 30, entretanto, não poderão ser diretamente aplicadas, quando três fases distintas (isto é, óleo, água e gás) estiverem em um fluxo co-misturado, isto é, um fluxo de três fases, conforme discutido acima com relação às Figuras 21-25, pelo fato de o medidor de fluxo Coriolis poder medir a densidade e o fluxo de massa da mistura dos dois líquidos e do gás. No caso de três fases, por exemplo, do fluxo de óleo-água-gás, é introduzido um terceiro componente, o qual é beneficiado de uma terceira fonte independente de informação para satisfazer a conclusão matemática para o fluxo de três fases.
- 15

- Nas implementações descritas acima, a informação independente é provida por outro dispositivo instalado em linha com o medidor de fluxo Coriolis, que encontra a mesma mistura de três fases, isto é, a sonda de fração de água 230. A sonda de fração de água 230, conforme descrito acima com relação às Figuras 21-25, pode ser de qualquer tecnologia possível incluindo microondas, capacitâncias, capacitância-indutância, ressonância magnética nuclear, infravermelhos, e infravermelhos próximos, e pode ser implementada com o uso de uma combinação destes tipos de sondas de fração de água. O uso de outros tipos de sondas de fração de água (ou, mais geralmente, sondas de fração de líquido) é previsto também dentro do
- 20
- 25

escopo da presente descrição.

O transmissor 104, conforme descrito acima, pode ser usado para prover uma densidade em massa aparente, ρ_{apparent} , bem como uma velocidade de escoamento de massa em bruto aparente, MF_{apparent} . Enquanto
 5 to isso, neste exemplo, a sonda de fração de água 230 pode ser usada para obter uma medição de fração de água aparente WC_{apparent} . A densidade da porção de líquido de água-óleo apenas da mistura de três fases pode ser assim derivada da informação de fração de água, conforme mostrado na equação 31, onde, conforme acima, as densidades de líquido de componen-
 10 te são conhecidas ou podem ser obtidas, por exemplo, de acordo com as técnicas que também são descritas acima.

$$\rho_{\text{liquid}} = (1 - WC_{\text{apparent}}) \rho_{\text{OIL}} + WC_{\text{apparent}} \rho_w \quad \text{Eq. 31}$$

A fração de vazio de gás, α , conforme indicado acima, é definida como a fração de volume ocupada pela fase de gás na mistura de três fases. Uma definição de α em termos de valores aparentes ou não-corrigidos, é
 15 provida acima e repetida aqui como a equação 32:

$$\alpha_{\text{apparent}} = \frac{\rho_{\text{apparent}} - \rho_{\text{liquid}}}{\rho_{\text{gas}} - \rho_{\text{liquid}}} \quad \text{Eq. 32}$$

A densidade da fase gasosa na equação 32 acima pode ser calculada com base em uma medição independente da pressão e da temperatura do processo. Por exemplo, a pressão pode ser medida com o transmissor de pressão 225, enquanto a temperatura é ou medida independentemen-
 20 te com o uso de um transmissor de temperatura ou obtida a partir da temperatura do medidor de fluxo Coriolis, por exemplo, o sensor de temperatura 220, tal como um Detector de Temperatura de Resistência (RTD). A aplicação, por exemplo, dos algoritmos da Associação de Gás Americana (AGA), incorporados no transmissor 104, pode ser então usada para prover a densi-
 25 dade de fase gasosa.

Na equação 32, e como já descrito com relação à Figura 26, a

densidade da fase líquida calculada (2604) e a fração de vazio de gás (2606) com base na entrada de fração de água são aproximações, uma vez que a medição de fração de água propriamente dita é afetada pela presença de gás, o que, até agora, é desconhecido. Uma técnica de solução para convergir para a densidade de fase líquida correta e fração de vazio de gás pode ser, portanto, usada, conforme mostrado na Figura 26.

Especificamente, depois da aplicação das correções de densidade em massa e fluxo de massa, é obtida uma fração de vazio de gás atualizada (2610, 2606). Este valor de fração de vazio de gás atualizado é então aplicado à leitura da fração de água para corrigir o efeito da presença de gás (2612, 2602).

Para cada dispositivo de fração de água específico, a relação entre a fração de água e o efeito da fração de vazio de gás pode ser desconhecida, conforme mostrado na equação 33:

15

$$WC_{apparent} = f(\alpha_{apparent}, \rho_{apparent}, MF_{apparent}, others) \quad \text{Eq. 33}$$

Isto é, uma medição de fração de água aparente pode ser uma função de muitos parâmetros diferentes, de modo que uma medição de fração de água corrigida $WC_{corrected}$ possa geralmente ser uma função dos mesmos parâmetros, valores corrigidos desses parâmetros, e/ou a própria medição de fração de água aparente.

Com a leitura da fração de água atualizada, o processo é repetido, começando com a equação 31, até que os critérios de convergência adequados tenham sido satisfeitos. Depois, a velocidade de escoamento de massa (em bruto), a densidade e a fração de vazio de gás da mistura de três fases corrigida podem ser apresentadas na temperatura do processo.

A velocidade de escoamento volumétrica individual de cada fase/componente é então calculada e corrigida para a temperatura padrão usando, por exemplo, as equações do Instituto Americano de Petróleo (API) para óleo cru e água produzida, e os algoritmos da AGA para gás produzido. Estas funcionalidades podem também ser incorporadas no transmissor 104.

Por exemplo, em uma implementação, o medidor de fração de água 230 pode ser operável para alimentar seu sinal de medição e informação diretamente em uma porta de comunicações ou analógica ou digital (entrada/saída) do transmissor 104. Em outra implementação, o medidor de fração de água é capaz de se comunicar com o transmissor 104 em um modo de comunicações bidirecional. Como parte desta implementação, o medidor de fração de água é capaz de alimentar seu sinal medido e informação diretamente na porta de comunicações do transmissor 104, conforme recém descrito. O transmissor 104 pode ser também capaz de enviar sinais e informação para a sonda de fração de água 230.

A figura 27 é um fluxograma 2700 que ilustra um segundo exemplo das técnicas da Figura 25. Na Figura 27, como na Figura 26, o processo 2700 começa com uma determinação de uma medição de fração de água aparente (2702).

Depois, a medição de fração de água pode ser usada para determinar uma densidade do componente líquido total (por exemplo, uma densidade de uma porção de óleo e água combinada do fluxo de três fases), talvez usando a equação 31 (2704). Uma densidade em massa aparente do fluxo de múltiplas fases, ou uma queda de densidade aparente, conforme descrito acima, pode ser determinada (2706), e uma fração de vazio de gás aparente pode ser determinada, seja independentemente da, ou com base na, densidade em massa aparente (2708). Similarmente, uma velocidade de escoamento de massa aparente do componente líquido total pode ser então calculada (2710), com o uso de alguns ou todos os parâmetros calculados anteriormente.

Neste ponto, podem ser determinados primeiros valores para a densidade em massa corrigida e velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida (2712). Depois, podem ser determinados valores para uma fração de vazio de gás corrigida (2714), uma velocidade de escoamento de massa de componente líquido total corrigida (2716) e uma medição de fração de água revisada ou corrigida (2718).

Com a medição de fração de água revisada e outros parâmetros,

pode ser obtida uma medição de fração de vazio de gás revisada. Depois, conforme mostrado, podem ser executadas correções adicionais à velocidade de escoamento de massa em bruto e à densidade em massa, e este processo pode ser repetido até que um nível adequado de correção seja alcançado. E, conforme descrito acima com relação às Figuras 25 e 26, podem ser obtidas saídas para a velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida, a densidade em massa corrigida, a medição de fração de água corrigida, e/ou medições de fração de vazio de gás corrigidas. Também, embora não explicitamente ilustrado na Figura 27, podem ser obtidas as velocidades de escoamento de massa para os três componentes individuais do fluxo de múltiplas fases.

A figura 28 é um fluxograma que ilustra um terceiro exemplo das técnicas da Figura 25. O processo da Figura 28 começa, como no processo 2700, com determinações de medições de fração de água, densidade de líquido total, e densidade em massa aparente (2702, 2704, 2706). Depois, uma velocidade de escoamento em bruto aparente é determinada (2802).

Com base nesta informação, podem ser determinados os valores corrigidos para a densidade em massa e velocidade de escoamento de massa em bruto (2804). Depois, uma densidade de gás pode ser determinada, como, por exemplo, uma função da pressão e temperatura (2806). Conseqüentemente, uma fração de vazio de gás pode ser determinada (2808) e corrigida (2810). Com o uso da fração de vazio de gás corrigida, uma medição de fração de água revisada pode ser determinada (2812) e usada para calcular uma densidade de líquido aperfeiçoada, e o processo pode ser repetido até que um resultado satisfatório seja obtido.

Como com a Figura 26, e em combinação com a discussão da mesma, exemplos, equações, e técnicas específicos são apresentados abaixo para implementar os processos das Figuras 27 e 28. Naturalmente, outras técnicas poderão também ser usadas.

A sonda de fração de água 230 ou outro instrumento, conforme descrito acima, apresenta uma medição da relação volumétrica de água - líquido em bruto na fase líquida, conforme mostrado na equação 34 (2702),

onde o valor de fração de água WC inicialmente representa um valor de fração de água aparente (isto é, calculado com base nos valores aparentes do fluxo de massa e da densidade) que pode ser aperfeiçoado ou corrigido à medida que o processo continua, como já descrito:

$$WC = \frac{VF_w}{VF_w + VF_{oil}} = \frac{\frac{MF_w}{\rho_w}}{\frac{MF_w}{\rho_w} + \frac{MF_{oil}}{\rho_{oil}}} \quad \text{Eq. 34}$$

- 5 O medidor de fluxo é, portanto, capaz de usar a medição de fração de água para calcular a densidade da fase líquida, conforme mostrado na equação 31 (2704). A partir disto, o medidor de fluxo é capaz de determinar a queda aparente na densidade causada pela presença do gás, conforme discutido acima com relação, por exemplo, à uma equação 23 normalizada, que é reproduzida aqui para conveniência:
- 10

$$\Delta\rho_{apparent} = \frac{\rho_{liquid} - \rho_{apparent}}{\rho_{liquid}} \quad \text{Eq. 23}$$

e, conforme descrito acima, de aplicar um algoritmo de correção, de acordo com a orientação do medidor, de aplicar uma forma cúbica da equação 17, também reproduzida aqui para conveniência:

$$\Delta\rho_{true} = \sum_{i=1}^M a_i (\Delta\rho_{apparent})^i \quad \text{Eq. 17}$$

e de determinar uma densidade de mistura corrigida usando a equação 35:

$$\rho_{true} = (1 - \Delta\rho_{true})\rho_{liquid} \quad \text{Eq. 35}$$

- 15 que pode ser usada para calcular a 'melhor estimativa' da fração de vazio de gás definida pela equação 32, acima.

Outras técnicas para uso com os processos das Figuras 25-28 devem ser entendidas a partir da discussão acima de cálculos similares no

contexto, por exemplo, do fluxo de duas fases (por exemplo, líquido e gás). Em particular, deve ser entendido que algumas ou todas as equações usadas no cenário de duas fases podem ser aplicáveis com relação a um fluxo de três fases, visto que um fluxo de três fases, por exemplo, de óleo, água, e gás, pode ser considerado como sendo um fluxo de gás de duas fases com mistura de óleo/água. Ainda outras técnicas para usar os sistemas das Figuras 21-24 são descritas abaixo com relação aos dados agrupados com relação aos usos e implementações específicas dos mesmos.

A figura 29 é um fluxograma 2900 que ilustra as técnicas para determinar as velocidades de escoamento de componente para um fluxo de três fases. Isto é, a Figura 29 corresponde a uma vista mais detalhada de determinação das velocidades de escoamento de componente, conforme mostrado na Figura 25 (2512).

Na Figura 29, são introduzidos os parâmetros da velocidade de escoamento de massa em bruto corrigida, da densidade em massa corrigida, e da fração de vazio de gás corrigida (e/ou fração de água corrigida) (2902). Depois, é determinada uma velocidade de escoamento de líquido corrigida (2904), isto é, uma velocidade de escoamento da mistura dos dois líquidos (por exemplo, óleo e água) no fluxo de três fases.

Uma velocidade de escoamento de massa de um primeiro componente líquido (por exemplo, água) é então determinada (2906), seguida por uma determinação de uma velocidade de escoamento de massa do segundo componente líquido (por exemplo, óleo) (2908). Finalmente, o valor corrigido da densidade, da fração de vazio de gás, e/ou da fração de água pode ser usado para determinar uma velocidade de escoamento de massa do componente de gás do fluxo de três fases (2910).

A figura 30 é um fluxograma 3000 que ilustra os exemplos de técnicas mais específicas para executar as determinações da Figura 29. Na Figura 30, deve ser entendido que as velocidades de escoamento de massa corrigidas do líquido e seus componentes são determinadas independentemente das medições corrigidas da densidade ou fração de vazio de gás.

Especificamente, é determinada uma fração de vazio de gás a-

parente (3002) com o uso da equação 32 acima. Depois, é determinada uma velocidade de escoamento de gás aparente (3004) com o uso da equação 36:

$$MF_{apparent}^{gas} = \alpha_{apparent} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{apparent}} \right) MF_{apparent} = \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{liquid} - \rho_{gas}} \right) \left(\frac{\rho_{liquid} - \rho_{apparent}}{\rho_{apparent}} \right) MF_{apparent} \quad \text{Eq. 36}$$

Em seguida, é determinada uma velocidade de gás superficial aparente (3006). A velocidade de gás superficial aparente pode ser calculada pela velocidade de escoamento de volume do líquido dividida pela área da seção transversal do tubo de fluxo A_T , conforme mostrado acima, e reproduzida aqui na equação 1:

$$SV^{gas} = \frac{MF^{gas}}{\rho_{gas} A_T} \quad \text{Eq. 1}$$

Uma velocidade de escoamento de líquido aparente pode ser então determinada (3008). A velocidade de escoamento de massa de fase líquida aparente pode ser derivada da velocidade de escoamento de massa em bruto aparente e da fração de vazio de gás aparente com o uso da equação 37:

$$MF_{apparent}^{liquid} = MF_{apparent} - MF_{apparent}^{gas} = (1 - \alpha_{apparent}) \left(\frac{\rho_{liquid}}{\rho_{apparent}} \right) MF_{apparent} \quad \text{Eq. 37}$$

A velocidade de líquido superficial aparente pode ser então determinada (3010). Para encontrar a velocidade líquida superficial aparente, a velocidade de escoamento de volume do líquido pode ser dividida pela área da seção transversal do tubo de fluxo A_T , conforme mostrado acima e reproduzido aqui na equação 2:

$$SV^{liquid} = \frac{MF^{liquid}}{\rho_{gas} A_T} \quad \text{Eq. 2}$$

Depois, uma taxa de erros para a medição de fluxo de massa de líquido é determinada (3012). Este erro na velocidade de escoamento massa

de líquido aparente pode ser definido como uma fração do fluxo de massa de líquido real, conforme mostrado na equação 38:

$$error(MF_{apparent}^{liquid}) = \left[\frac{MF_{apparent}^{liquid} - MF_{true}^{liquid}}{MF_{true}^{liquid}} \right]$$

Eq. 38

Este erro de fluxo de massa de líquido fracional como uma função de ambos os fluxos de líquido superficial aparente e gás superficial aparente (normalizados) podem ser avaliados com o uso de uma expressão polinomial mostrada na equação 39, onde o termo e_l^c é mostrado para indicar um erro corrigido para o fluxo de massa de líquido:

$$v_{ln}^a = \frac{v_l^a}{v_{lmax}}, v_{gn}^a = \frac{v_g^a}{v_{gmax}}$$

$$e_l^c = a_1 v_{gn}^a \cdot e^{a_2 v_{gn}^{a^2} + a_3 v_{gn}^a + a_4 v_{gn}^{a^2} + a_5 v_{gn}^a} + a_6 v_{gn}^{a^2} + a_7 v_{gn}^a + a_8 v_{ln}^{a^2} + a_9 v_{ln}^a$$

Eq. 39

Na equação 39, devido ao tamanho da(s) expressão(ões), é usada a seguinte notação: v_{ln}^a se refere a um fluxo de líquido aparente normalizado (substituindo "l" por "g" no subscrito para o parâmetro de gás correspondente), onde a normalização se baseia, por exemplo, em uma possível(veis) taxa(s) de fluxo máximas, conforme indicado por v_{lmax} e v_{gmax} .

Uma medição da velocidade de escoamento de massa de líquido corrigida pode ser determinada (3014) com o uso das equações 38 e 39, expressas aqui como a equação 40:

$$MF_{corrected}^{liquid} = \left(\frac{MF_{apparent}^{liquid}}{1 + error(MF_{apparent}^{liquid})} \right)$$

Eq. 40

Depois, as densidades de fração de água e de componente po-

dem ser determinadas (3016), ou obtidas com o uso das técnicas descritas acima, e usadas para determinar uma velocidade de escoamento de óleo e uma velocidade de escoamento de água corrigida (3018). Depois, com o uso da densidade em massa corrigida e da fração de vazio de gás corrigida (3020), pode ser determinada uma velocidade de escoamento de gás corrigida (3022).

Por exemplo, as velocidades de escoamento de massa de água e óleo podem ser calculadas usando as equações 41 e 42:

$$MF_{corrected}^{water} = WC_{corrected} \left(\frac{\rho_{water}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected}^{liquid} \quad \text{Eq. 41}$$

$$MF_{corrected}^{oil} = (1 - WC_{corrected}) \left(\frac{\rho_{oil}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected}^{liquid} \quad \text{Eq. 42}$$

Depois, com o uso da densidade de mistura corrigida (ou fração de vazio de gás corrigida), pode ser determinada a velocidade de escoamento de massa com o uso das equações 43 e 44:

$$\begin{aligned} MF_{corrected}^{gas} &= \alpha_{corrected} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected} = \left(\frac{\alpha_{corrected}}{1 - \alpha_{corrected}} \right) \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected}^{liquid} = \\ &= \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) \left(\frac{\rho_{corrected}^{liquid} - \rho_{corrected}}{\rho_{corrected} - \rho_{gas}} \right) MF_{corrected}^{liquid} \end{aligned} \quad \text{Eq. 43}$$

$$\begin{aligned} MF_{corrected}^{gas} &= \alpha_{corrected} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected} = \left(\frac{\alpha_{corrected}}{1 - \alpha_{corrected}} \right) \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) MF_{corrected}^{liquid} = \\ &= \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{corrected}} \right) \left(\frac{\rho_{corrected}^{liquid} - \rho_{corrected}}{\rho_{corrected} - \rho_{gas}} \right) MF_{corrected}^{liquid} \end{aligned}$$

Eq. 44

Deve ser entendido que, com base nas densidades de fase única e sua variação com a temperatura, é possível converter os fluxos de

massa em fluxos de volume em uma temperatura de referência.

Em alguns casos, pode haver incerteza no ajuste polinomial a curvas de erros, onde o efeito desta incerteza na velocidade de escoamento de massa corrigida é fornecido pela equação 45:

$$CE = \frac{(MF_{corrected}^{liquid} - MF_{true}^{liquid})}{MF_{true}^{liquid}} = \frac{(e_{apparent}^{liquid} - e_{true}^{liquid})}{(1 + e_{true}^{liquid})} \quad \text{Eq. 45}$$

- 5 A equação 45 ajuda a explicar porque alguns dados irão exibir erros grandes, quando os algoritmos de correção forem usados fora de uma região testada. Por exemplo, se o erro calculado em uma determinada velocidade de fluxo for -70%, mas o erro real for -75%, então, o erro do modelo será apenas de 5%, mas o erro no fluxo de massa corrigido será

$$\frac{-0.7 + 0.75}{1 - 0.75} = 0.2 = 20\%$$

- 10 Tal cálculo pode também ser usado nos resultados de modelagem do fluxo de duas fases, conforme descrito acima, para considerar o erro residual resultante na modelagem. Em uma implementação, o ajuste de quadrados mínimos do modelo pode ser modificado para minimizar o erro de fluxo de massa resultante do que o erro de modelo. Também, em geral, um
- 15 tubo de fluxo pode ser esperado como exibindo pequenos erros de fluxo de massa, de modo que se um medidor de fluxo for esperado como corrigindo grandes erros, então, a modelagem de erros (e, conseqüentemente, os dados experimentais) se tornará relativamente mais importante.

- 20 Desse modo, conforme descrito acima com relação à Figura 30, as velocidades superficiais aparentes são usadas para executar as correções de fluxo de massa, de modo a separar a correção de densidade em massa da correção de fluxo de massa líquida.

- 25 As figuras 31A-31D são gráficos que ilustram a correção de uma velocidade de escoamento de massa de um líquido de duas fases em um fluxo de três fases. As figuras 31A-31D mostram erros do fluxo de massa de líquido prognosticados, quando o algoritmo de correção de fluxo de três fa-

ses for aplicado aos dados obtidos de quatro ensaios óleo+água+gás usando uma orientação vertical. As figuras 31A-31D mostram que a curva de correção básica não trabalha dentro de 5% para todos os fluxos de gás, exceto os fluxos de gás que estão fora da faixa de dados usada para modelagem.

5 A figura 32 é um gráfico que mostra um erro de fluxo de massa como uma função da velocidade de escoamento de massa para óleo e água. A figura 33 é um gráfico que mostra um erro de fração de vazio de gás como uma função da fração de vazio de gás real. As figuras 32 e 33 ilustram os erros na estimativa de três frações de fluxo de massa pela implementação
10 de planilha eletrônica dos algoritmos acima.

Deve ser notado que a real determinação do fluxo de massa de gás pode ser afetada pela incerteza na densidade da mistura e pela relativa diferença na densidade entre a fase líquida e gasosa. Também, deve ser entendido que o polinômio de correção de densidade discutido acima pode
15 ser mais ou menos aplicável dependendo, por exemplo, da orientação de tubo de fluxo. Como resultado, por exemplo, o fluxo horizontal pode resultar em um erro inferior do que o fluxo vertical, ou vice-versa.

Na abordagem acima descrita, o uso de velocidades de líquido e gás superficiais pode permitir que os algoritmos de correção incluam conhecimento dos regimes de fluxo de múltiplas fases encontrados, o que pode
20 levar a melhores algoritmos de correção.

Os resultados sobre os dados práticos indicam que as curvas polinomiais de correção podem se beneficiar de serem desenhadas sobre os dados que se estendem nas faixas de fluxo esperadas, e de serem 'limitadas' para impedir resultados falsos, quando expostas aos dados fora da faixa conhecida.
25

Embora as implementações discutidas acima façam uso de uma sonda de fração de água externa ou de uma técnica similar, poder-se-ia usar outras implementações que contam com o medidor/sensor de fração de vazio externo 235, e/ou outros parâmetros de entrada.
30

Adicionalmente, conforme mencionado acima, podem ser usados outros dispositivos, tais como aqueles designados para determinar uma

"fração de óleo", em vez de uma fração de água. Além disso, se o óleo e a água em uma mistura apresentam densidades bem separadas, um sistema de amostragem poderá ser usado, o qual toma uma amostra representativa da mistura, a desgaseifica e usa um medidor Coriolis para determinar a fração de água.

Conforme descrito, no caso de fluxo de duas fases de líquido único, pode ser usado o conhecimento das densidades de líquido e gás na temperatura e pressão de operação com as medições de densidade e fluxo de massa corrigidas para calcular cada das velocidades de escoamento de massa de líquido e gás, e, assim, o fluxo volumétrico de líquido e gás.

No caso de fluxo de três fases, medições externas extras podem ser usadas para permitir a estimativa do fluxo de massa de gás e do fluxo de massa de cada dos dois líquidos. No caso da mistura líquida de água e óleo, a fração de água da mistura pode se medida a montante do medidor Coriolis, conforme explicado e ilustrado acima. Em uma implementação, pode ser assumido que os dois líquidos não interagem, de tal maneira a invalidar a suposição de que a mistura dos dois líquidos se comporta como um líquido único, na medida em que a interação com a fase gasosa é levada em consideração. Esta suposição torna o fluxo de três fases uma extensão do fluxo de duas fases de líquido único, medições extras sendo usadas para determinar a densidade do líquido misturado e para separar os fluxos de massa de líquido, depois da aplicação de cálculos de fluxo de duas fases.

Conforme adicionalmente discutido acima, um medidor Coriolis irá geralmente ler a menor tanto a densidade da mistura como o fluxo de massa da mistura de uma mistura de líquido/gás. Para compensar os erros nestas medições brutas e estimar os valores de medição reais, um modelo para as superfícies de erro poderá ser usado de modo a encontrar um mapeamento entre as medições brutas da densidade e do fluxo de massa e o valor dos erros de medição bruta para as medições tanto do fluxo de massa como da densidade, isto é, para executar um ajuste dos dados.

Conforme já mostrado, a curva de erro tanto da densidade como do fluxo de massa irá depender de muitos fatores, tais como, por exemplo, o

tamanho do medidor, a orientação do medidor (por exemplo, horizontal versus vertical), e um fluxo de massa de líquido nominal. Conseqüentemente, correções poderão ser desenvolvidas para cada tamanho e orientação de medidor individual. Em outras implementações, as compensações podem
5 ser representadas em escala, de acordo com o tamanho do medidor e/ou ajustadas de acordo com o alinhamento do medidor. Por exemplo, a Figura 24 ilustra modelos de erros que podem ser implementados usando redes neurais.

A figura 34 mostra uma forma específica de modelo de rede neu-
10 ral, o perceptron de múltiplas camadas (MLP), com apenas duas camadas de pesos 3412, 3414 e unidade ocultas sigmóides 3408, foi demonstrado como sendo capaz de aproximar qualquer função de mapeamento contínuo à precisão arbitrária (uma vez que o número de unidade oculta é suficiente-
mente grande), também denominada de propriedade de universalidade. Isto
15 é intuitivamente sustentado pela idéia de que qualquer mapeamento funcional razoável poderá ser aproximado da precisão arbitrária por uma superpo-
sição linear (executada pelas funções de ativação das unidades de saída) de um número suficientemente grande de funções não-lineares (representadas
pelas funções de ativação de unidades ocultas). Além disso, sendo uma re-
20 de de alimentação (isto é, não há qualquer loop interno nos dados que fluem das entradas para as saídas), suas saídas são funções determinísticas das
entradas, tornando toda a rede equivalente para um mapeamento funcional não-linear multivariado.

Para o desenho de uma técnica de compensação flexível para
25 dois erros de fluxo de duas ou três fases em um medidor Coriolis, os mode-
los de rede neural apresentam pelo menos as seguintes características van-
tajosas. Por exemplo, tais modelos conferem a capacidade de derivar um
mapeamento funcional não-linear de um banco de dados representativo e
suficientemente grande de medições relevantes, sem o conhecimento prévio
30 do modelo físico básico do processo. Tal característica pode ser particular-
mente vantajosa no exemplo do problema de compensação de fluxo de du-
as/três fases, onde efetivos processos físicos dentro do tubo podem ser difí-

ceis de serem obtidos.

Além disso, o tempo de desenvolvimento para uma solução viável para um problema específico pode ser significativamente reduzido comparado com outras técnicas de ajuste de dados, que contam com perícia de domínio. Por exemplo, no caso específico de compensação de fluxo de duas fases, a mudança do tamanho/orientação/tipo de medidor poderia mudar por completo a forma da superfície das medições brutas, e para uma técnica de dados convencional, isto pode implicar em um processo de achar outra forma para o mapeamento funcional que não é garantido para encontrar uma solução em tempo razoável. Em contraste, com o uso da mesma arquitetura de rede neural, o treinamento da rede neural pode encontrar a "melhor" (no sentido da função de custo escolhida para controlar o treinamento da rede) solução para os dados disponíveis pelo ajuste de seus parâmetros internos durante o processo de treinamento.

A seguinte discussão fornece uma explanação de um exemplo de uma rede neural, isto é, um modelo MLP. Especificamente, a Figura 34 é uma representação gráfica do modelo MLP.

Para modelar as superfícies de erro de medições brutas para densidade e fluxo de massa, conforme discutido acima, um mapeamento funcional poderá ser fornecido por $\text{MeasError} = F(\text{dd}, \dot{m})$, com a queda aparente dd na densidade da mistura e no fluxo de massa aparente $\dot{m}$ do líquido. Deve ser notado que esta notação é ligeiramente diferente da notação acima para os mesmos parâmetros, isto é, Δp e MF , respectivamente.

A figura 34 ilustra um modelo de perceptron de múltiplas camadas (MLP) com duas entradas (dd 3402 e $\dot{m}$ 3404) e uma saída (MeasError 3406). O comportamento de cada unidade é graficamente representado na Figura 35.

Uma saída y 3510 de uma unidade pode ser fornecida pela aplicação de uma função de ativação f 3502 para as somas ponderadas 3504 de n entradas de unidade x_i 3506, para assim definir uma fração unitária 3508, conforme mostrado na Figura 35 e na equação 46:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad \text{Eq. 46}$$

Em termos gerais, um MLP é uma arquitetura de rede neural de alimentação com diversas camadas de unidades. O termo 'alimentação' indica que os dados fluem uniformemente das entradas para as saídas, sem loops internos; isto assegura que a função das saídas seja determinística. A fim de assegurar a propriedade de universalidade, o MLP usado para a compensação de erro de medição de fluxo de duas fases pode ser uma arquitetura de duas camadas com funções de ativação sigmóides para unidades ocultas 3308 e uma função de ativação linear para a unidade de saída 3410.

Neste caso, a função de ativação sigmóide pode ser fornecida por

$$\text{sig}(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}},$$

enquanto a função de ativação linear pode ser representada como $\text{lin}(a) = a$.

Depois, uma saída do MLP usada como uma função das entradas pode ser escrita como na equação 47:

$$\text{MeasError} = \sum_{i=1}^{nh} w_i^{\text{output}} \text{sig}(w_1^{\text{input}} dd + w_2^{\text{input}} \dot{m}) = \sum_{i=1}^{nh} w_i^{\text{output}} \frac{1}{1 + e^{-(w_1^{\text{input}} dd + w_2^{\text{input}} \dot{m})}} \quad \text{Eq. 47}$$

Isto é, a equação 47 representa uma função não-linear na queda aparente na densidade e no fluxo de massa da mistura, com nh sendo o número de unidades ocultas 3408.

Os parâmetros de rede w^{input} , w^{output} e nh podem ser determinados durante um processo denominado de treinamento, essencialmente, uma otimização de uma função de custo. Conforme estabelecido acima, para assegurar a propriedade de universalidade, nh tem que ser suficientemente grande (ele dita, na verdade, o grau de liberdade para o modelo, conseqüentemente, sua complexidade). Entretanto, seu valor deve ser escolhido apropriadamente; um valor pequeno demais pode levar a um ajuste pobre com relação aos dados de treinamento, enquanto um valor grande demais pode

levar a capacidades de generalização pobres devido ao superajuste dos dados de treinamento (o paralelo no campo de ajuste de dados polinomiais convencionais é o grau do polinômio).

Há vários métodos para se escolher o número de unidades ocultas 3408. Uma técnica é a de se executar uma pesquisa exaustiva para nh (dentro de alguns limites razoáveis) e escolher o valor para o qual é conseguida a melhor generalização.

O perfil geral de uma implementação de um processo de treinamento é descrito abaixo. Os dados disponíveis para o treinamento são divididos em três conjuntos independentes: o conjunto de treinamento (usado para iterativamente mudar os valores dos pesos de MLP para minimizar a função de custo), o conjunto de validação (usado para deter o treinamento antes de impedir o superajuste dos dados de treinamento), e o conjunto de prova (usado para escolher o número de unidades ocultas).

Em uma implementação, o treinamento da rede começa com um conjunto inicial de pesos de rede $w_0 = (w^{\text{input}}, w^{\text{output}})$ sucessivamente mudando-os para minimizar uma função de custo predefinida, por exemplo, o erro da média dos quadrados. Em cada tal mudança, as saídas do MLP correspondendo aos dados no conjunto de treinamento podem ser avaliadas, e os valores dos pesos são atualizados de acordo com uma "regra de aprendizado" específica, conforme conhecido no campo do desenho de rede neural, a fim de minimizar o valor da função de custo sobre o conjunto de treinamento.

A função de custo pode também ser avaliada sobre o conjunto de validação, e o treinamento poderá ser interrompido, quando este começar a aumentar, de modo que um compromisso adequado entre o ajuste dos dados de treinamento e as capacidades de generalização possa ser obtido. Isto é, o superajuste do treinamento para a convergência sobre o conjunto de treinamento pode ser impedido. Se dados suficientes estiverem disponíveis, um conjunto de provas poderá também ser usado para avaliar o desempenho de vários MLPs treinados, conforme descrito, mas com diferentes números de unidades ocultas para escolher a arquitetura que confere a fun-

ção de custo mínimo sobre o conjunto de provas.

No caso da compensação de fluxo de massa, para uma região GVF inferior, a precisão de compensação poderá ser aumentada, se esta área for considerada separada do resto e modelada de acordo. Tal(tais) abordagem(gens) sugere(m) o uso de um "comitê de modelos", também denominado de "mistura de peritos", com áreas separadas, mas sobrepostas de perícia para permitir a comutação suave entre os modelos.

Um exemplo de tal comitê, aquele usado para compensar os erros de fluxo de massa brutos para um tubo de fluxo de 25,4 mm (1 polegada) no alinhamento vertical, é:

Modelo 1: 0-1,5 kg/s, 0-15% GVF

Modelo 2: 0-1,5 kg/s, 10% GVF em diante

Modelo 3: 1,2 kg/s em diante, 0-15% GVF

Modelo 4: 1,2 kg/s em diante, 10% GVF em diante

Um modelo diferente, denominado de "modelo cobertor", também pode ser treinado com o uso de toda a faixa de fluxos e GVFs. A rede cobertor pode ser usada para prover uma idéia preliminar a cerca do fluxo de massa de líquido. Com o uso desta estimativa juntamente com a GVF estimada real (com base no modelo de compensação de densidade), um modelo perito específico (ou uma combinação de dois modelos peritos, se os dados estiverem em uma região de sobreposição) poderá ser selecionado, e sua compensação aplicada.

As figuras 36A, 36B e 37A-D ilustram resultados dos dados de fluxo de duas fases coletados para um medidor de fluxo Coriolis de 25,4 mm (1 polegada), em alinhamento tanto horizontal como vertical, com água e ar. Cinquenta e cinco linhas de fluxo foram usadas, com fluxo nominal variando de 0,35 kg/s a 3,0 kg/s em etapas de 0,0250 kg/s, com etapas GVF típicas de 0,5% e GVF de 1% (dependendo do valor de fluxo nominal), fornecendo um total de 3400 pontos experimentais, para uma média de 45 pontos por linha de fluxo. As superfícies correspondentes para erros de densidade e fluxo de massa brutos são fornecidas nas Figuras 36A e 36B, respectivamente.

- Com base nestes dados, as soluções de compensação para erros de densidade e fluxo de massa de líquido, conforme descrito acima, podem ser derivadas e validadas online, com o uso de dados de teste independentes, conforme mostrado nas Figuras 37A-37D. As entradas de modelo para a técnica de compensação são a velocidade superficial de líquido

normalizada bruta

$$v_{ln}^a = \frac{v_l^a}{v_{lmax}} = \frac{\frac{MF_{apparent}^{liquid}}{A_r \rho_{liquid}}}{v_{lmax}} \quad (\text{com notação na qual } A_r \text{ representa uma área da seção transversal do tubo de fluxo e } v_{lmax} \text{ a velocidade superficial máxima do líquido, e } MF_{apparent}^{liquid} \text{ uma velocidade de escoamento de massa do líquido) e a queda aparente na densidade da mistura.}$$

- Os dados de teste neste exemplo incluíram treze linhas de fluxo, com fluxos nominais variando de 0,6 kg/s a 3 kg/s, em etapas de 0,25 kg/s, com etapas GVF de 2%, dando um total de 266 pontos experimentais, uma média de 20 pontos por linha de fluxo.

- As figuras 38-68 são gráficos que ilustram resultados de provas e/ou de modelagem de várias implementações descritas acima com relação às Figuras 1-37, ou implementações afins. Mais especificamente, as Figuras 38-68, a menos que de outro modo indicado abaixo, são gráficos que refletem os resultados dos ensaios de três fases nos quais os fluidos usados foram óleo cru com uma gravidade API de 35°, salmoura simulada (isto é, mistura de sal-água) com 2% em peso de NaCa, e nitrogênio. Os testes foram conduzidos em uma pressão de aproximadamente 1034 KPa (150 psig) e temperatura de 37,7°C (100°F).

Na seguinte descrição e figuras, é feita referência às seguintes condições de teste:

- Test00wc - 4000 bpd
- Test00wc - 6000 bpd
- Test06wc - 3000 bpd
- Test06wc - 4000 bpd
- Test06wc - 6000 bpd

	Test06wc - 8000 bpd
	Test13wc - 3000 bpd
	Test13wc - 6000 bpd
	Test25wc - 3000 bpd
5	Test25wc - 7000 bpd
	Test35wc - 3000 bpd
	Test35wc - 7000 bpd
	Test50wc - 3000 bpd
	Test50wc - 5000 bpd
10	Test50wc - 7000 bpd
	Test50wc - 8000 bpd

Neste contexto, as Figuras 38A e 38B ilustram erro induzido pelo gás resultante das medições brutas de densidade e fluxo de massa, respectivamente, do medidor Coriolis.

15 A figura 39 ilustra a resposta observada da sonda de fração de água usada nestes ensaios. Para este dispositivo específico, a presença de gás livre reduz a fração de água observada comparada com o valor real (para a mistura de óleo-água isenta de gás), que diminui uniformemente à medida que o vazão de gás aumenta. A resposta pode também ser uma função da taxa de massa total e da fração de água intrínseca da fase líquida, entre
20 outros fatores. Para um determinado nível de fração de vazão de gás (GVF), a fração de água observada geralmente diminui à medida que a taxa de massa total e a fração de água intrínseca aumenta. A superfície de resposta da fração de água pode também ser afetada por parâmetros, tais como, por
25 exemplo, regime de fluxo e propriedades do fluido.

As figuras 40A-40C ilustram erros residuais para as medições do fluxo de massa, da densidade e da fração de água da mistura em bruto depois de uma modelagem com base em rede neural ter sido completada, com base nos conjuntos de dados mostrados nas Figuras 38A, 38B e 39, com
30 frações de água variando de 0 a 50%. Os erros de fluxo de massa em bruto são principalmente mantidos dentro de 2% da leitura, os erros de densidade em massa são principalmente mantidos dentro de 1% da leitura, e os erros

de fração de água são principalmente mantidos dentro de 2% de 1-100% da faixa de escala total.

A figura 41 ilustra como estes resultados são mapeados nos erros de fluxo volumétrico correspondentes para fluxos de óleo, água e gás. É notado que tanto para os volumes tanto de gás como de água, um baixo fluxo volumétrico absoluto (para água em frações de água inferiores, e gás em GVFs inferiores) pode levar a erros de grande porcentagem como uma proporção da leitura. À medida que a velocidade de escoamento de óleo pode ser significativa nestes ensaios, os erros em termos da porcentagem permanecem principalmente dentro de 5%.

As figuras 42-47 são gráficos que demonstram técnicas para estender os cálculos de fluxo de massa para gerar leituras volumétricas de óleo, água e gás. As figuras 42-47 também demonstram como erros na leitura de fração de água podem atingir as medições volumétricas de óleo, água e gás.

Nas Figuras 42-47, as correções de erro de densidade e de massa de fluxo se baseiam nos dados de óleo acima descritos, com 6% da fração de água e um valor de fração de água de referência de 5,5%. Uma vez que os gráficos propriamente ditos se baseiam também neste conjunto de dados, os erros previstos da densidade e do fluxo de massa são relativamente pequenos, o que não é necessariamente pertinente à demonstração de como a precisão do fração de água afeta as medições volumétricas.

O princípio Coriolis e técnicas afins, conforme descrito acima, apresentam estimativas para um fluxo de massa e densidade total do fluido misturado de três fases. O conhecimento das densidades reais de fluido e de fração de água (talvez estimada ou corrigida), juntamente com os modelos de erros de fluxo de duas fases, fornece estimativas da velocidade de escoamento de massa apenas do fluido e da fração de vazio de gás (GVF). Desse modo, nas Figuras 42-47, são ilustrados os cálculos finais, nos quais, dada a velocidade de escoamento de massa apenas do fluido e da fração de água, são obtidas as velocidades de escoamento volumétricas dos componentes de óleo e gás, enquanto a GVF produz a velocidade de escoamento

volumétrica.

Conseqüentemente, as Figuras 42-44 ilustram os cálculos de velocidades de escoamento volumétricas de água, óleo e gás, respectivamente, assumindo que a fração de água é perfeitamente conhecida. De acordo com esta suposição, os erros volumétricos tanto do óleo como da água são consistentemente pequenos, sendo principalmente dependentes dos erros de modelagem residuais para as correções da densidade e do fluxo de massa, que, sob as condições, são pequenos.

O fluxo volumétrico de gás pode ser sensível a erros no cálculo da densidade em GVFs inferiores. Por exemplo, com GVF de 2%, um 1% de erro absoluto na estimativa da GVF pode levar a 50% de erros no fluxo de gás volumétrico estimado. Tais erros relativos grandes podem geralmente ser associados com fluxos de gás relativamente baixos, e, portanto, podem ser improvavelmente significativos nas aplicações de óleo e gás, tais como os exemplos descritos aqui.

As figuras 45-47 ilustram os mesmos cálculos, quando a estimativa de fração de água se encontra em erro em +1% absoluto. Esta é uma margem de erros razoável, que permite a precisão de medição básica seguida por correções para os efeitos de fluxo de duas ou três fases.

Mais especificamente, a Figura 45 ilustra o erro volumétrico de água com um erro absoluto de fração de água de +1%. O erro médio grande é de cerca de 16%. Com uma fração de água real de apenas 6% do volume líquido total, um erro de 1% absoluto na estimativa de fração de água pode resultar em aproximadamente 16% de superestimativa de velocidade de escoamento volumétrica de água.

A figura 46 ilustra que os erros correspondentes para fluxo volumétrico de óleo são muito menores, refletindo o menor impacto que o erro de fração de água de 1% tem sobre a medição de volume de gás. Desse modo, os erros de fluxo de gás podem ser vistos como sendo sensíveis a erros de fração de água em GVF inferior, onde esta influência pode diminuir com GVFs superiores.

As figuras 49-50 são gráficos que ilustram uma correção da leitu-

ra do medidor de fração de água (isto é, o medidor de fração de água de Dinâmica de Fase) para erros induzidos pelo gás. Os dados para as Figuras 48-50 se baseiam nos dados de óleo descritos acima, com valores de fração de água nominais de 0,0, 5,5, 13,1, 24,8, 35,6 e 50,0%. Embora uma saída de fração de água real que é interrompida seja geralmente zero, os dados de frequência brutos e as equações características associadas com as operações do medidor de fração de água permitem leituras estendidas de fração de água que caem abaixo de zero%, conforme mostrado.

Neste contexto, o medidor de fração de água apresenta um erro mesmo em GVF de 0%, devido à presença de quantidades residuais de 'transporte' de gás do processo, como segue (em unidades de fração de água absolutas) com relação aos resultados de provas especificados indicados acima:

	Test00wc - 4000 bpd: -0,52
15	Test00wc - 6000 bpd: -1,91
	Test06wc - 3000 bpd: -0,89
	Test06wc - 4000 bpd: -0,74
	Test06wc - 6000 bpd: -1,53
	Test06wc - 8000 bpd: -2,78
20	Test13wc - 3000 bpd: 1,17
	Test13wc - 6000 bpd: 0,87
	Test25wc - 3000 bpd: 0,91
	Test25wc - 7000 bpd: -0,56
	Test35wc - 3000 bpd: 0,74
25	Test35wc - 7000 bps: -0,35
	Test50wc - 3000 bpd: 3,89
	Test50wc - 5000 bpd: 2,64
	Test50wc - 7000 bpd: 290
	Test50wc - 8000 bpd: 2,31

30 Para fins de corrigir os erros induzidos pelo gás, o medidor de fração de água foi considerado sem erros em GVF de 0% (como na Figura 1).

Nas Figuras 48 e 49, uma rede neural, ao longo das linhas descritas acima, foi construída com entradas de: leitura de fração de água bruta, leitura de fluxo de massa real, e fração de vazio real. As saídas incluem erro de fração de água (em unidades absolutas de fração de água - neste caso, 5 porcentagem). Conseqüentemente, sucessivos cálculos entre esta rede neural e as correções de fluxo de massa/densidade, conforme descrito acima, levam a uma solução total convergida.

Com os dados conforme descritos, a leitura de medidor de fração de água pode ser corrigida a partir de erros tão grande quanto -40% para 10 principalmente dentro de 2 por cento de erro absoluto, conforme mostrado na Figura 48, que, conforme mencionado acima com relação às Figuras 42-47, pode atingir as correções de água e óleo para o medidor Coriolis.

A figura 48 aparece para ilustrar que o modelo de rede neural deixa de corrigir apropriadamente por algumas linhas, mas um estudo 15 detalhado das linhas em questão mostra que o modelo é uma ligeira aproximação dos mínimos quadrados do comportamento experimental, enquanto os efetivos dados de erro de fração de água são mais não-lineares (para exemplos, vide a Figura 49). Como com os erros de densidade e de fluxo de massa, a densidade de dados mais alta (isto é, pontos mais experimentais) pode 20 prover um aperfeiçoamento na qualidade do ajuste, e também pode permitir uma boa avaliação do nível de ruído experimental.

As figuras 50-54 são gráficos que ilustram a correção sucessiva de líquidos e fluxo de massa de gás e usando a correção de fração de água, conforme descrito geralmente acima com relação à Figura 27. Nas Figuras 25 50-54, os dados se baseiam nos dados de óleo, conforme descrito acima, com um valor de fração de água nominal de 5,5%, enquanto as correções de fluxo de massa e densidade usadas neste estágio se baseiam nos dados de óleo com fração de água de 6%. O modelo de correção de fração de água (isto é, o modelo de rede neural) usado aqui é aquele descrito acima com 30 relação às Figuras 48 e 49.

Os erros de fração de água brutos são descritos e mostrados acima com relação à Figura 39, que mostra o erro de fração de água bruto,

conforme descrito acima; contudo, para o resto da análise de fluxo, a leitura de fração de água é limitada dentro de 0 e 100%, com valores fora da faixa sendo forçados a assumirem o valor limite.

5 As figuras 50A e 50B ilustram erros de densidade e fluxo de massa da mistura bruta, respectivamente. As figuras 51A-51C ilustram erros brutos para fluxos de massa de água, óleo e gás, respectivamente. A figura 52 ilustra convergência depois de duas repetições da Figura 27, com a medição de fração de água corrigida dentro de 3% da densidade de mistura principalmente dentro de 15 e fluxo de massa principalmente dentro de 2%.

10 As figuras 53A-53C ilustram o comportamento de fração de água corrigido durante o processo. As precisões de correção de água, óleo e gás são ilustradas nas Figuras 54A-54C, respectivamente. Aqui, o fluxo de massa de óleo é corrigido para dentro de 3%. Nas Figuras 54A-54C, o fluxo de massa de água é mais afetado, com 2-3% erro no rendimento de fração de
15 água +/- 40% de erro no fluxo de massa de água. O erro de gás é alto na GVF baixo, caindo para dentro de 3% para GVFs sobre 15%. Como com os erros de densidade e fluxo de massa, a densidade de dados mais alta (isto é, os pontos experimentais) pode geralmente permitir o aperfeiçoamento na qualidade do ajuste, podendo também permitir uma melhor avaliação do nível de ruído experimental.
20

As figuras 55-63 são gráficos que ilustram uma correção "tridimensional" para a densidade e o fluxo de massa de líquido, que considera variações no erro devido às variações na(s) medição(ções) de fração de água. Esta técnica pode ser usada para se obter erros aceitáveis sobre uma
25 faixa mais ampla de frações de água (em oposição aos exemplos acima, nos quais os dados de fluxo relatados são geralmente limitados em cerca de 6% da fração de água).

Desse modo, a fim de considerar tais variações nos erros de fluxo de massa e densidade que são causadas pelas variações na(s) medição(ções) de fração de água, as Figuras 55-63 ilustram o uso de uma leitura
30 de fração de água real como um parâmetro de entrada extra, ao longo da queda aparente na densidade de mistura e fluxo de massa aparente.

Os dados se baseiam nos dados de óleo discutidos acima, mas com valores de fração de água nominais de 0, 5,5, 13,1, 24,8, 35,6 e 49%. A distribuição das linhas de fluxo por fração de água nominal é a seguinte:

	0%	: 4000 e 6000 bpd
5	5,5%	: 3000, 4000, 6000 e 8000 bpd
	13,1%	: 3000 e 6000 bpd
	24,8%	: 3000 e 7000 bpd
	35,6%	: 3000 e 7000 bpd
	49%	: 3000, 5000, 7000 e 8000 bpd

10 As figuras 55A e 55B ilustram erros de densidade e de fluxo de massa da mistura de fluido bruta, respectivamente. As figuras 56-61 ilustram erros de fluxo de massa de mistura de fluido residual depois da aplicação do modelo de "fração de água de 6%" anteriormente usado. É evidente que enquanto alguns dos erros (especialmente para os dados de fração de água de 15 6% propriamente ditos, Figura 57) são pequenos, em frações de água superiores, os erros residuais crescem. Tendências similares são mostradas para erros de densidade residuais usando os dados de fração de água de 6% como o modelo.

Modelos aperfeiçoados para erros de densidade e fluxo de massa de mistura foram treinados usando o valor real de fração de água como 20 uma entrada extra. A precisão das correções resultantes nos dados de treinamento é fornecida nas Figuras 62 e 63. Os erros residuais são maiores do que para um modelo com base apenas em um fração de água único (fluxo de massa dentro de 5% em vez de 2%, densidade dentro de 2% em vez de 25 1%). Entretanto, o modelo cobre uma boa faixa de leituras de fração de água em vez de apenas um valor único, e representam um aperfeiçoamento potencial sobre os erros piores nas Figuras 56-61.

Os erros descritos podem ser reduzidos com a aquisição de mais pontos de dados. Por exemplo, para a maioria dos frações de água, 30 havia apenas duas linhas de fluxo. O número de pontos de dados no conjunto pode ser insuficiente para poder identificar os estranhos. Com uma maior e melhor qualidade de dados, talvez possam ser possíveis os erros menores

de densidade e de fluxo de massa, mesmo permitindo uma faixa de valores de fração de água.

As figuras 64-68 são gráficos que ilustram resultados do embutimento de correção de densidade e de fluxo de massa de líquido tridimensional das Figuras 55-63 no processo descrito acima com relação às Figuras 50 e 54 e Figura 27. Por sucessivas gerações de correções de fração de água, de densidade e de fluxo de massa, podem ser mostrados erros volumétricos resultantes no uso deste modelo e no modelo de erro de fração de água.

Desse modo, as Figuras 64-68 ilustram resultados de sucessivas correções de correção de fluxo de massa de gás, de líquido(s), e de fração de água usando as correções de densidade e fluxo de massa que levam em consideração as variações graças à fração de água. Os resultados finais são cálculos de fluxos volumétricos para óleo, água e gás, conforme pode ser usado para, por exemplo, a indústria de óleo e gás.

Estes cálculos ilustrados representam um conjunto "completo", adequado para aplicações contínuas de óleo. Os dados se baseiam nos dados de óleo, conforme descrito acima, com valores de fração de água nominais de 0, 5,5, 13,1, 24,8, 35,6 e 49%. As correções de fração de água, fluxo de massa e densidade usadas se baseiam em todo o conjunto de dados para a faixa de fração de água de 0 a 50%.

O modelo de correção de fração de água usado é o mesmo que aquele discutido acima com relação às Figuras 42-49. Conforme já afirmado, o procedimento empregado, conforme descrito, com relação às Figuras 27 e 50-54, mas as correções de densidade e fluxo de massa tomam em consideração as variações de fração de água. Os modelos de correção de densidade e de fluxo de massa usados são aqueles discutidos acima com relação às Figuras 55-63.

A figura 39, acima, ilustra erros de medidor de fração de água induzidos por gás brutos. As figuras 64A, 64B, 65A, 65B e 65C fornecem erro induzido por gás de fluxo de massa e densidade de mistura bruto, e erro bruto de água, óleo e gás, respectivamente. Com os dados disponíveis, é

possível convergir em sucessivos cálculos, com a medição de fração de água corrigida dentro de 5%, a densidade da mistura principalmente dentro de 2% e o fluxo de massa principalmente dentro de 5%, conforme mostrado nas Figura 66A-66C.

- 5 As precisões de correção de água, óleo e gás alcançadas depois de sucessivos cálculos são mostradas nas Figuras 67A-67C. O fluxo de massa de óleo é corrigido principalmente dentro de 5%. O fluxo volumétrico de água é mais afetado, com 2-3% de erro rendendo +/-40% de erro no fluxo volumétrico de água. O erro de gás é alto em GVF inferior, conforme espe-
- 10 rado, caindo para principalmente 5% para GVFs além de 15%.

A figura 68 ilustra um exemplo do comportamento de fração de água corrigido durante o(s) processo(s). Como com os erros de densidade e fluxo de massa, a densidade de dados mais alta (isto é, mais pontos experimentais) pode permitir o aperfeiçoamento na qualidade do ajuste, e pode

15 também permitir uma melhor avaliação do nível de ruído experimental.

Um conjunto de ferramentas de análise e algoritmos de correção foi ilustrado, o qual, fornecidos os dados apropriados para óleo, água e gás usados em uma aplicação específica, pode compensar os erros induzidos pelo gás nas leituras de fração de água e Coriolis, para assim dispensar ta-

20 xas volumétricas de fluxo de gás, água e óleo.

Conforme descrito acima, um medidor de fluxo de massa pode ser capaz de manter a operação na presença de uma alta porcentagem de gás em um fluxo medido, tanto com um líquido único como com líquido misturado (isto é, no fluxo de duas fases ou de três fases). Estimativas e/ou me-

25 dições aparentes da densidade e do fluxos de massa da mistura de líquido-gás podem ser assim obtidas. Entretanto, estas estimativas apresentam erros que dependem de vários fatores, incluindo, por exemplo, a fração de vazio de gás e/ou o fluxo de massa real de líquido, que podem ser tão grandes de modo a inutilizar as medições brutas.

30 Com o uso de um parâmetro de medição adicional, tal como, por exemplo, uma medição de fração de vazio de gás ou fração de água, juntamente com as medições de densidade e velocidade de escoamento de mas-

sa aparente, podem ser obtidos os valores corrigidos para todos estes parâmetros, e outros. Além disso, com o ciclo através destes cálculos e medições com correções jamais aperfeiçoadas, podem ser obtidos valores sucessivamente aperfeiçoados, como, por exemplo, as correções que convergem para valores específicos.

Conforme descrito acima, as técnicas para executar estas correções podem se basear nas técnicas de ajuste de dados que procuram determinar, por exemplo, as taxas de erro existentes em uma configuração ou cenário específico, de modo que estes erros possam ser considerados para medições e correções futuras. Assim, estas técnicas podem ser dependentes de uma extensão de correlação entre os cenários/configurações nas quais os dados foram obtidos e os cenários/configurações nas quais elas são finalmente aplicadas.

Técnicas de correção afins ou outras técnicas de correção podem ser usadas para na caracterização do(s) fluxo(s) de fluido em um sentido mais geral, isto é, usando equações de fluxo de fluido que procuram descrever um comportamento do fluxo como uma matéria física. Por exemplo, podem ser usadas, neste sentido, as equações Navier-Stokes bem-conhecidas.

Especificamente, a forma tridimensional inconstante das equações Navier-Stokes descrevem como a velocidade, a pressão, a temperatura e a densidade de um fluido em movimento são relacionadas. As equações são um conjunto de equações diferenciais acopladas e podem teoricamente ser solucionadas para um determinado problema de fluxo com o uso de métodos de cálculo, ou podem ser solucionadas analiticamente, tal com o uso de certas simplificações ou ajustes que podem ser determinados para serem úteis e aplicáveis em uma determinada circunstância.

Estas equações ou equações afins podem considerar, por exemplo, a convecção (um processo físico que ocorre em um fluxo de gás no qual uma certa propriedade é transportada pelo movimento ordenado do fluxo), e/ou difusão (um processo físico que ocorre em um fluxo de gás no qual uma certa propriedade é transportada pelo movimento aleatório das moléculas).

las do gás, e que pode se referir à viscosidade do gás). Turbulência, e a geração de camadas limitrofes, são o resultado da difusão no fluxo.

Com o uso de tais equações e características de fluxo de fluido, técnicas de correção poderão ser obtidas para muitos ou todos os parâmetros e técnicas discutidos acima. Por exemplo, tais equações de fluxo de fluido podem ser usadas na definição de um modelo de correção comum, que pode ser suplementado pelas técnicas de ajuste de dados, tais como aquelas descritas acima, ou vice-versa.

Inúmeras implementações foram descritas. Contudo, será entendido que várias modificações podem ser feitas. Conseqüentemente, outras implementações se encontram dentro do escopo das seguintes reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema **caracterizado pelo fato de que** compreende:

um controlador (104) que é operável para receber um sinal de sensor de um primeiro sensor conectado a um tubo de fluxo (215) vibrável contendo um fluxo de fluido de três fases que inclui um primeiro líquido, um
5 segundo líquido, e um gás, o controlador (104) sendo adicionalmente operável para analisar o sinal de sensor para determinar um parâmetro de fluxo aparente do fluxo de fluido;

um segundo sensor que é operável para determinar uma condição de fluxo aparelho do fluxo de fluido; e
10

um módulo de correções (240, 250, 260) que é operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo aparente e determinar um parâmetro de fluxo corrigido a partir daí.

2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o módulo de correções (240, 250, 260) é adicionalmente operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo aparente e determinar uma condição de fluxo a partir daí.
15

3. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o parâmetro de fluxo aparente inclui uma densidade em massa aparente do fluxo de fluido.
20

4. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o parâmetro de fluxo aparente inclui uma vazão de massa em bruto aparente do fluxo de fluido.

5. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o segundo sensor inclui uma sonda de fração de líquido (230) que é operável para determinar uma medição de fração de líquido que identifica uma fração de volume do primeiro líquido com relação ao segundo líquido.
25

6. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o segundo sensor inclui um sistema de determinação de fração de vazão que é operável para determinar uma fração de vazão do gás dentro do fluxo de fluido.
30

7. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende um sistema de determinação de vazão (265) de componente que é operável para determinar uma vazão do primeiro líquido dentro do fluxo de fluido.

5 8. Sistema, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de que** o sistema de determinação de vazão (265) de componente é implementado no controlador (104), no módulo de correções (240, 250, 260), no segundo sensor, ou em um computador hóspede em comunicação com o controlador (104), o módulo de correções (240, 250, 260) ou o segundo sensor.
10

9. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende um sistema de determinação de vazão (265) de componente que é operável para determinar uma vazão do gás dentro do fluxo de fluido.

15 10. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a implementação do módulo de correções (240, 250, 260) é associada com um processador do controlador (104).

11. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a implementação do módulo de correções (240, 250, 260) é associada com um processador do segundo sensor.
20

12. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** compreende um computador hóspede que está em comunicação com o controlador (104) ou o segundo sensor e é operável para implementar o módulo de correções (240, 250, 260).

25 13. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que:**

o segundo sensor é operável para emitir um primeiro valor de condição de fluxo aparente para o controlador (104) para uso na determinação de um primeiro valor de parâmetro de fluxo corrigido;

30 o controlador (104) é operável para emitir o primeiro valor de parâmetro de fluxo corrigido para o segundo sensor para determinação de um primeiro valor de condição de fluxo corrigido; e

o segundo sensor é operável para emitir um segundo valor de condição de fluxo corrigido para o controlador (104) para uso na determinação do valor de parâmetro de fluxo corrigido.

14. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o módulo de correções (240, 250, 260) inclui uma rede neural que é operável para introduzir o parâmetro de fluxo aparente e a condição de fluxo aparente e emitir o parâmetro de fluxo corrigido e uma condição de fluxo corrigida.

15. Sistema, de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** a rede neural inclui:

um primeiro modelo de correção que é específico a um tipo do segundo sensor e condição de fluxo e que é operável para emitir uma condição de fluxo corrigida; e

um segundo modelo de correção que é específico a um tipo do parâmetro de fluxo aparente e que é operável para emitir o parâmetro de fluxo corrigido,

onde o primeiro modelo de correção é operável para corrigir a condição de fluxo aparente com base na condição de fluxo aparente e no parâmetro de fluxo corrigido, e o segundo modelo de correção é operável par corrigir o parâmetro de fluxo aparente com base no parâmetro de fluxo aparente e na condição de fluxo corrigido.

16. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o controlador (104) é operável para corrigir o parâmetro de fluxo aparente com base em uma relação teórica entre o parâmetro de fluxo aparente e o parâmetro de fluxo corrigido.

17. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o controlador (104) é operável para corrigir o parâmetro de fluxo aparente com base em uma relação empírica entre o parâmetro de fluxo aparente e o parâmetro de fluxo corrigido.

18. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende um conduto que conecta o segundo sensor e o tubo de fluxo (215) vibrável, de tal modo que o fluxo de

fluido flua através do segundo sensor, do tubo, e do tubo de fluxo (215) vibrável.

19. Sistema, de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado pelo fato de que** o primeiro líquido, o segundo líquido e o gás são co-
5 misturados entre si dentro do fluxo de fluido durante a determinação da condição de fluxo pelo segundo sensor.

20. Método **caracterizado pelo fato de que** compreende:
a determinação de uma densidade em massa aparente de um
fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo (215), o fluxo de múlti-
10 plas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás;
a determinação de uma vazão de massa em bruto aparente do
fluxo de múltiplas fases; e
a determinação de uma primeira vazão de massa do primeiro
líquido, com base na densidade em massa aparente e na vazão de massa
15 em bruto aparente.

21. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado pelo fato de que** compreende a determinação de uma condição de fluxo
aparente do fluxo de múltiplas fases diferente da densidade em massa apa-
rente e da vazão de massa em bruto aparente, onde a determinação da pri-
20 meira vazão de massa do primeiro líquido compreende a determinação da
primeira vazão de massa com base na condição de fluxo aparente.

22. Método, de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da primeira vazão de massa do primeiro
líquido compreende a determinação de uma condição de fluxo corrigida, com
25 base na condição de fluxo aparente.

23. Método, de acordo com a reivindicação 22, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da condição de fluxo corrigida compreende
a determinação de uma densidade em massa corrigida e uma vazão de mas-
sa em bruto corrigida.

30 24. Método, de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da condição de fluxo aparente compreen-
de a determinação de uma medição de fração de líquido aparente de uma

fração de volume do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases.

25. Método, de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da condição de fluxo aparente compreende a determinação de uma fração de vazão de gás aparente do gás dentro do
5 fluxo de múltiplas fases.

26. Método, de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da primeira vazão de massa do primeiro líquido compreende:

a determinação de uma densidade em massa corrigida, com base na densidade em massa aparente; e
10

a determinação de uma vazão de massa em bruto corrigida, com base na vazão de massa aparente.

27. Método, de acordo com a reivindicação 26, **caracterizado pelo fato de que** a determinação da densidade em massa corrigida e a determinação da vazão de massa em bruto compreendem a determinação de
15 uma condição de fluxo corrigida, com base na condição de fluxo aparente.

28. Método de aperfeiçoar uma saída de um medidor de fluxo **caracterizado pelo fato de que** compreende:

a determinação de uma densidade em massa aparente de um
20 fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo (215), o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás;

a determinação de uma vazão de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases;

a determinação de uma condição de fluxo aparente do fluxo de
25 múltiplas fases; e

a correção da densidade em massa aparente ou da vazão de massa aparente, com base na densidade em massa aparente, na vazão de massa aparente, e na condição de fluxo aparente.

29. Método de aperfeiçoar uma saída de uma sonda de fração de líquido (230) **caracterizado pelo fato de que** compreende:

a determinação de uma densidade em massa aparente de um
30 fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo (215), o fluxo de múltiplas

plas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás;

a determinação de uma vazão de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases;

5 a determinação de uma fração de líquido aparente do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases; e

a correção da fração de líquido aparente para se obter uma fração de líquido corrigida, com base na densidade em massa aparente, na vazão de massa aparente e na fração de líquido aparente.

10 30. Método, de acordo com a reivindicação 29, **caracterizado pelo fato de que** compreende a determinação de uma fração de vazão de gás do gás dentro do fluxo de múltiplas fases com base na densidade em massa aparente, na vazão de massa aparente e na fração de líquido corrigida.

15 31. Método de se obter uma medição da fração de vazão de gás **caracterizado pelo fato de que** compreende:

a determinação de uma densidade em massa aparente de um fluxo de múltiplas fases através de um tubo de fluxo (215), o fluxo de múltiplas fases incluindo um primeiro líquido, um segundo líquido e um gás;

20 a determinação de uma vazão de massa em bruto aparente do fluxo de múltiplas fases;

a determinação de uma fração de vazão de gás aparente do gás dentro do fluxo de múltiplas fases; e

25 a correção da fração de vazão de gás aparente para se obter uma fração de vazão de gás corrigida, com base na densidade em massa aparente, na vazão de massa aparente e na fração de vazão de gás aparente.

30 32. Método, de acordo com a reivindicação 31, **caracterizado pelo fato de que** compreende a determinação de uma fração de líquido do primeiro líquido dentro do fluxo de múltiplas fases com base na densidade em massa aparente, na vazão de massa aparente e na fração de vazão de gás corrigida.

33. Sistema, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

um conduto apresentando um fluxo de fluido através do mesmo, o fluxo de fluido incluindo pelo menos um primeiro componente líquido, um segundo componente líquido, e um componente de gás;

5 um tubo de fluxo (215) vibrável em série com o conduto e apresentando o fluxo de fluido através do mesmo;

um primeiro sensor operável para determinar uma primeira propriedade aparente do fluxo de fluido através do conduto;

um segundo sensor conectado ao tubo de fluxo (215) e operável para detectar a informação a cerca de um movimento do tubo de fluxo (215);

10 um acionador conectado ao tubo de fluxo (215) e operável para conferir energia ao tubo de fluxo (215);

um sistema de controle e de medição operável para medir uma segunda propriedade aparente e uma terceira propriedade aparente do fluxo de fluido; e

15 um sistema de correções operável pra determinar uma primeira propriedade corrigida, uma segunda propriedade corrigia e uma teceria propriedade corrigida, com base na primeira propriedade aparente, na segunda propriedade aparente e na terceira propriedade aparente.

34. Sistema **caracterizado pelo fato de que** compreende:

20 um controlador (104) que é operável para determinar uma primeira propriedade aparente de um fluxo de fluido no qual um primeiro líquido, um segundo líquido, e um gás são co-misturados;

um medidor que é operável para medir uma segunda propriedade aparente do fluxo de fluido; e

25 um módulo de correções (240, 250, 260) que é operável para introduzir a primeira propriedade aparente e emitir uma primeira propriedade corrigida;

30 onde o medidor é operável para introduzir a primeira propriedade corrigida e a segunda propriedade aparente e emitir uma segunda propriedade corrigida.

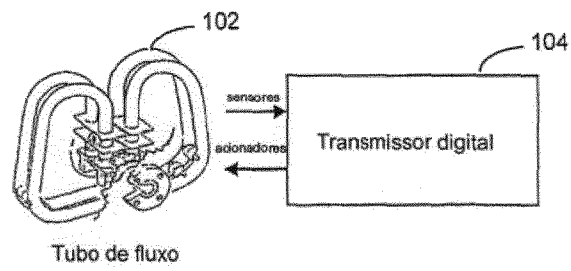


FIG. 1A

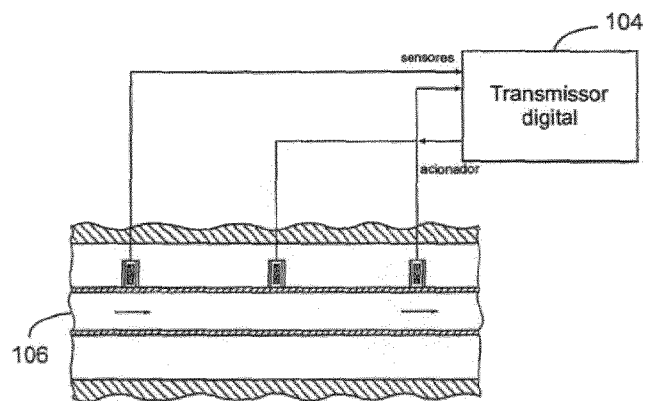


FIG. 1B

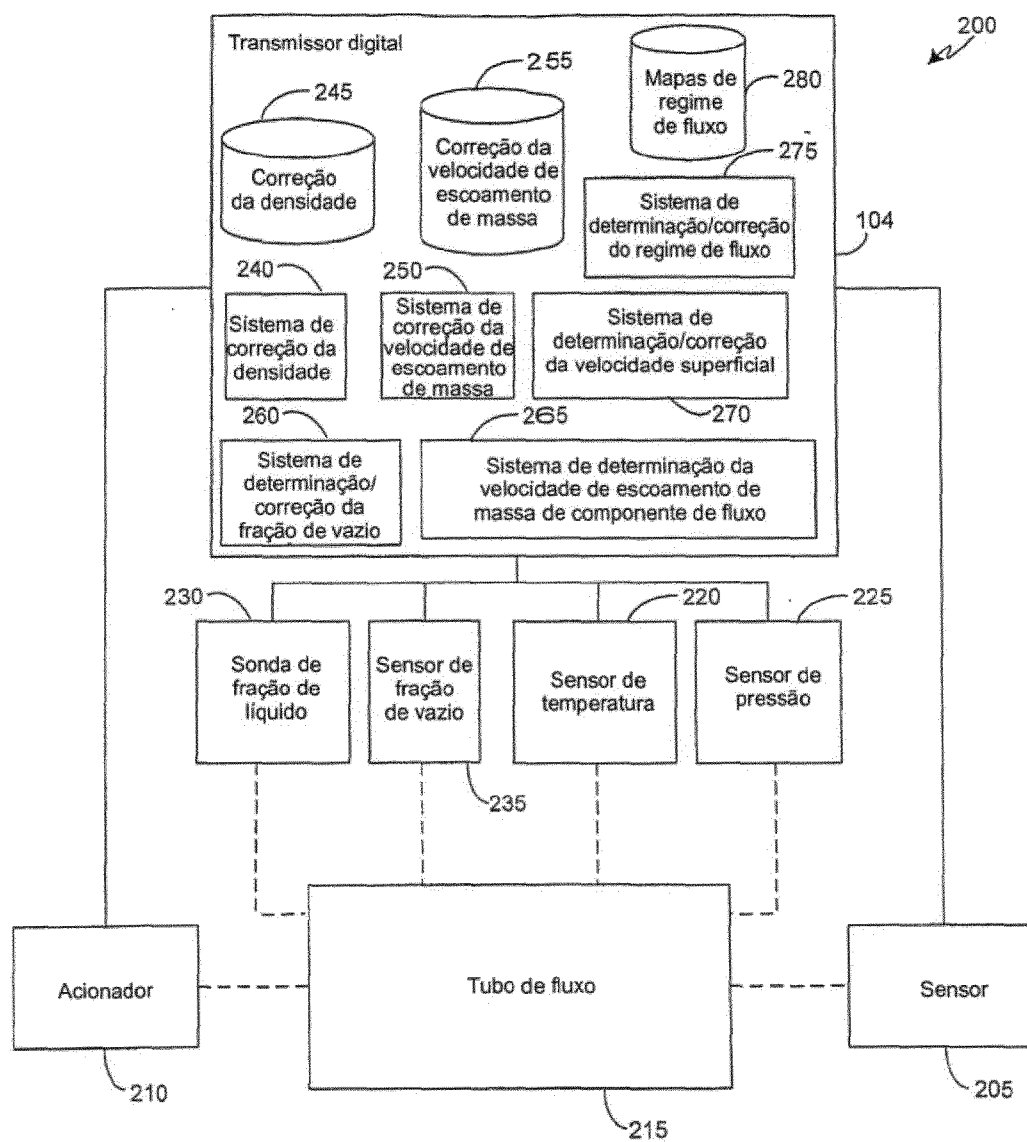


FIG. 2

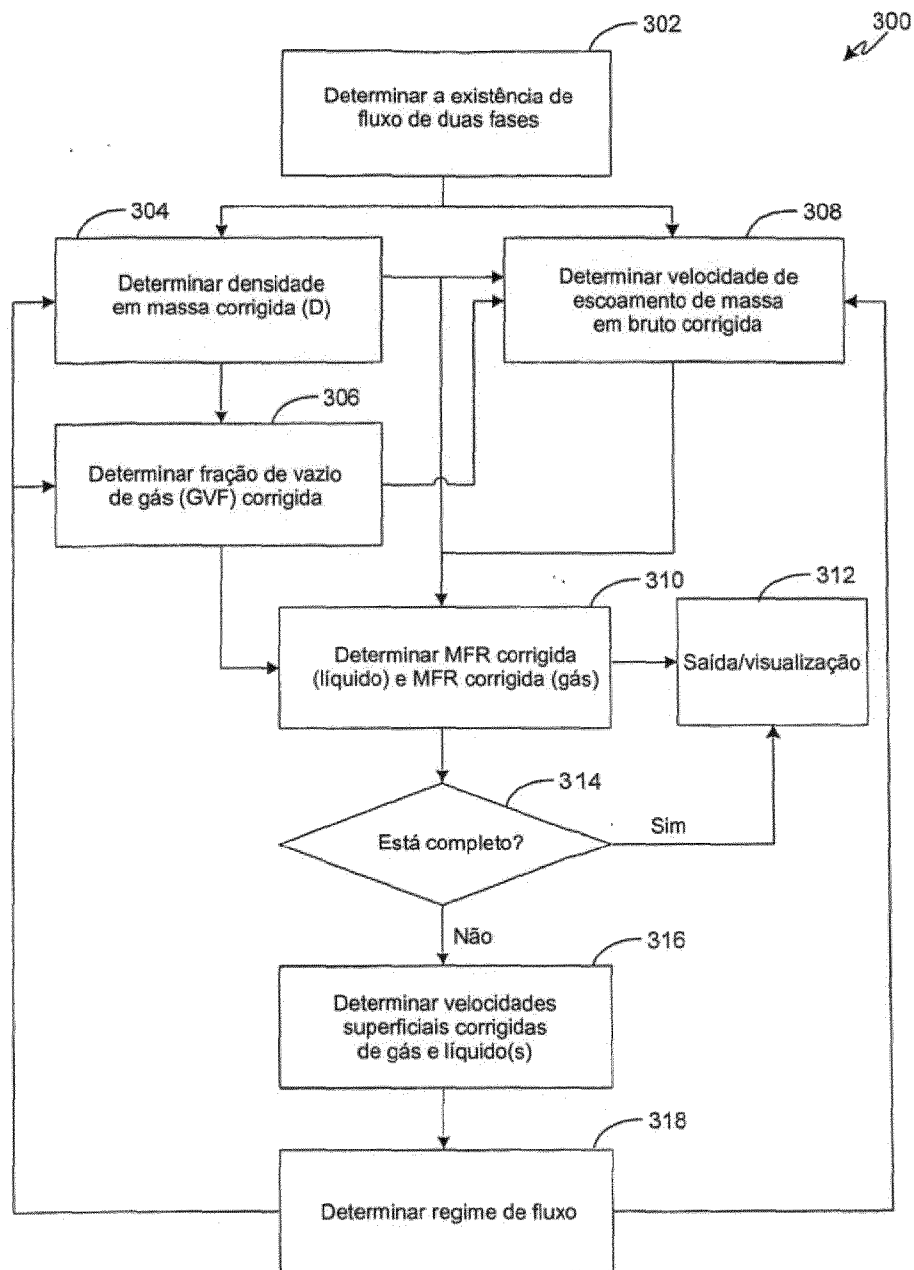


FIG. 3

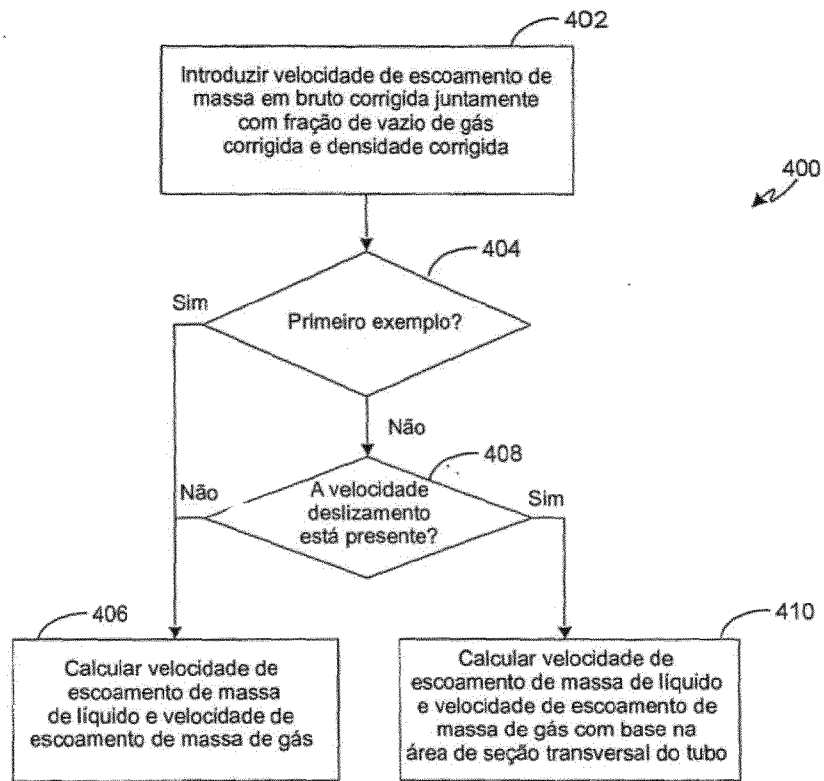


FIG. 4

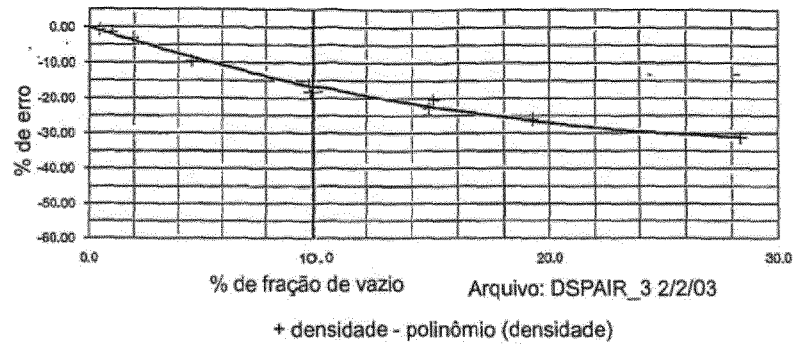


FIG. 5A

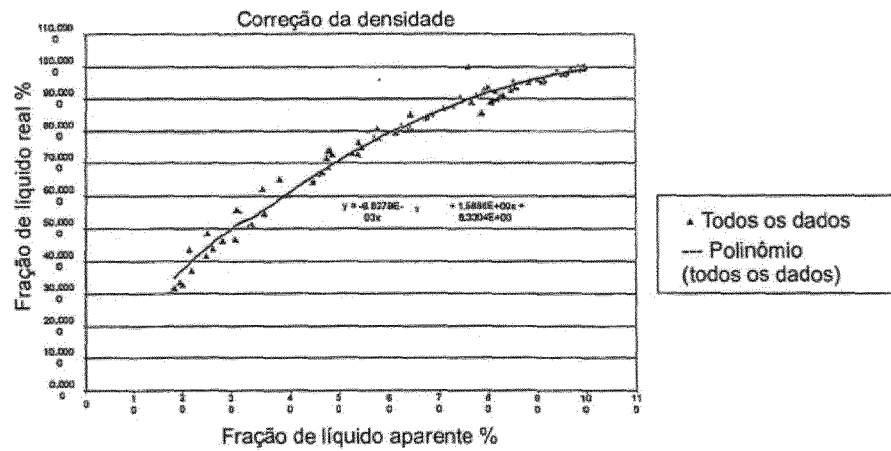


FIG. 5B

Oxford, água, vertical, 1/2"
Faixa de fluxo: 0,17 kg/s - 0,70 kg/s

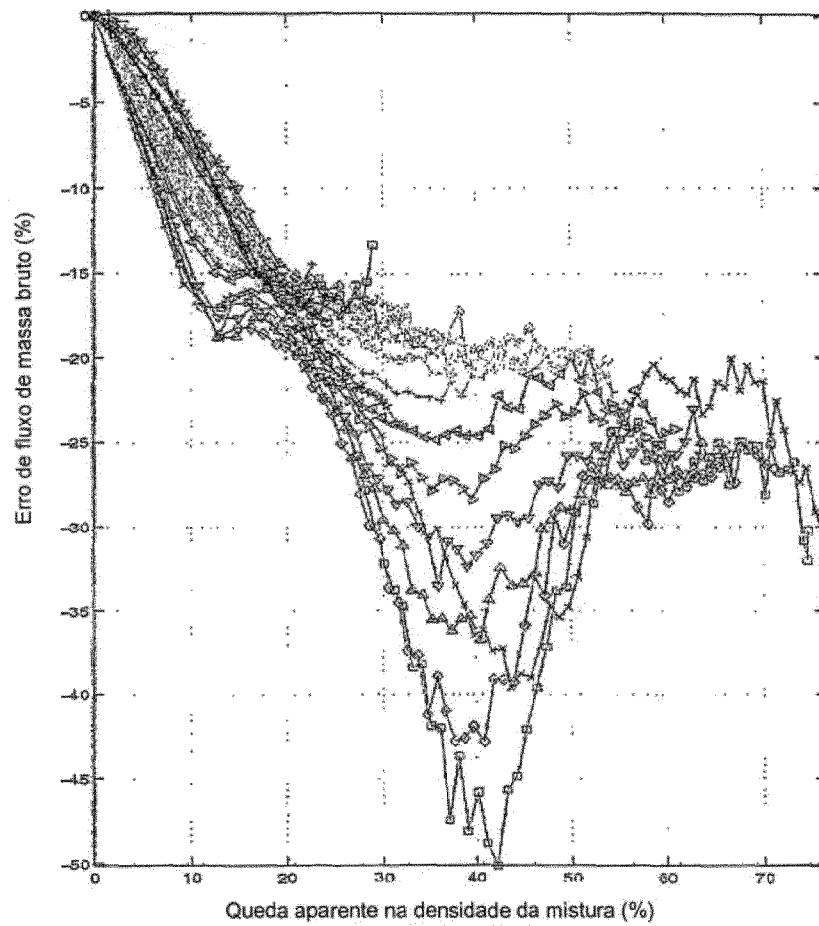


FIG. 6

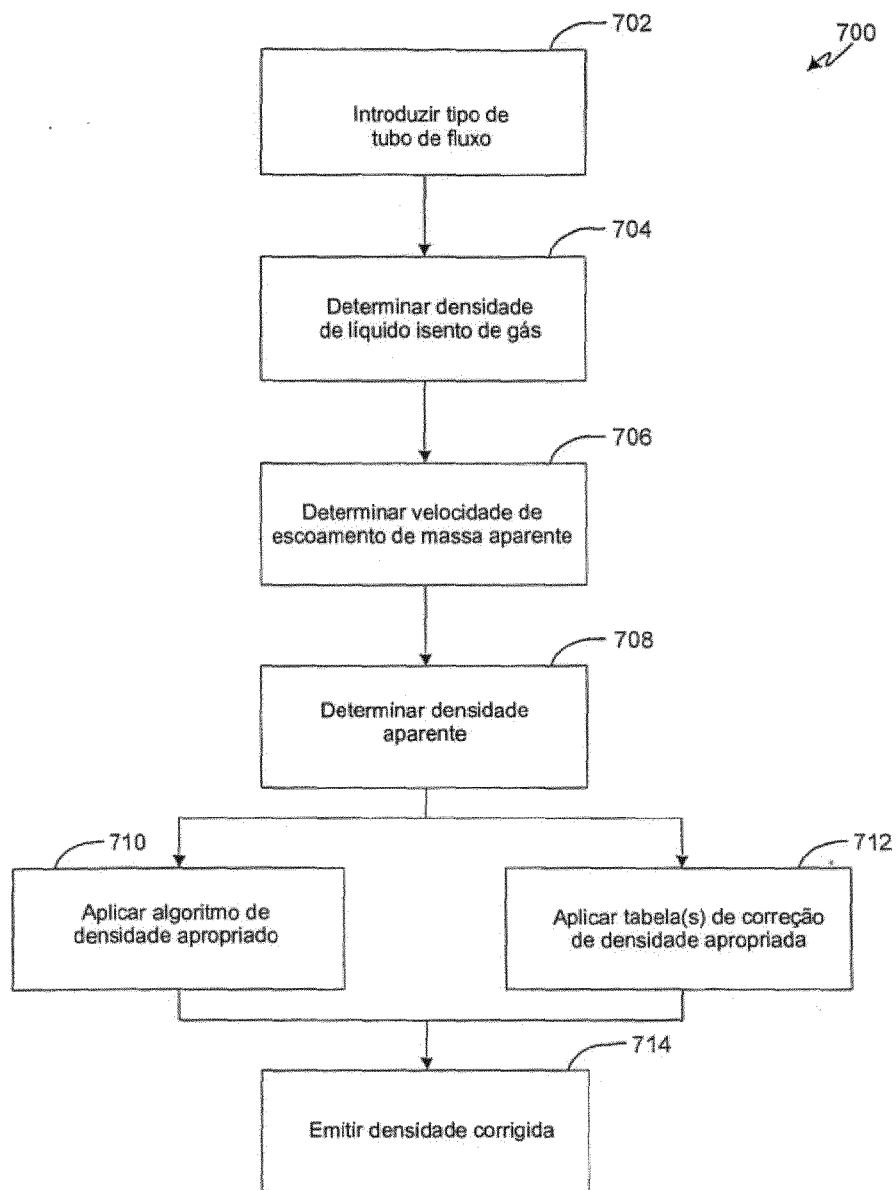


FIG. 7

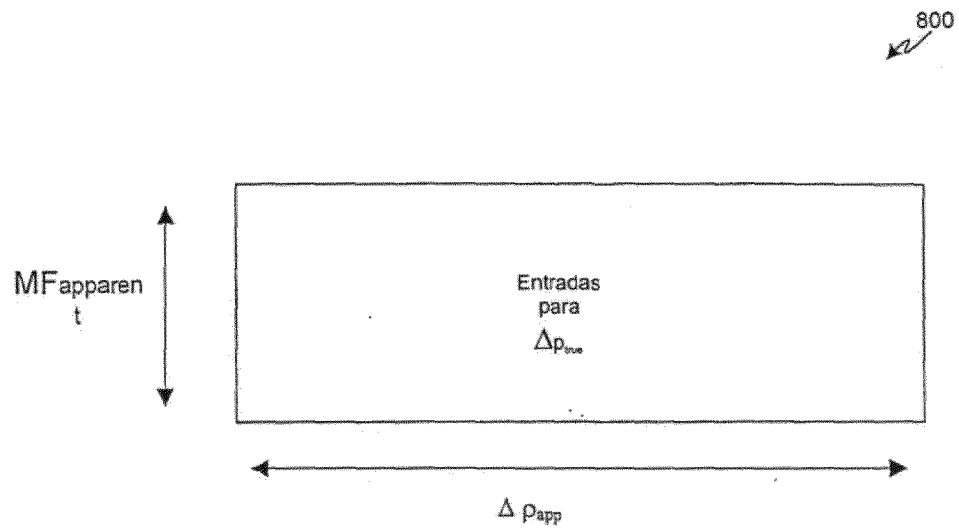


FIG. 8

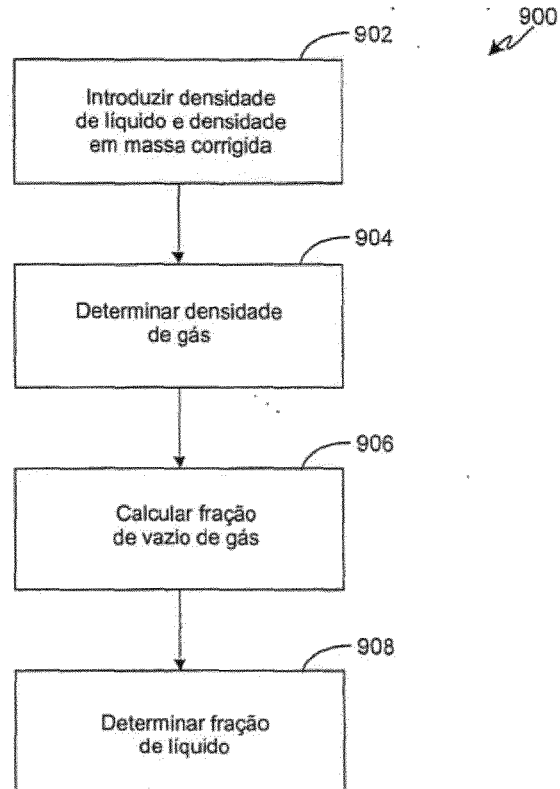


FIG. 9

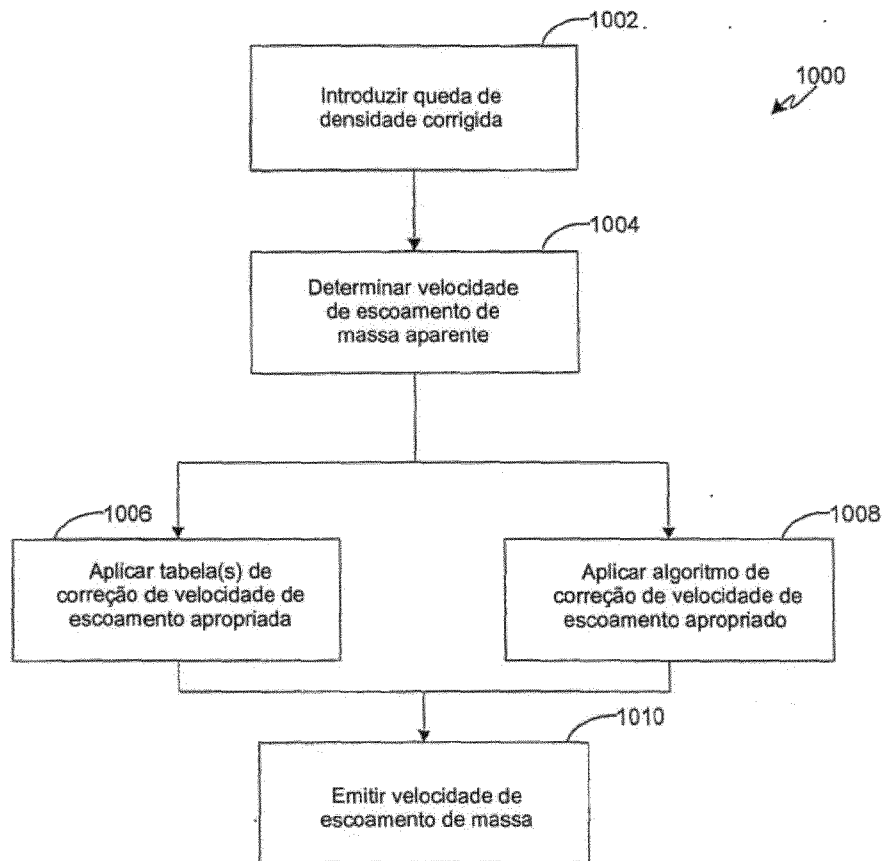


FIG. 10

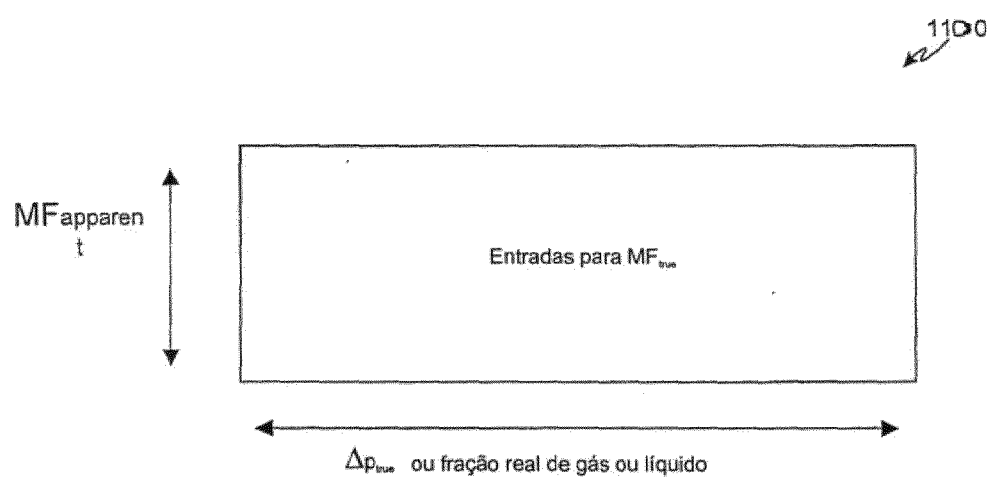


FIG. 11

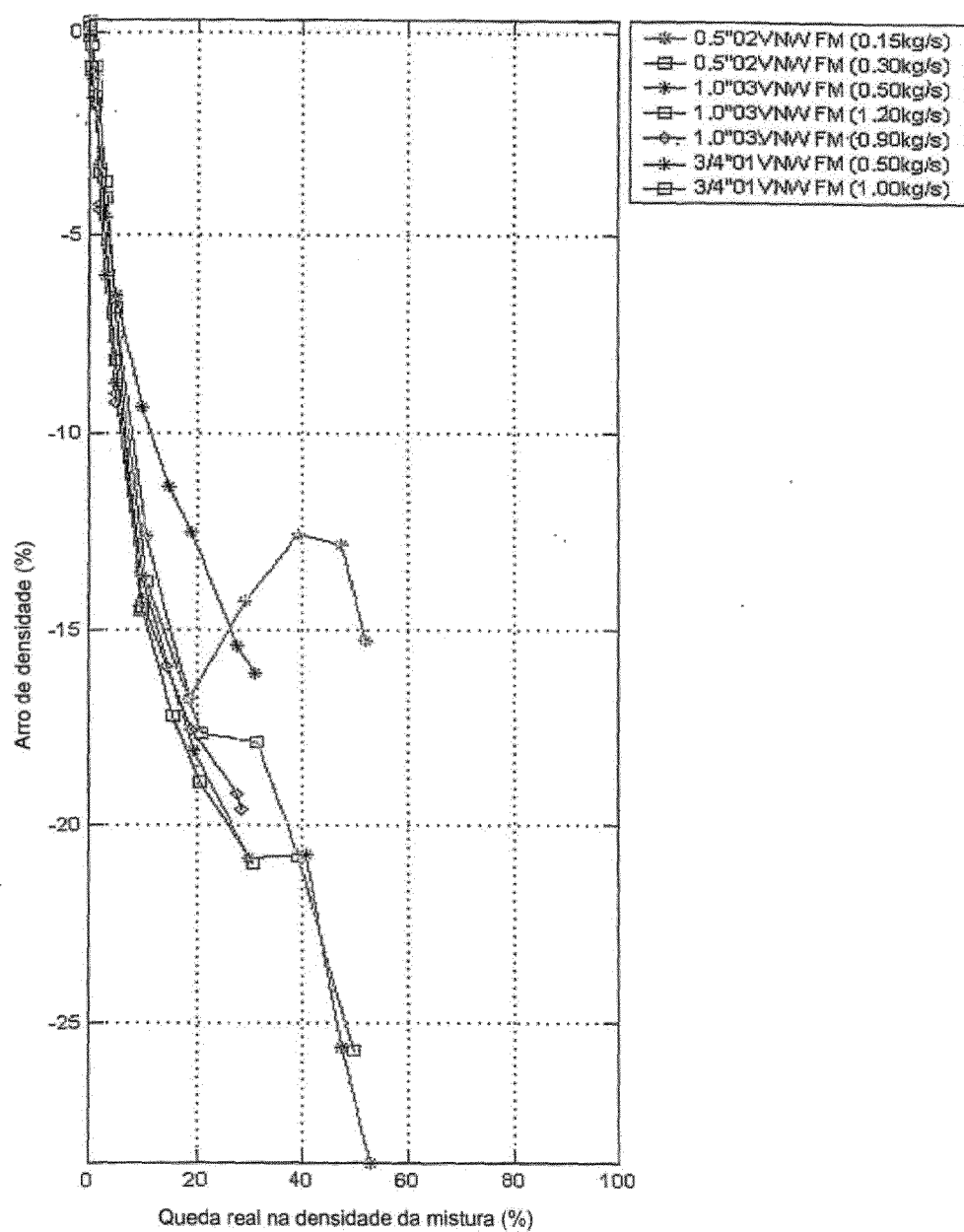


FIG. 12

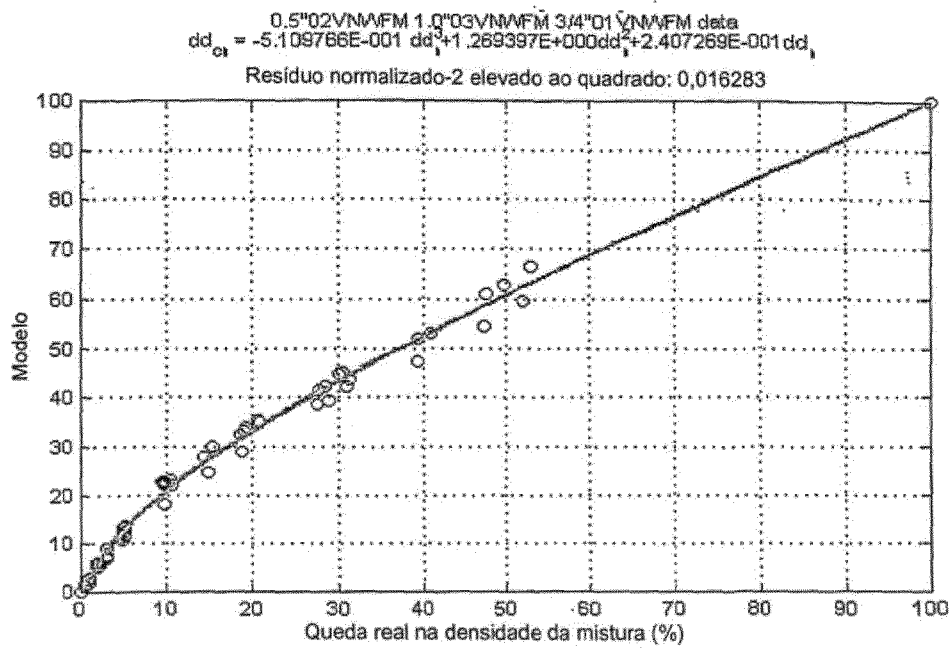


FIG. 13A

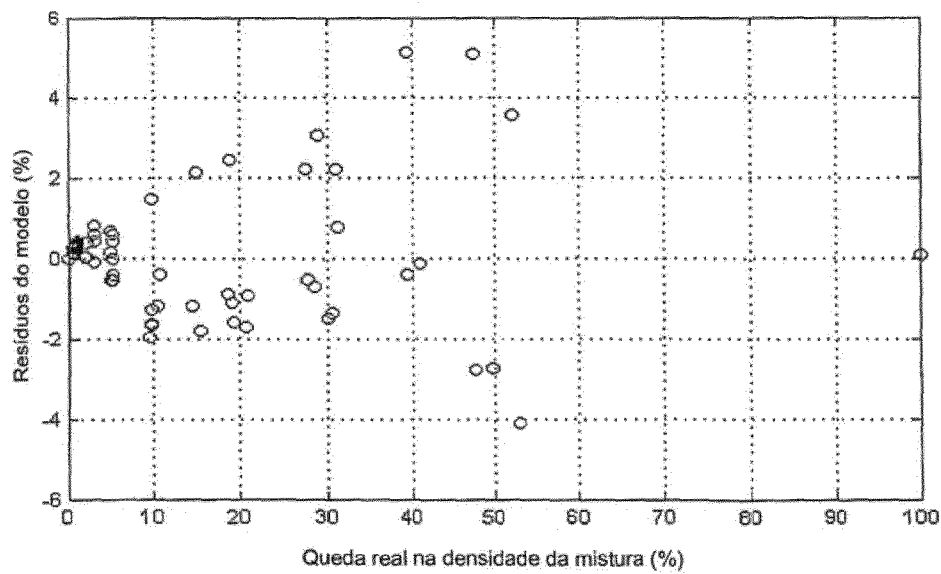


FIG. 13B

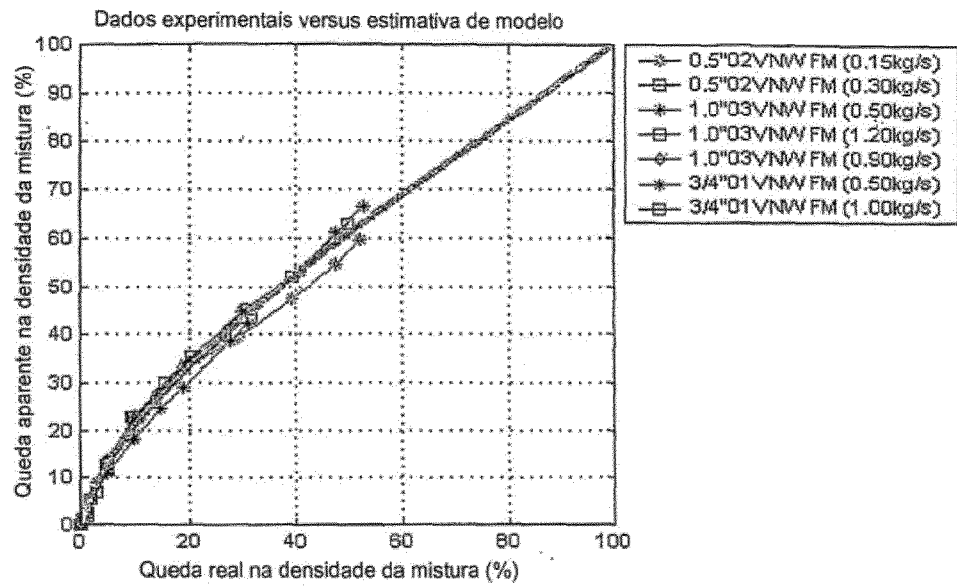


FIG. 14A

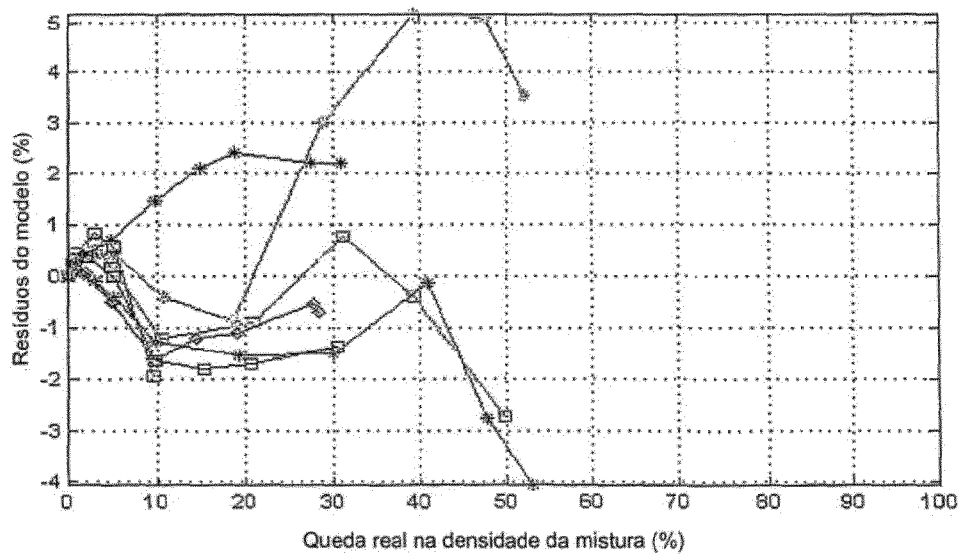


FIG. 14B

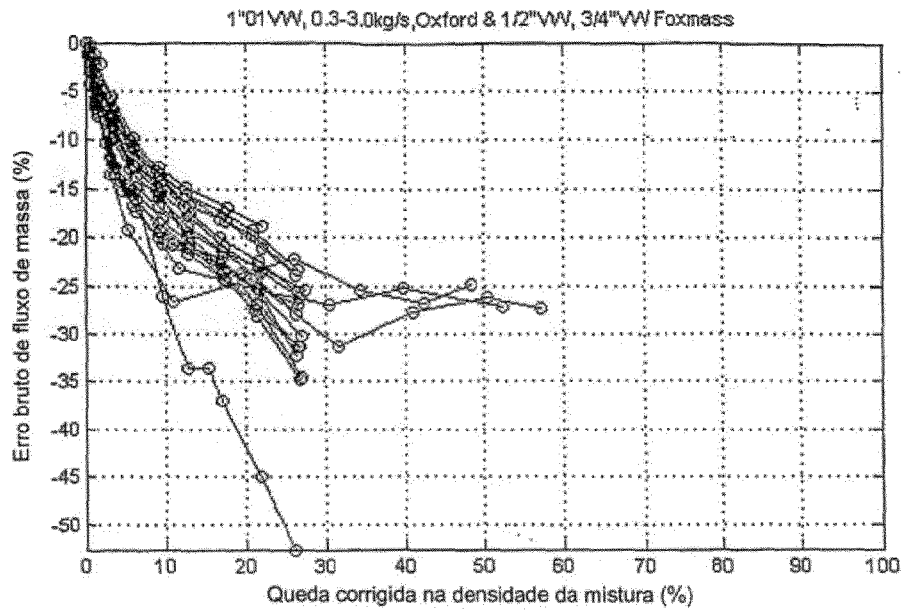


FIG. 15A

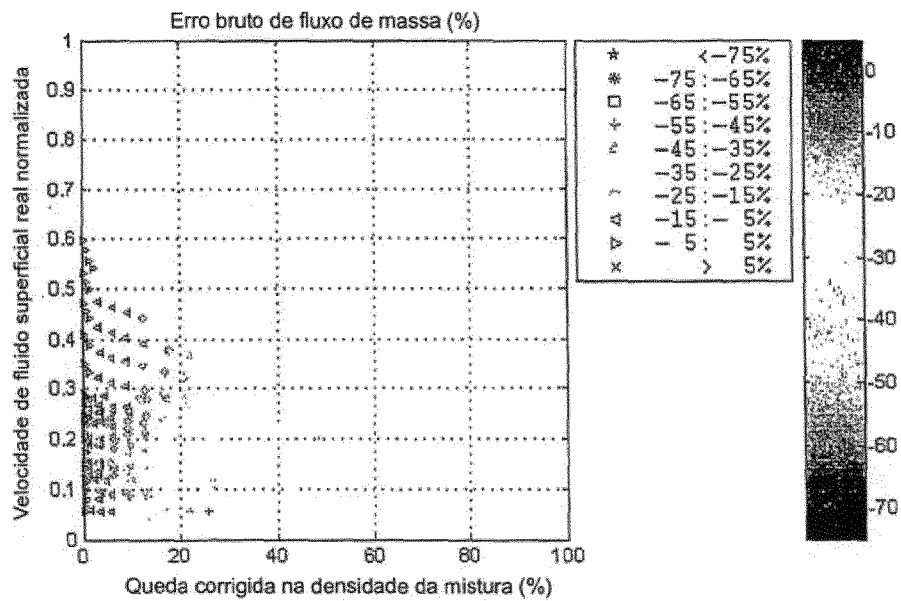


FIG. 15B

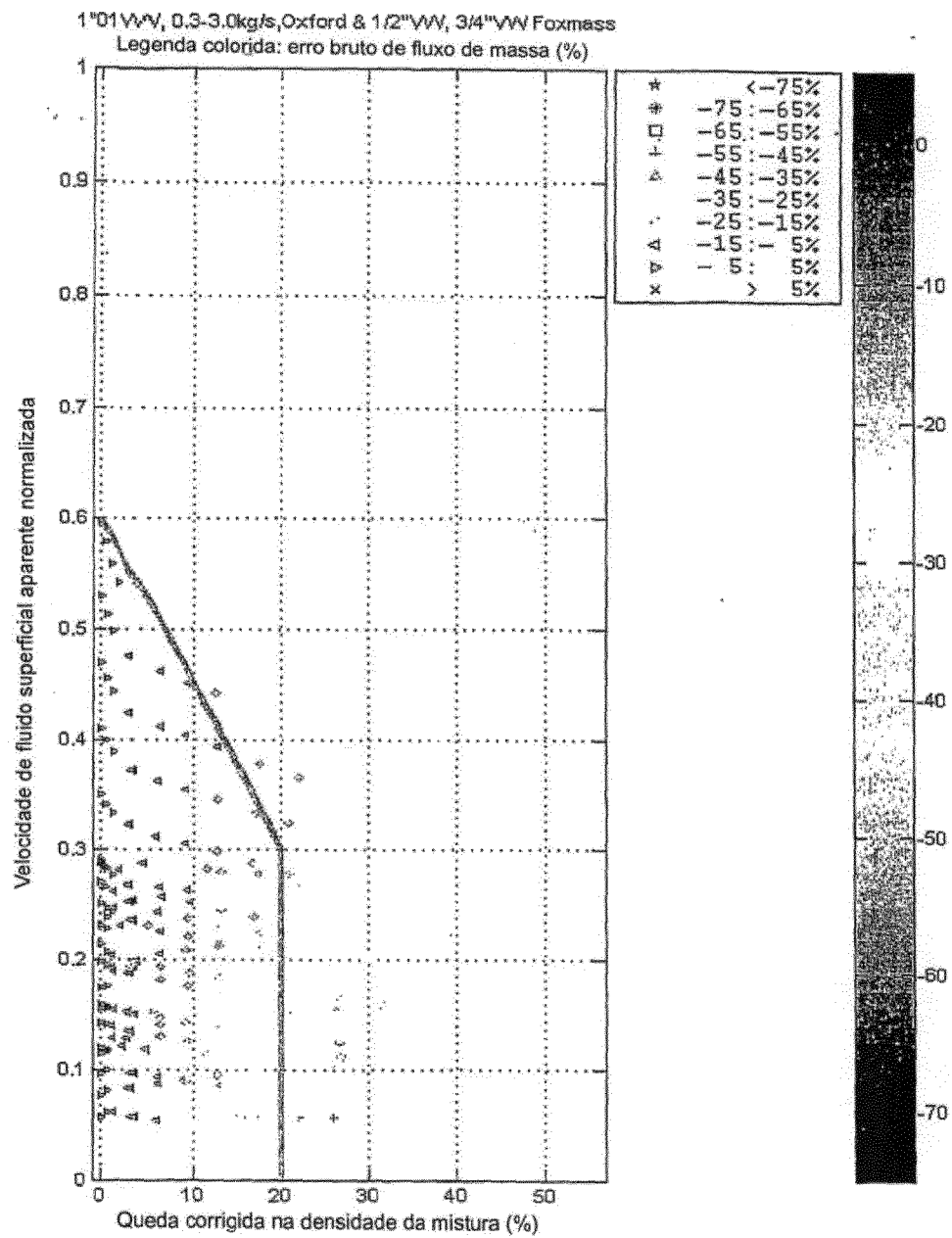


FIG. 16

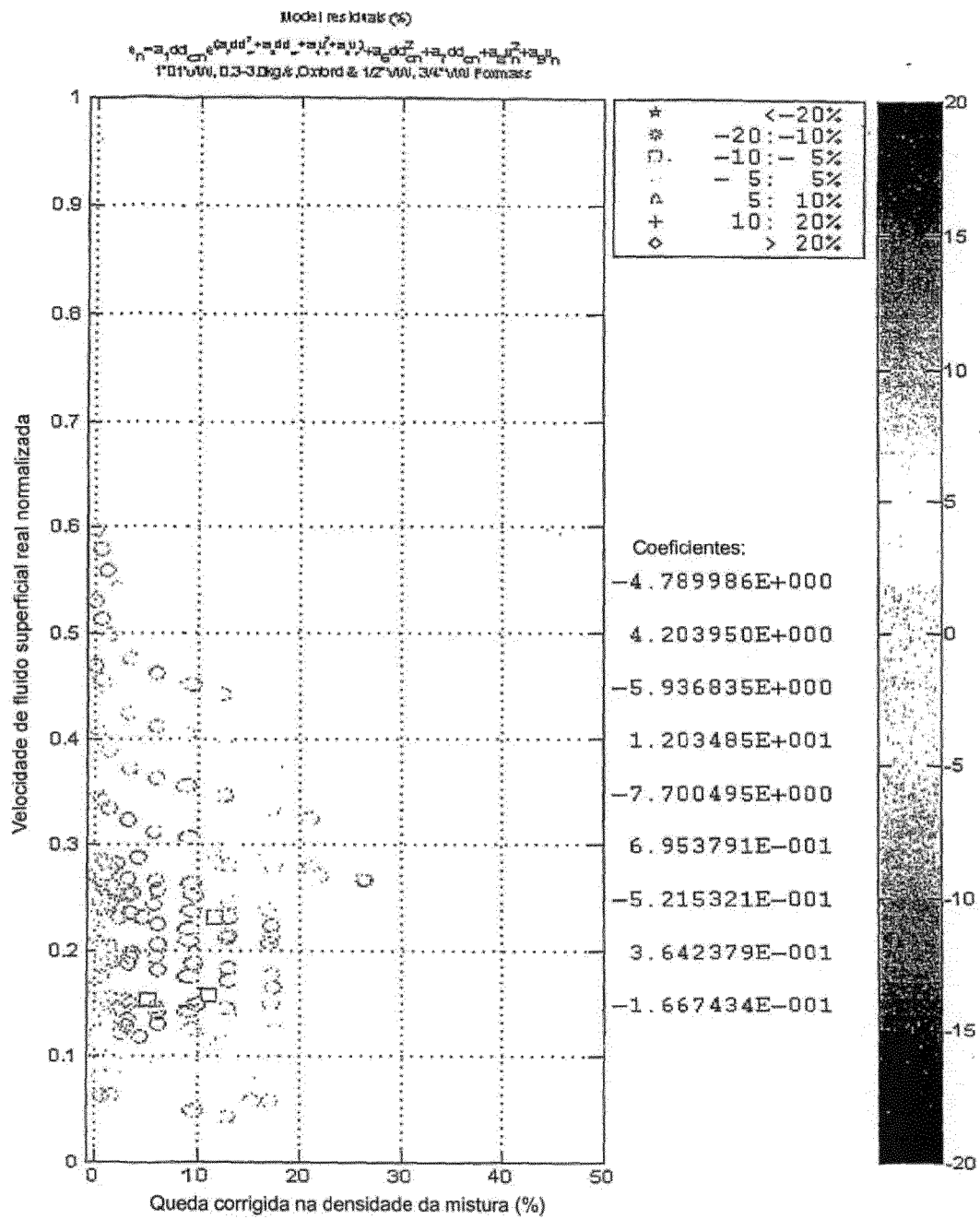


FIG. 17

FIG. 18A

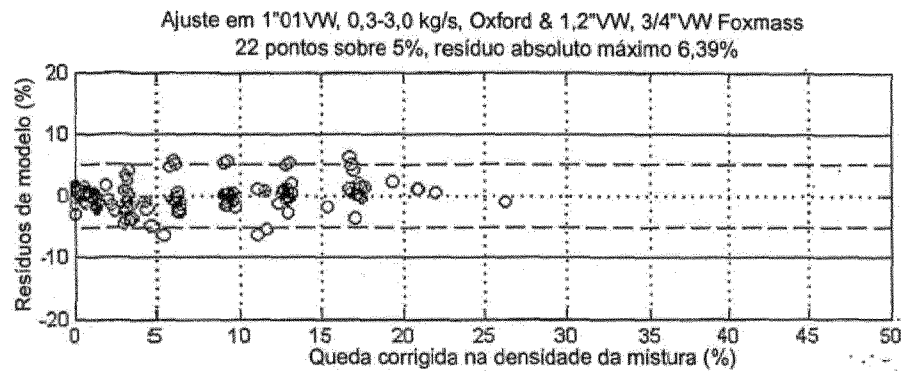


FIG. 18B

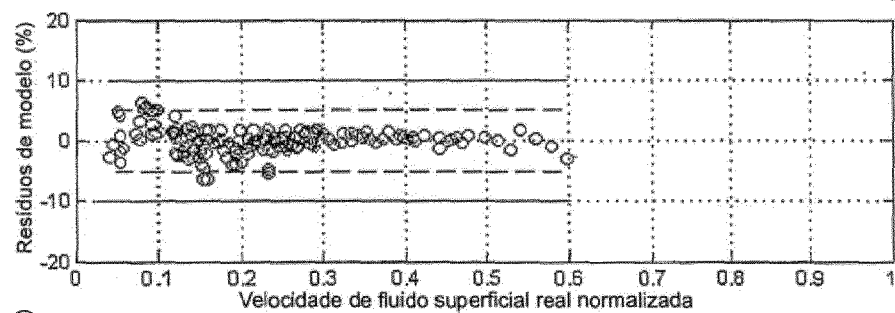


FIG. 18C

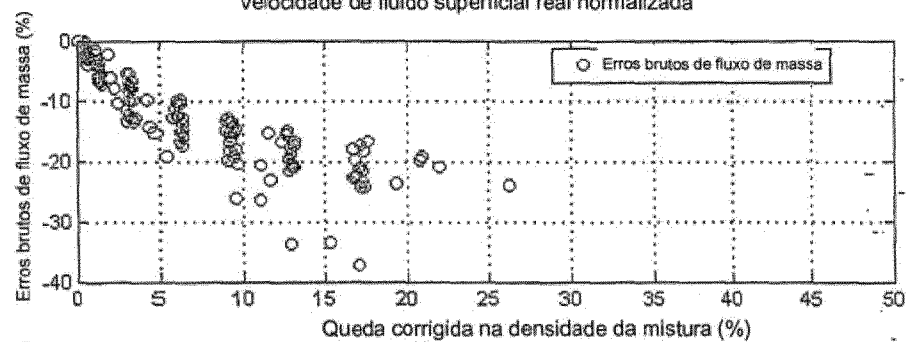


FIG. 18D

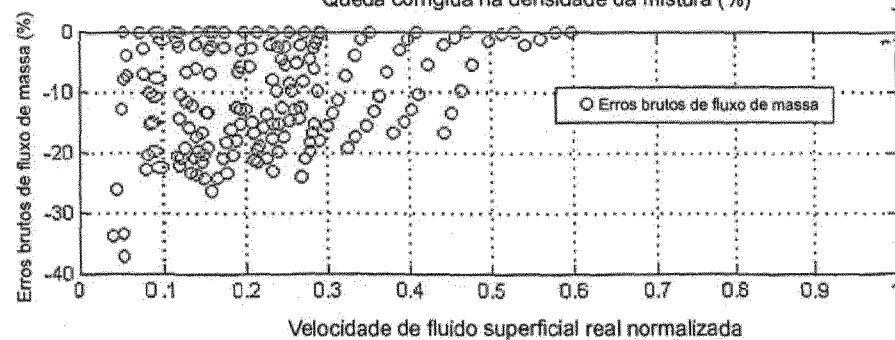


FIG. 19A

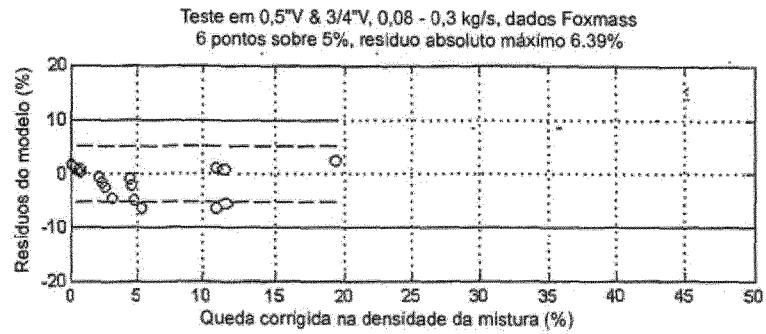


FIG. 19B

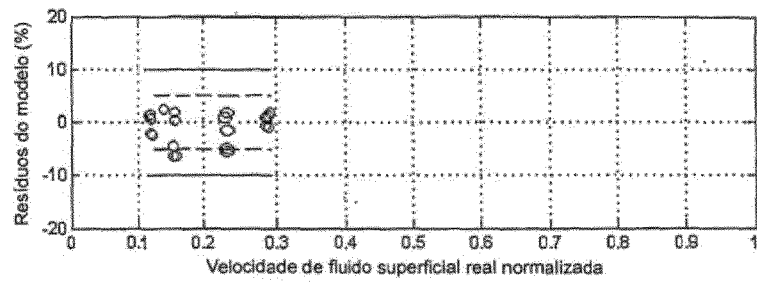


FIG. 19C

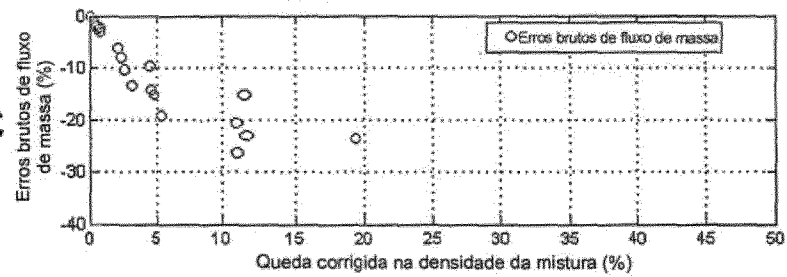
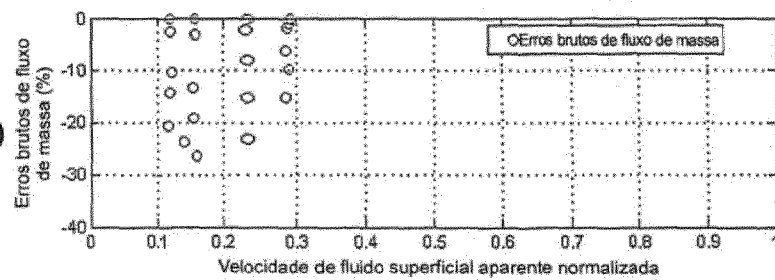


FIG. 19D



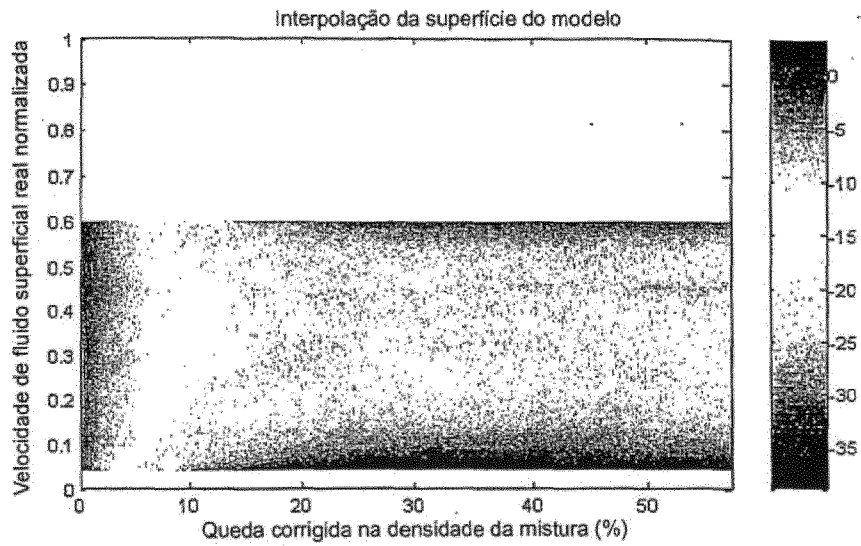


FIG. 20A

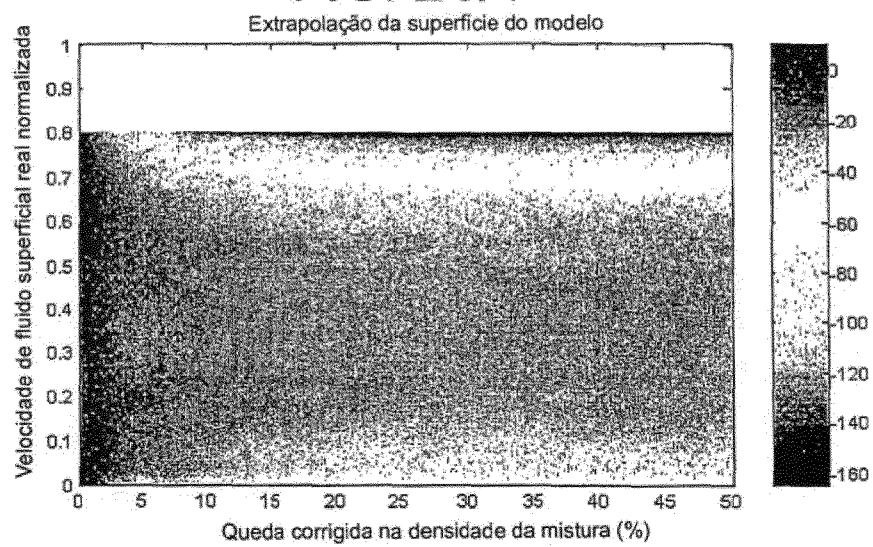


FIG. 20B

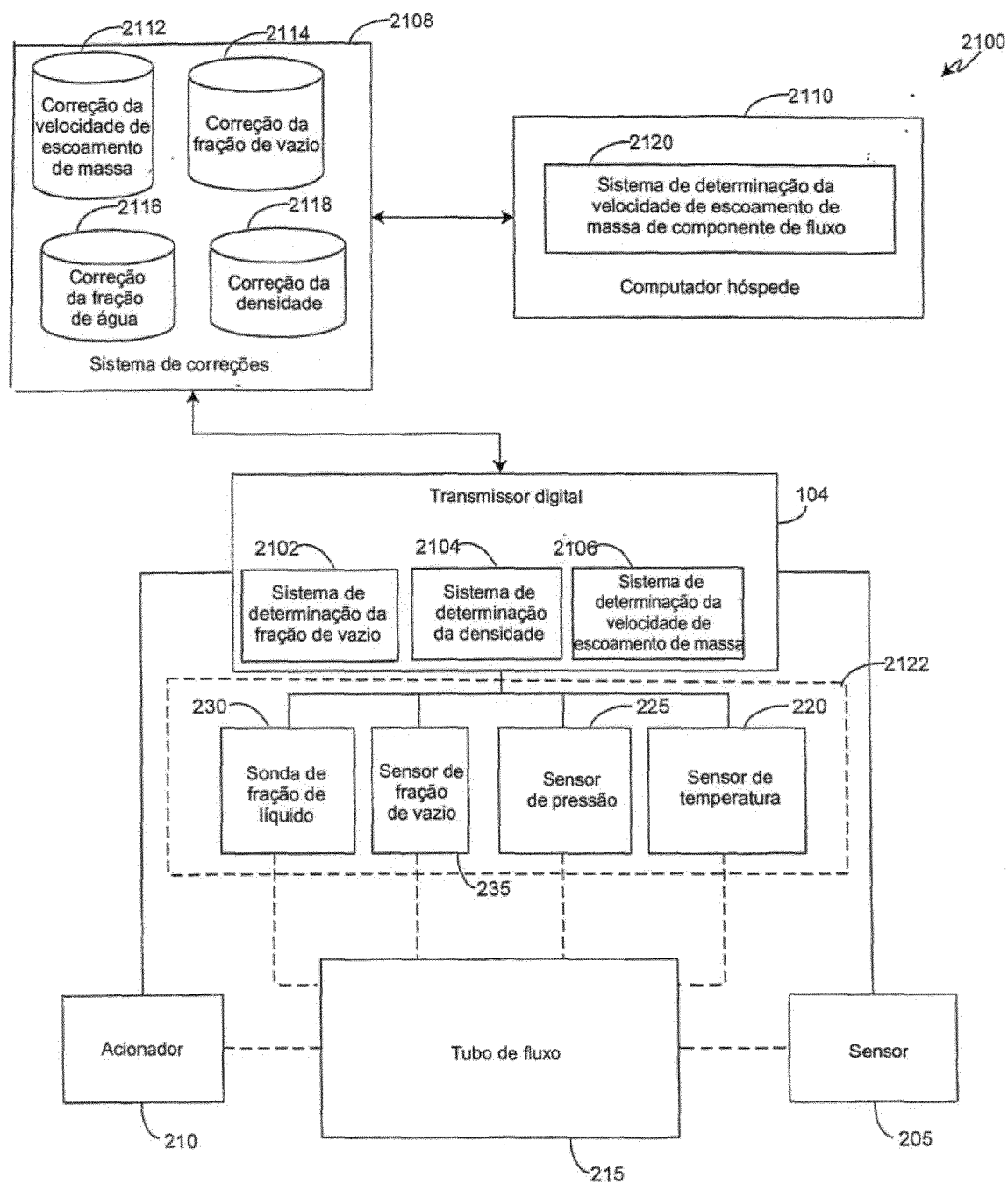


FIG. 21

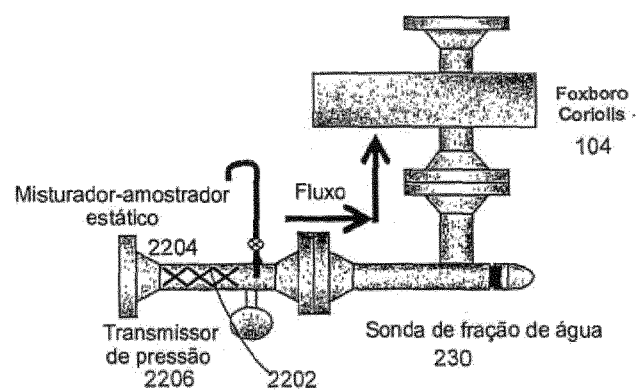


FIG. 22

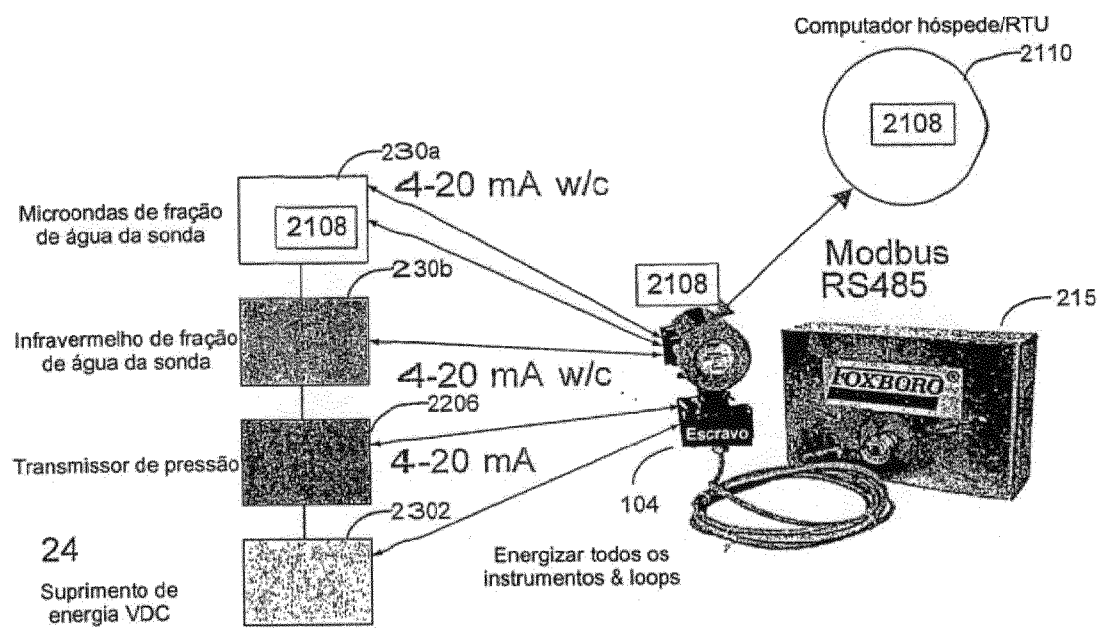


FIG. 23

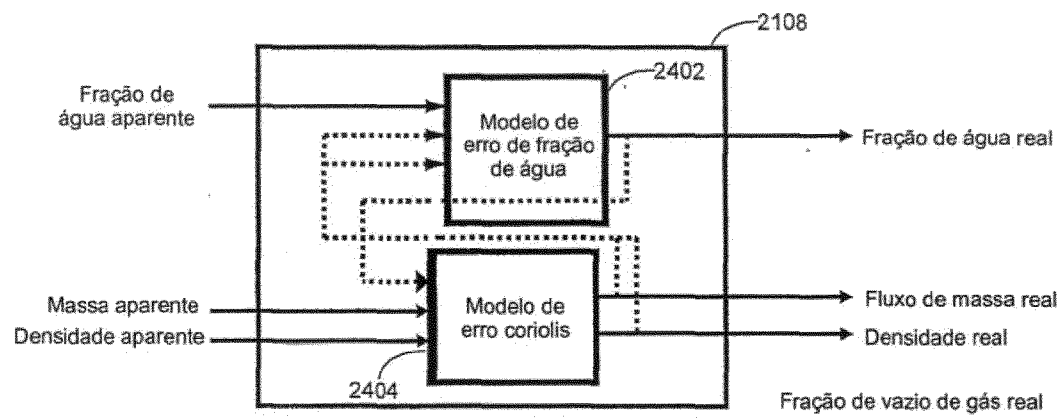


FIG. 24

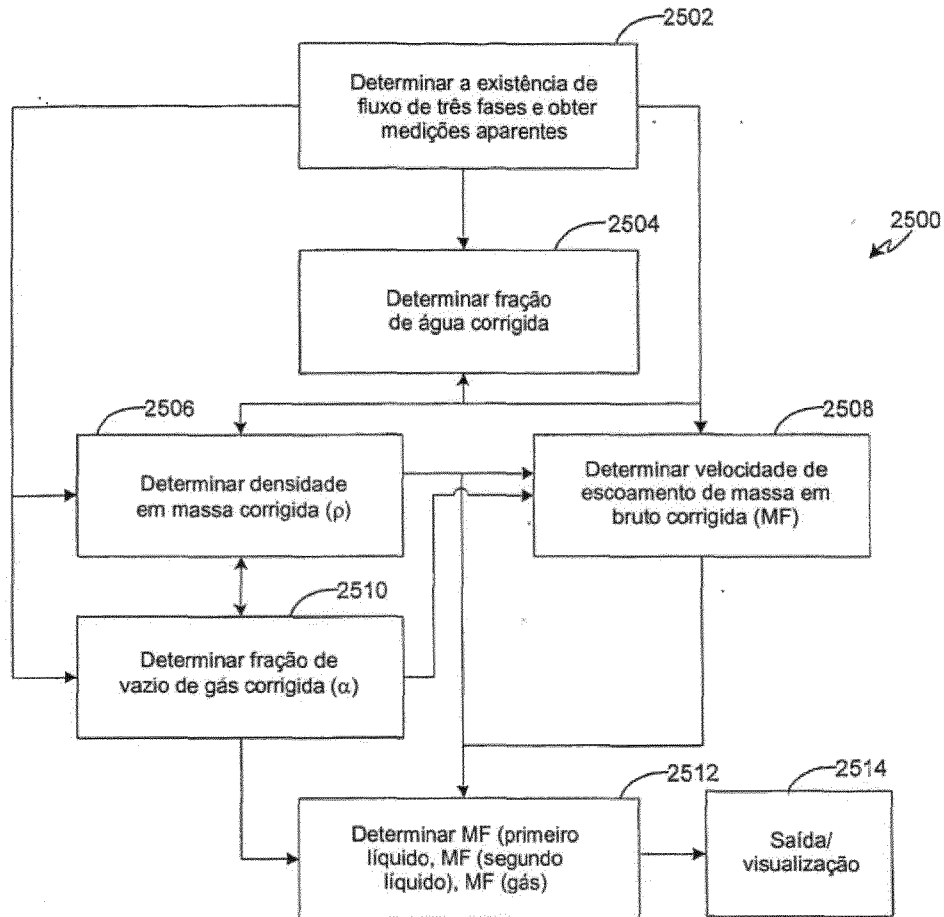


FIG. 25

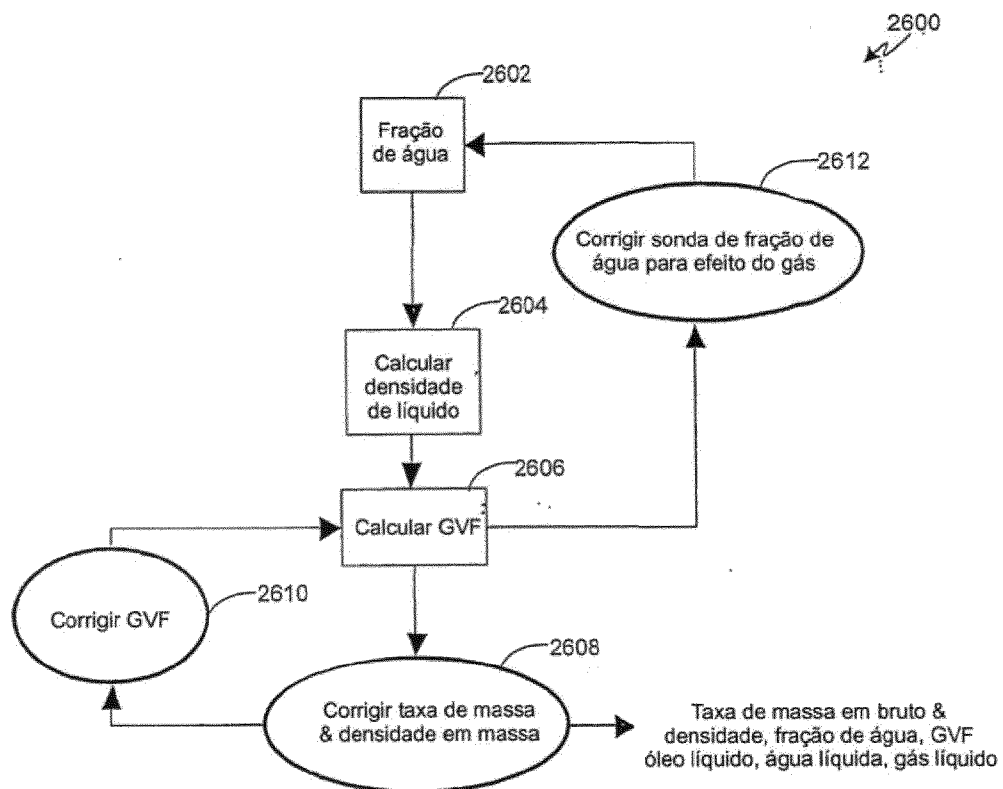


FIG. 26

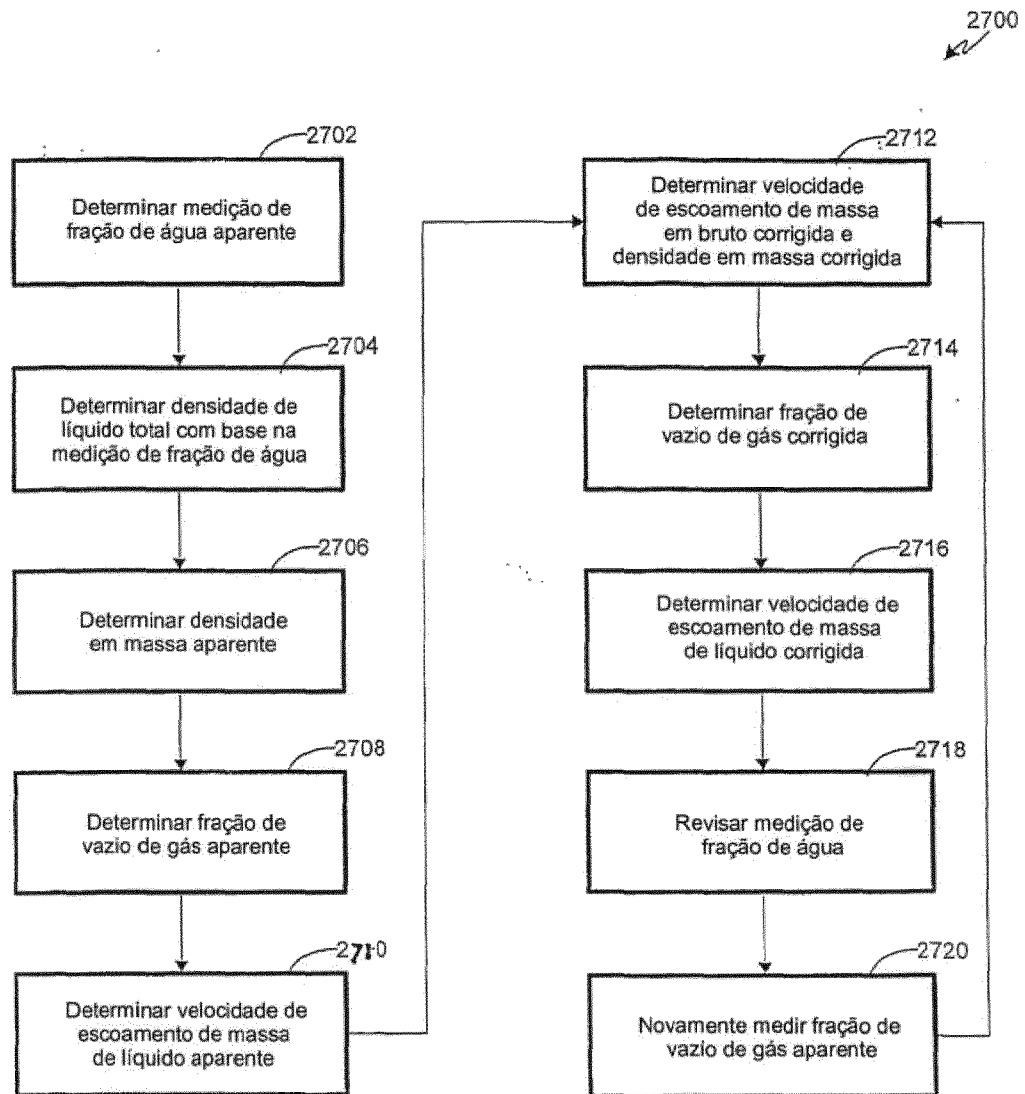


FIG. 27

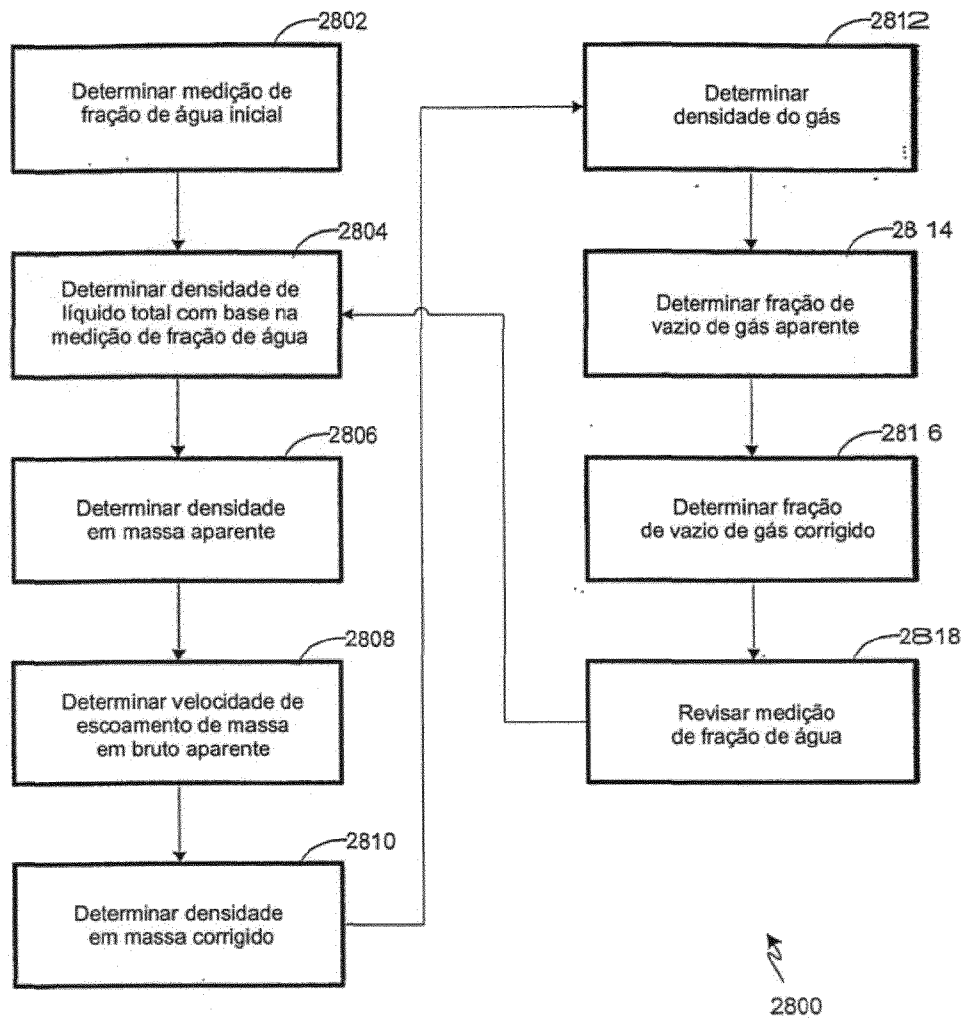


FIG. 28

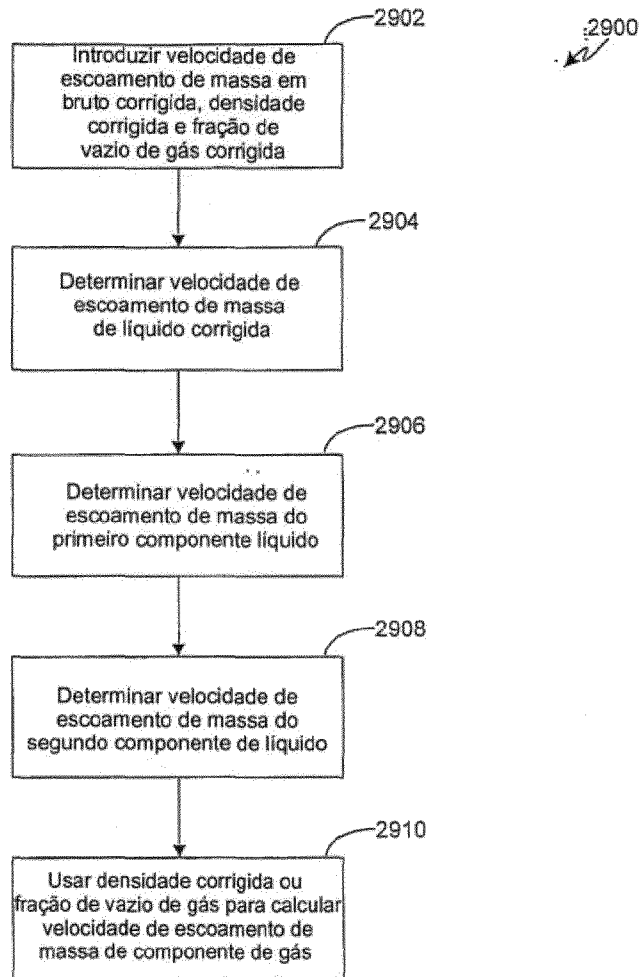


FIG. 29

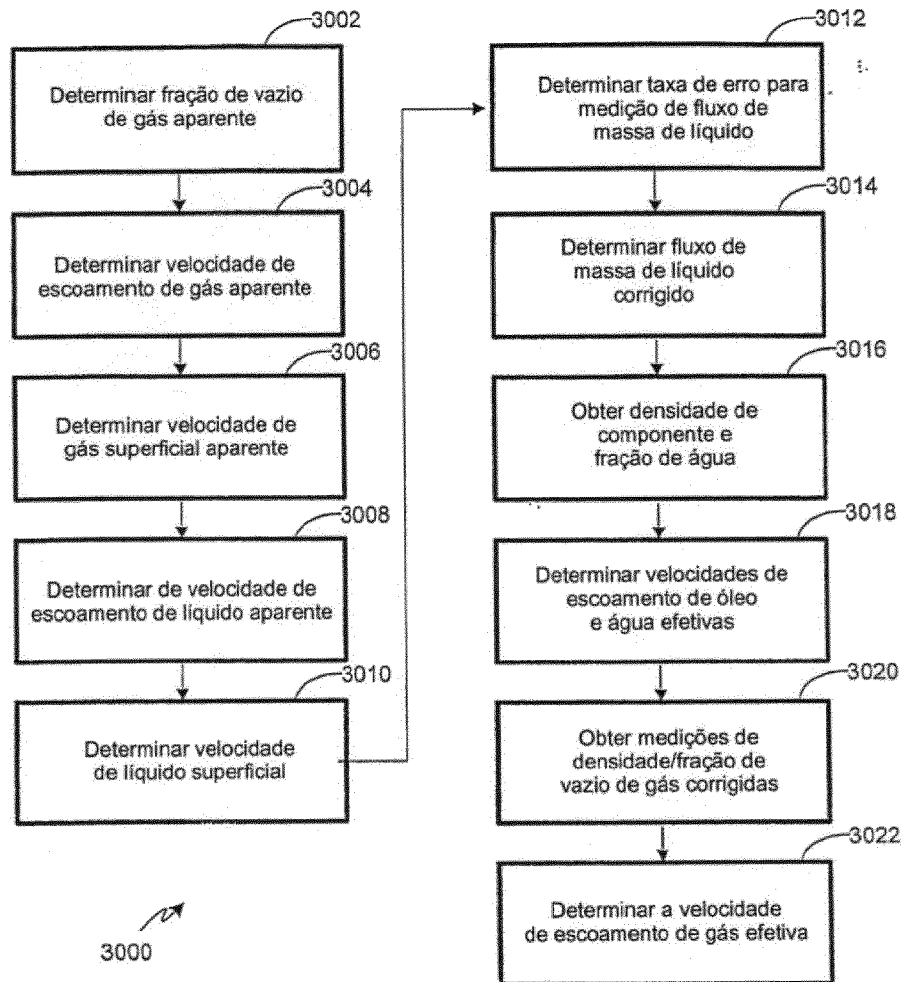


FIG. 30

FIG. 31A

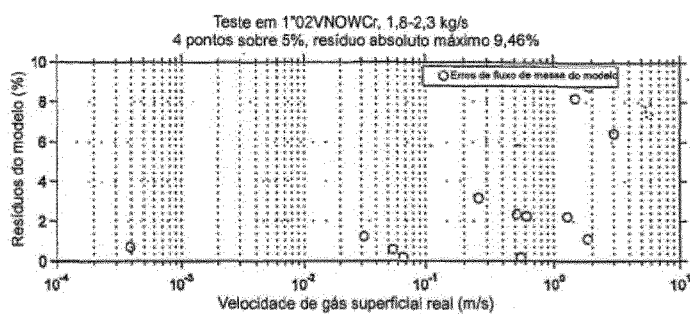


FIG. 31B

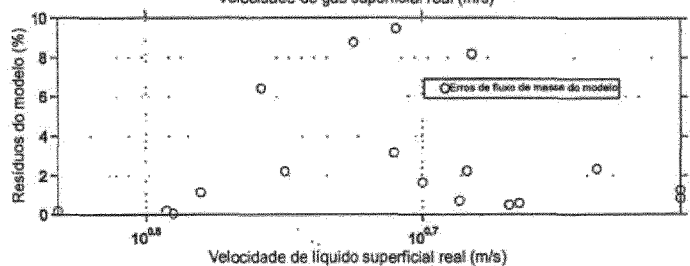


FIG. 31C

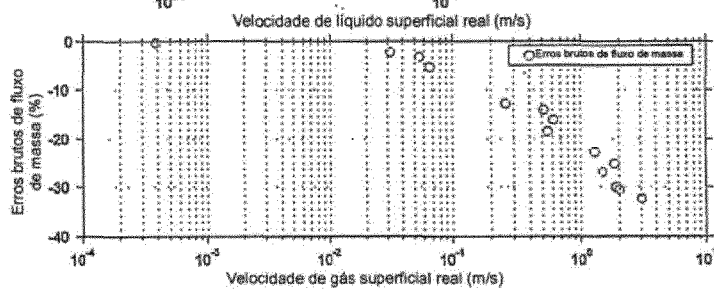
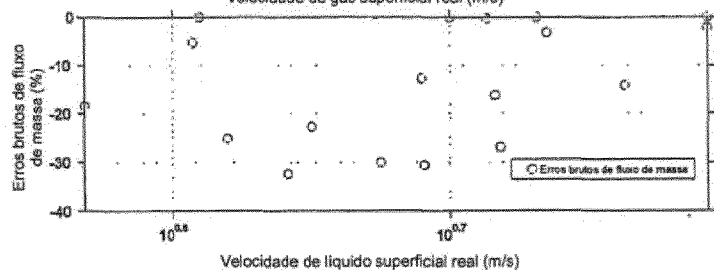


FIG. 31D



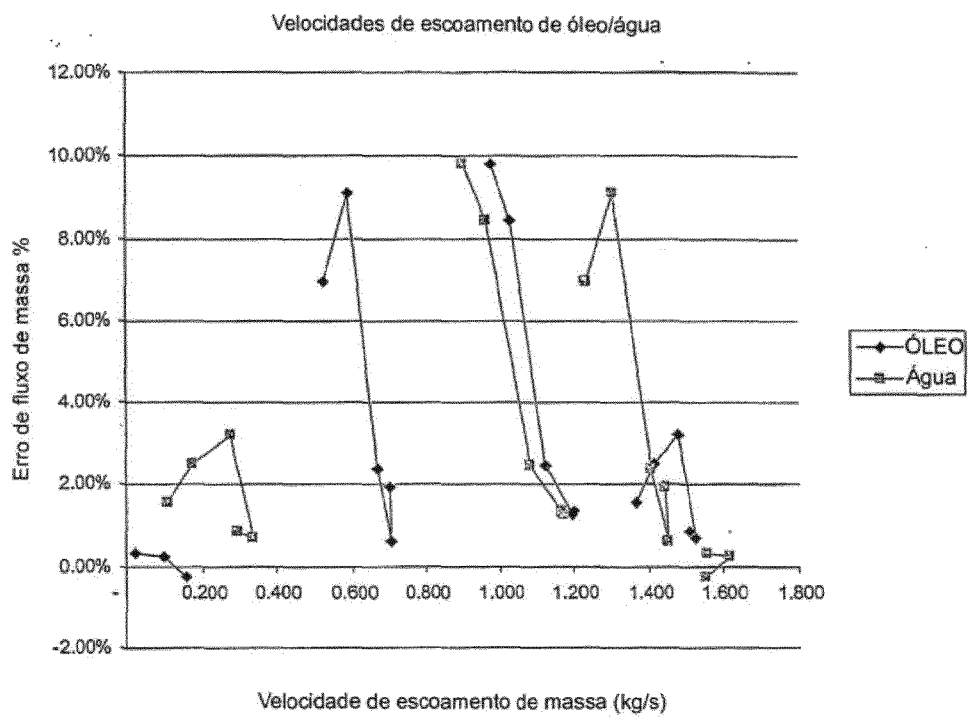


FIG. 32

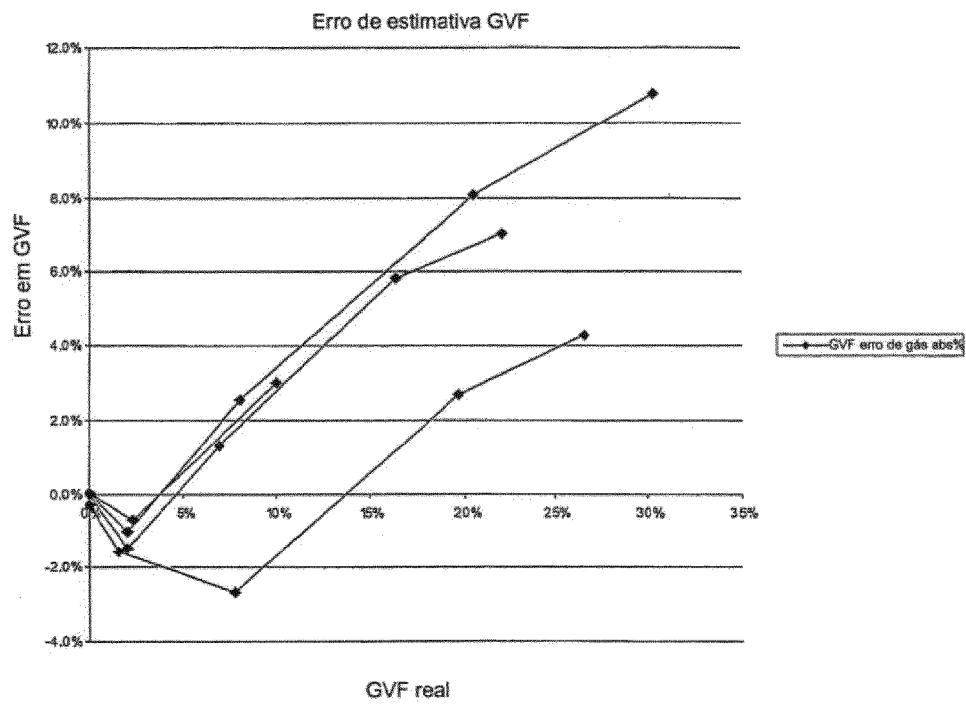


FIG. 33

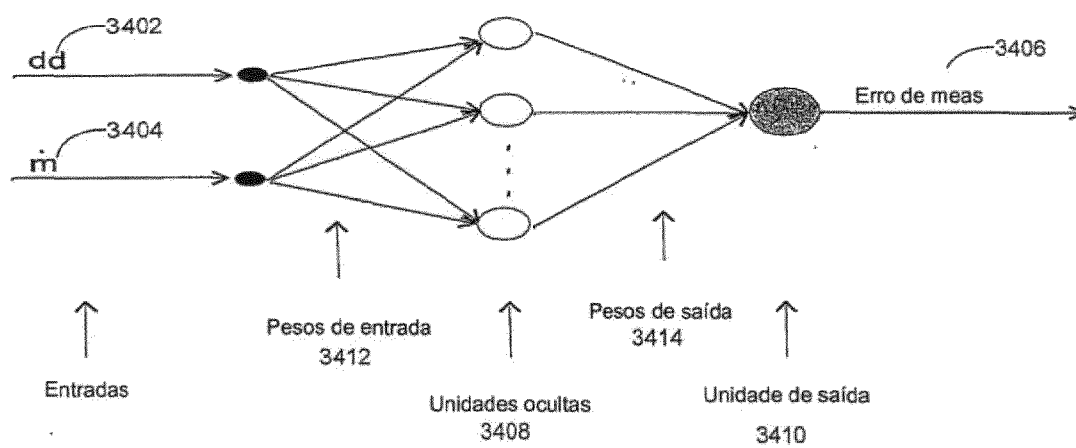


FIG. 34

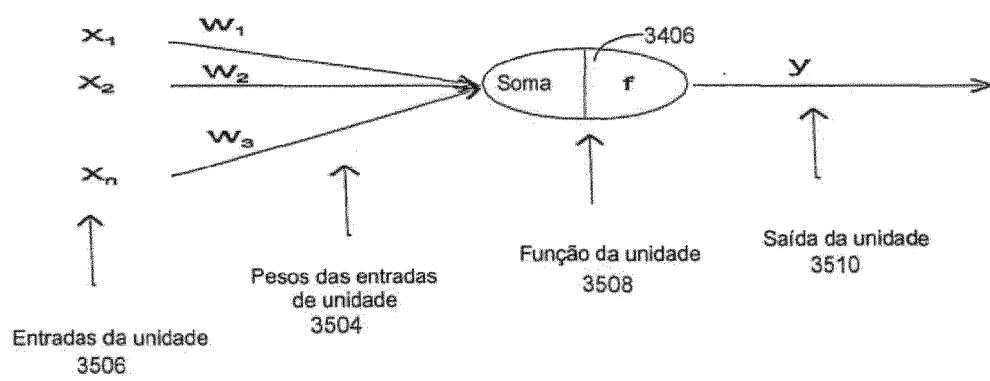


FIG. 35

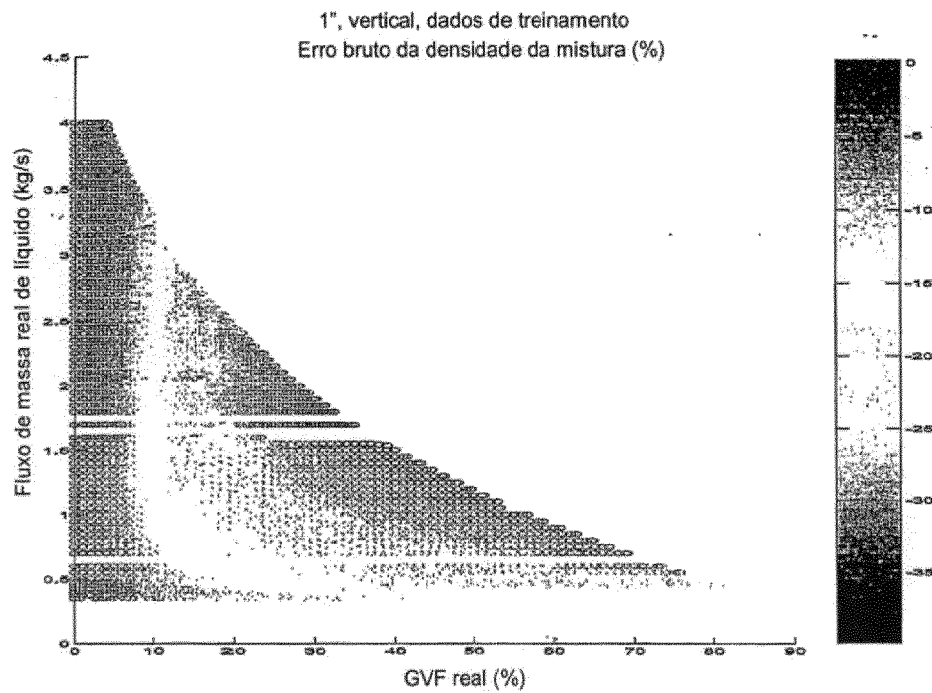


FIG. 36A

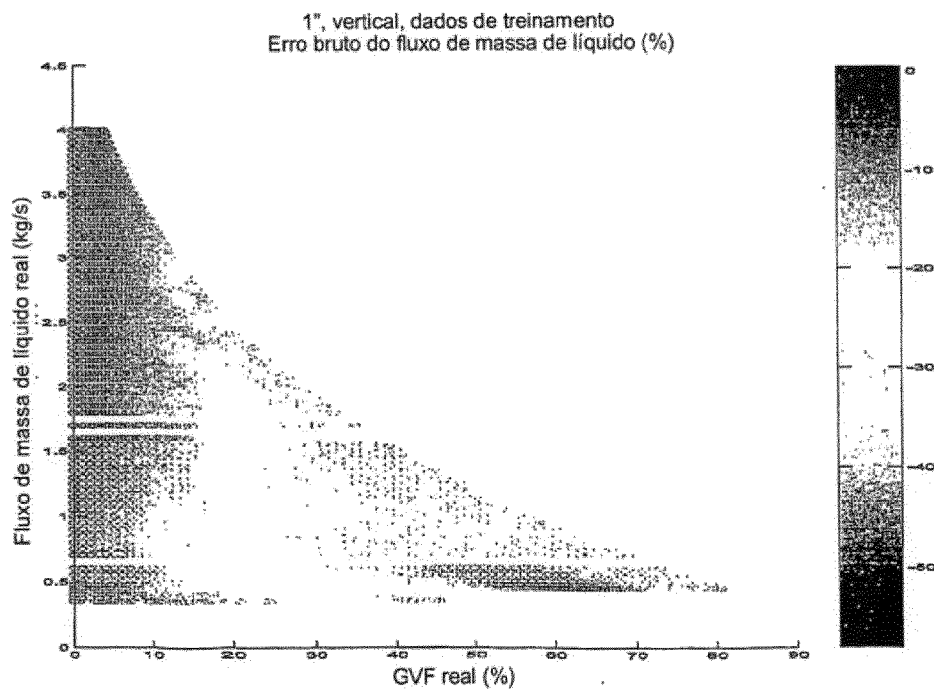


FIG. 36B

FIG. 37A

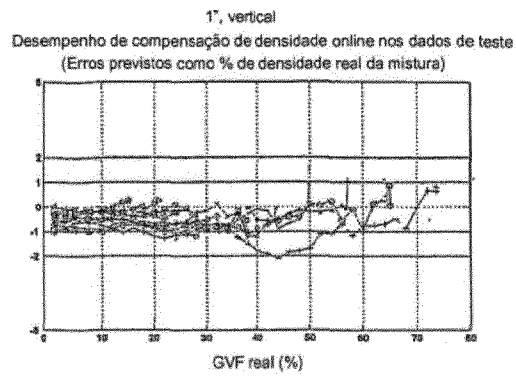


FIG. 37B

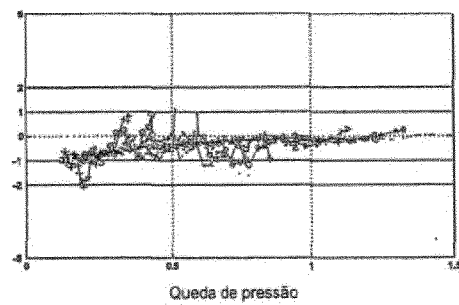


FIG. 37C

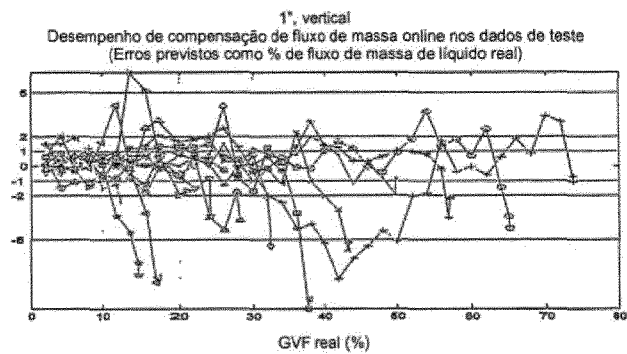


FIG. 37D

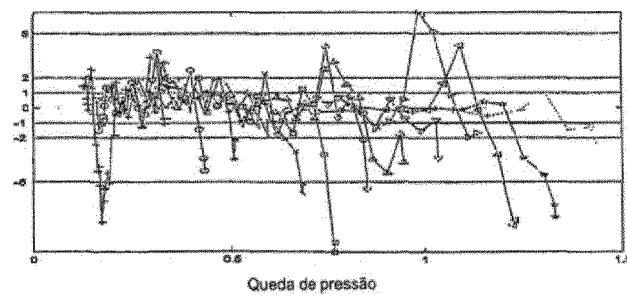
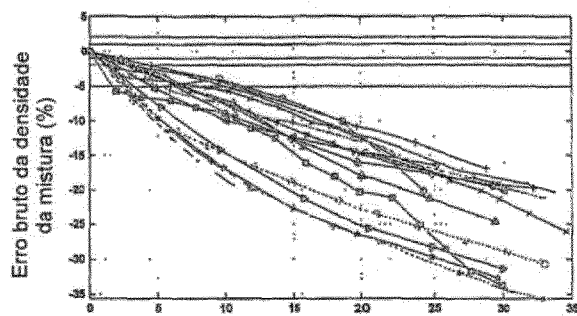


FIG. 38A

Erros brutos do fluxo de massa e da densidade do medidor Coriolis (%)

SWRI, óleo, vertical, 3", Test 00 a 50 fração de água
Faixa de fluxo: 3000 bpd - 8000 bpd

- + Fração de água 00%, 4000 bpd
- Fração de água 00%, 6000 bpd
- * Fração de água 06%, 3000 bpd
- Fração de água 06%, 4000 bpd
- × Fração de água 06%, 6000 bpd
- Fração de água 06%, 8000 bpd
- ◇ Fração de água 13%, 3000 bpd
- △ Fração de água 13%, 6000 bpd
- ▽ Fração de água 25%, 3000 bpd
- ▷ Fração de água 25%, 7000 bpd
- ◁ Fração de água 35%, 3000 bpd
- ☆ Fração de água 35%, 7000 bpd
- + Fração de água 50%, 3000 bpd
- Fração de água 50%, 5000 bpd
- * Fração de água 50%, 7000 bpd
- Fração de água 50%, 8000 bpd

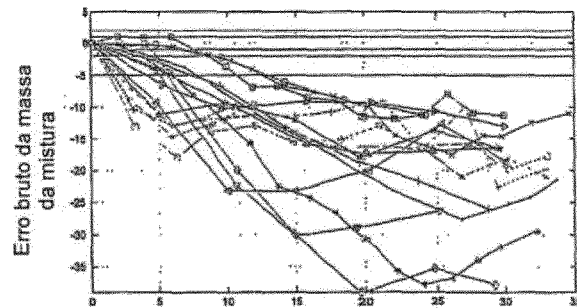


FIG. 38B

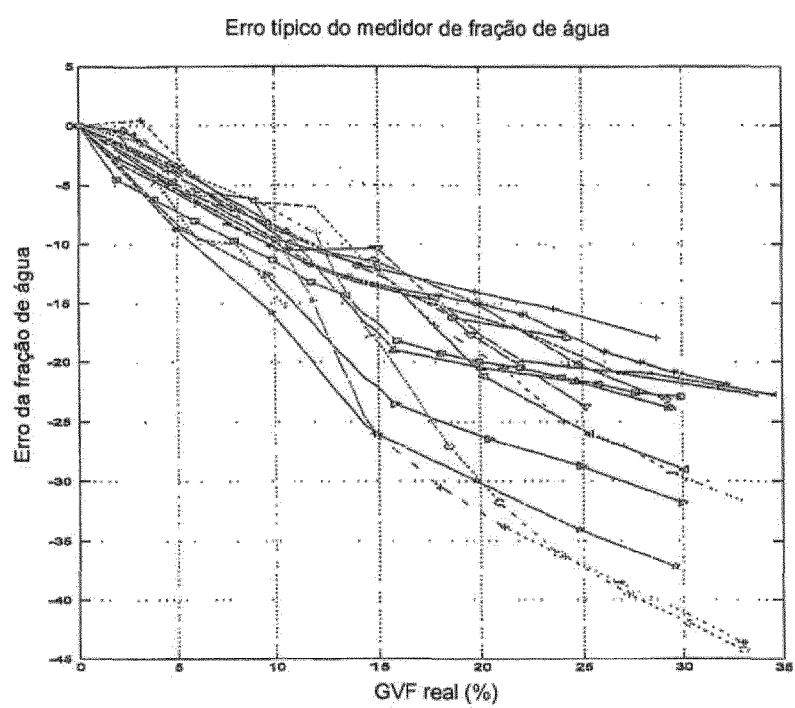


FIG. 39

FIG. 40A

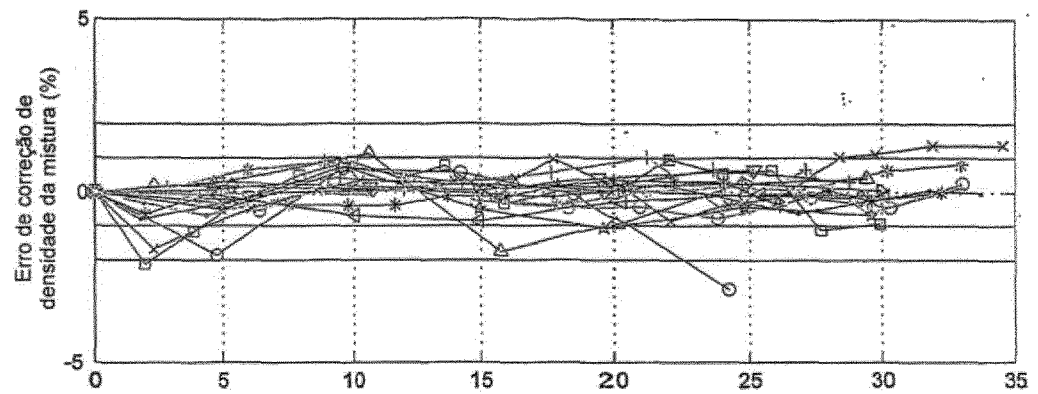


FIG. 40B

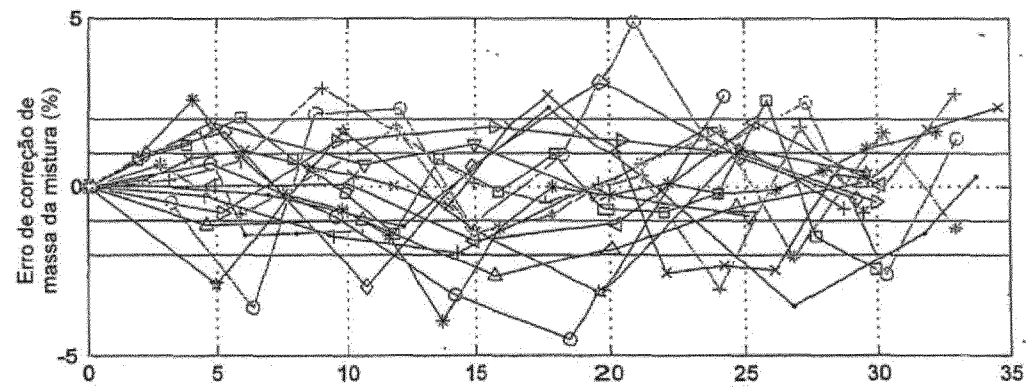


FIG. 40C

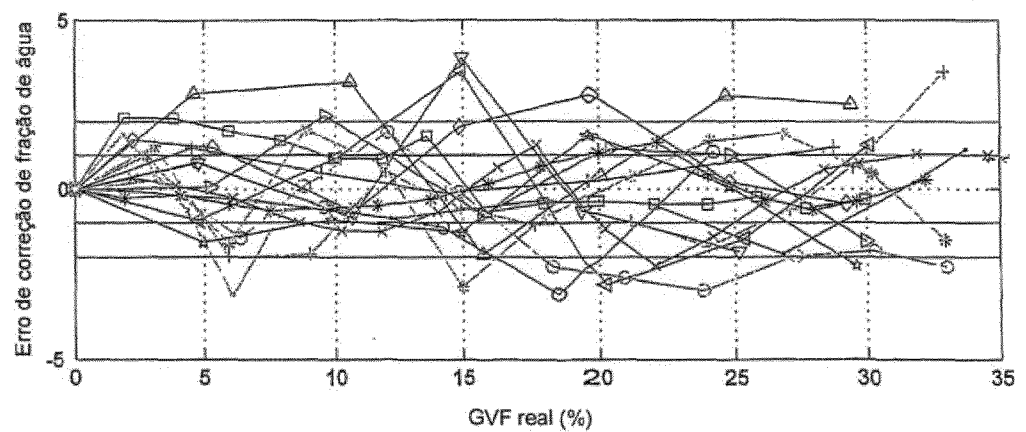


FIG. 41A

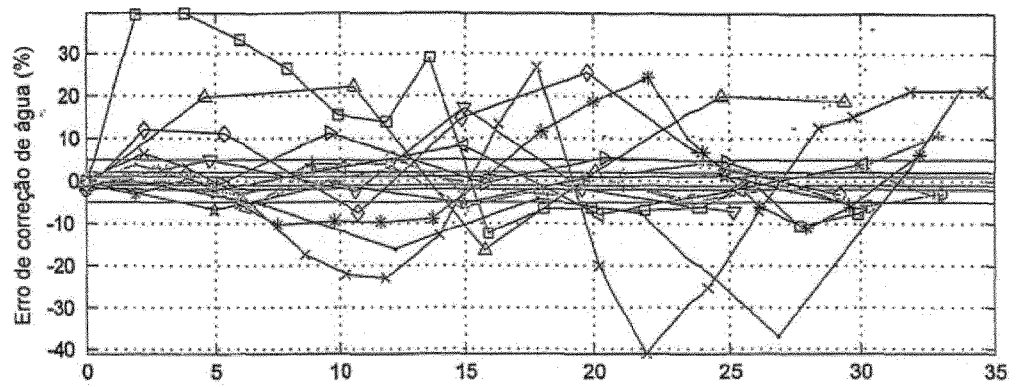


FIG. 41B

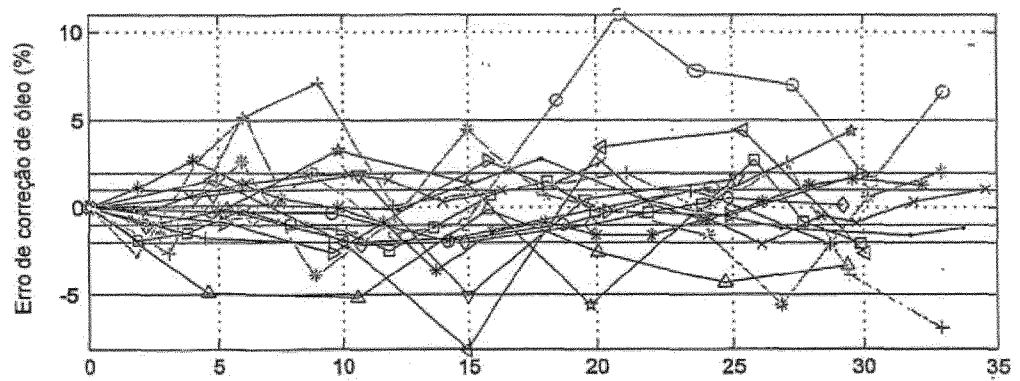
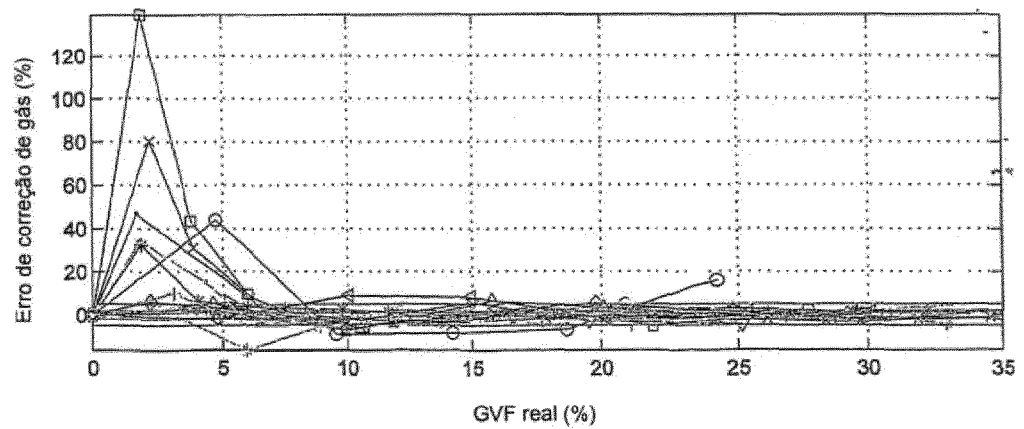


FIG. 41C



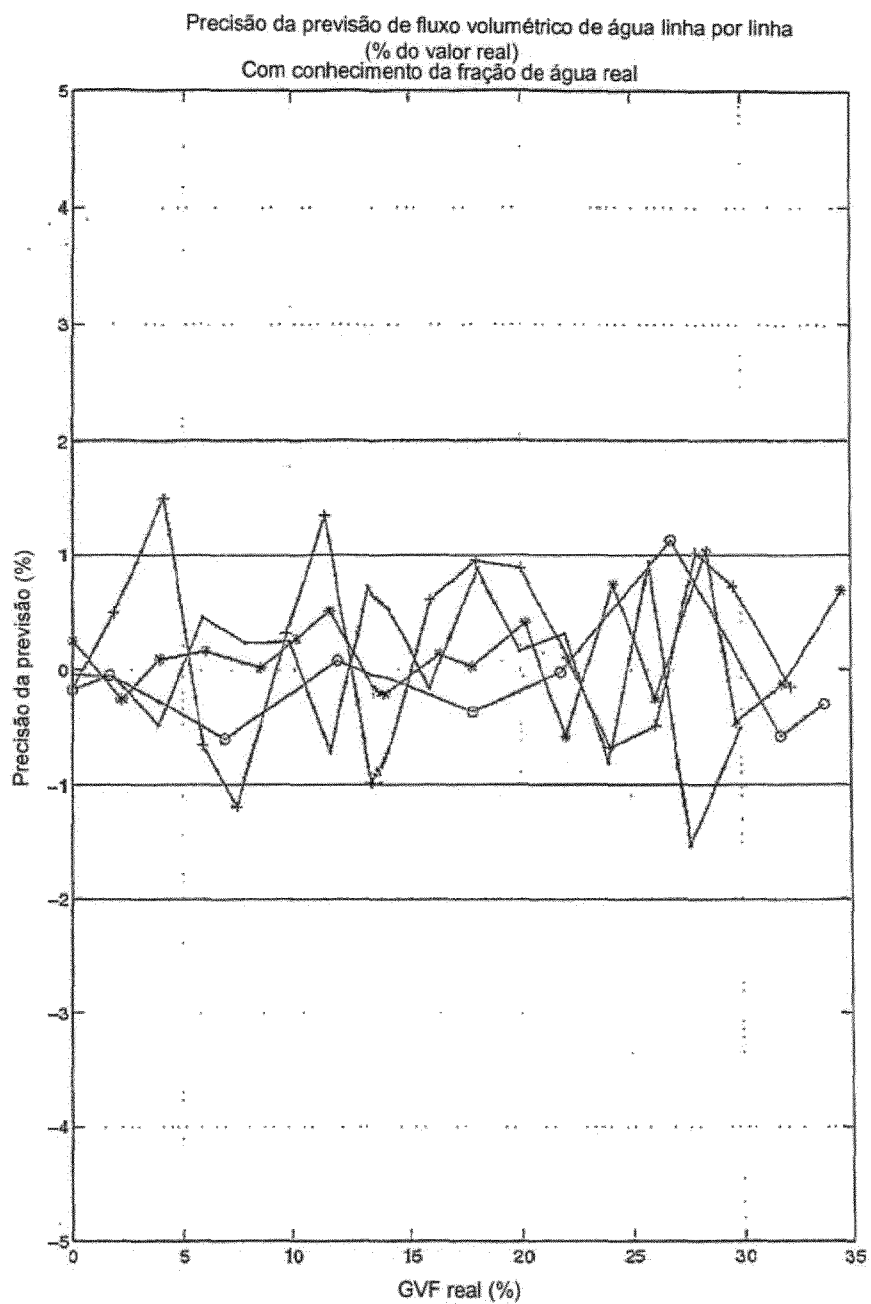


FIG. 42

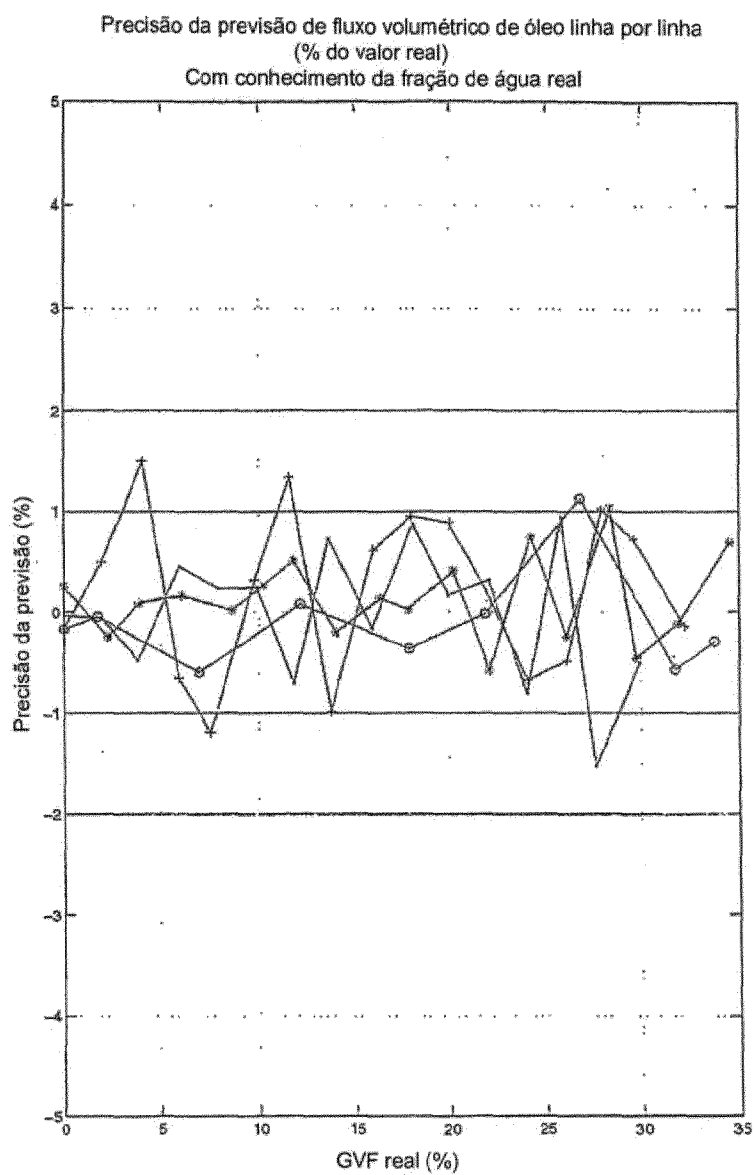


FIG. 43

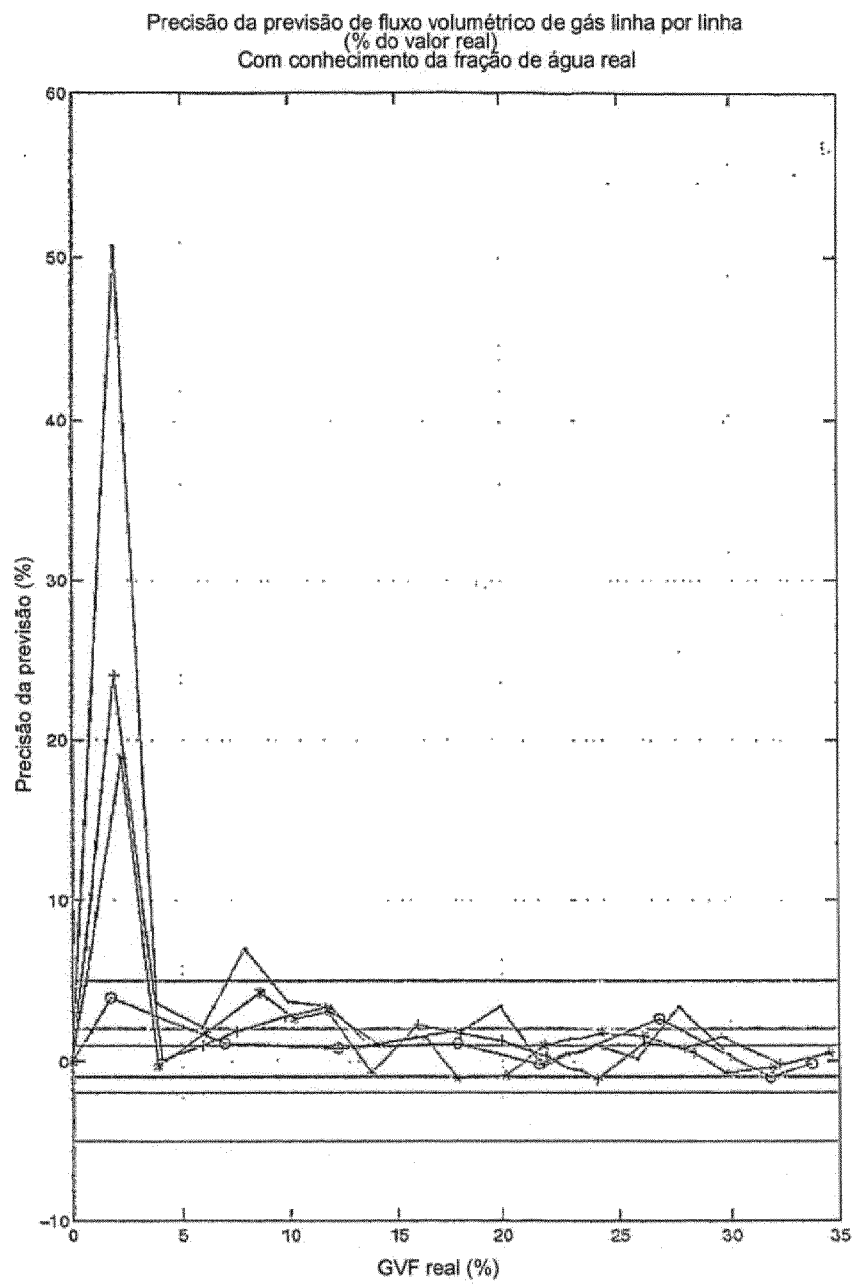


FIG. 44

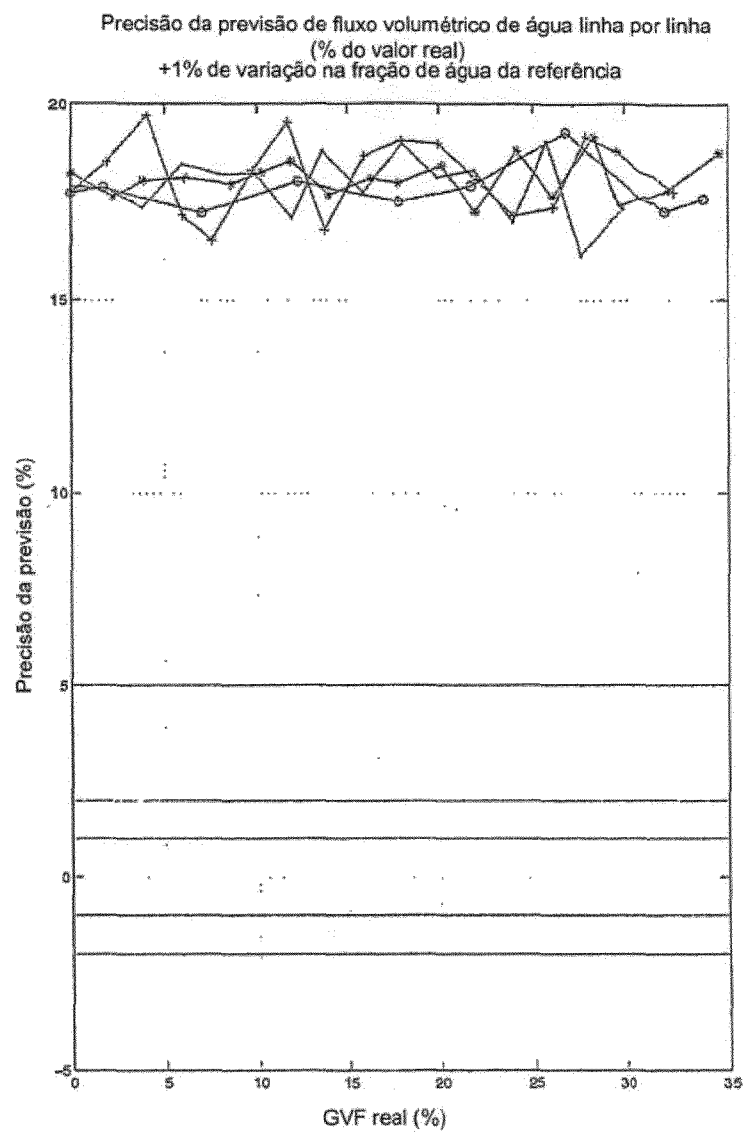


FIG. 45

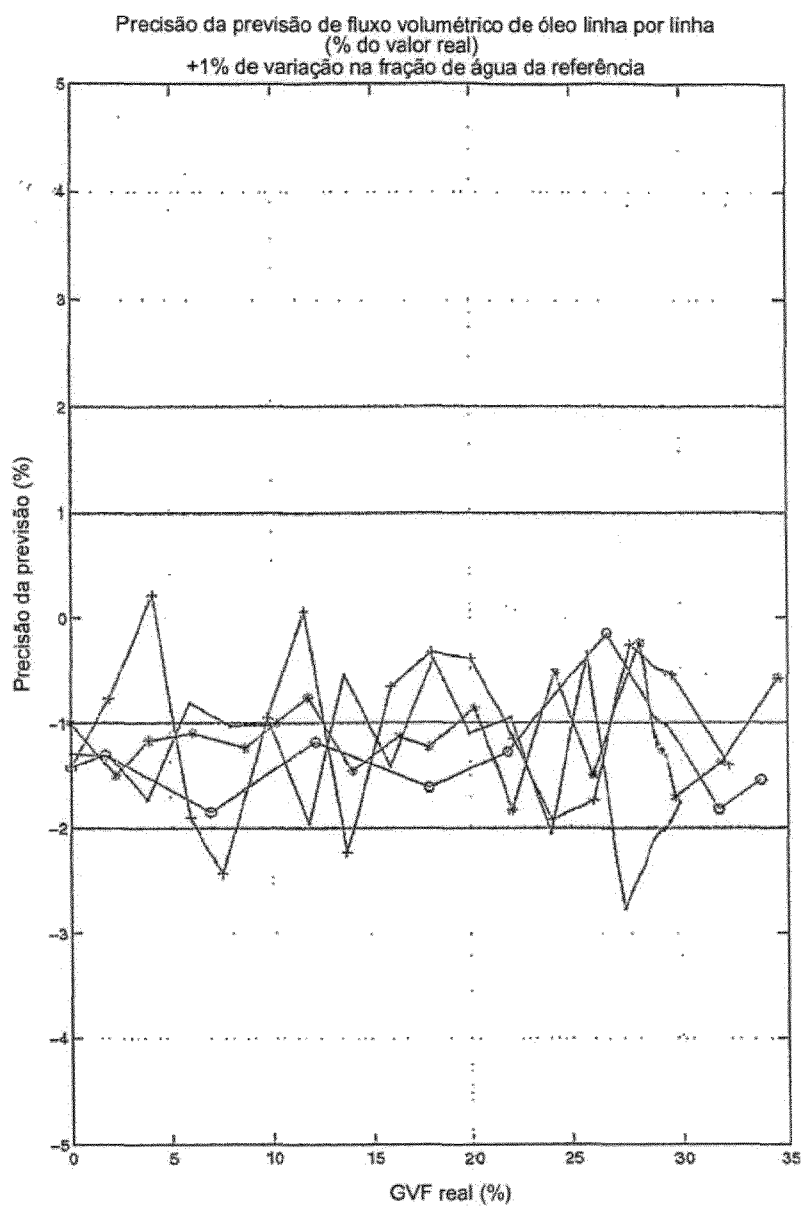


FIG. 46

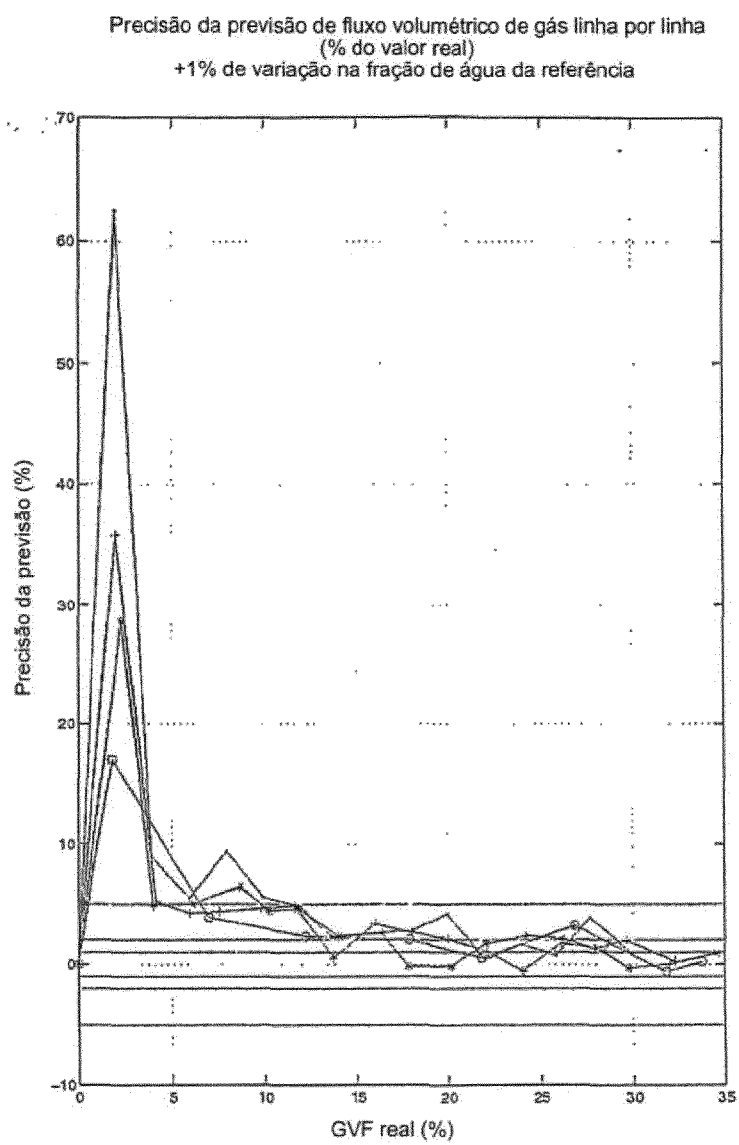


FIG. 47

Precisão da correção de fração de água nos dados de treinamento de modelo

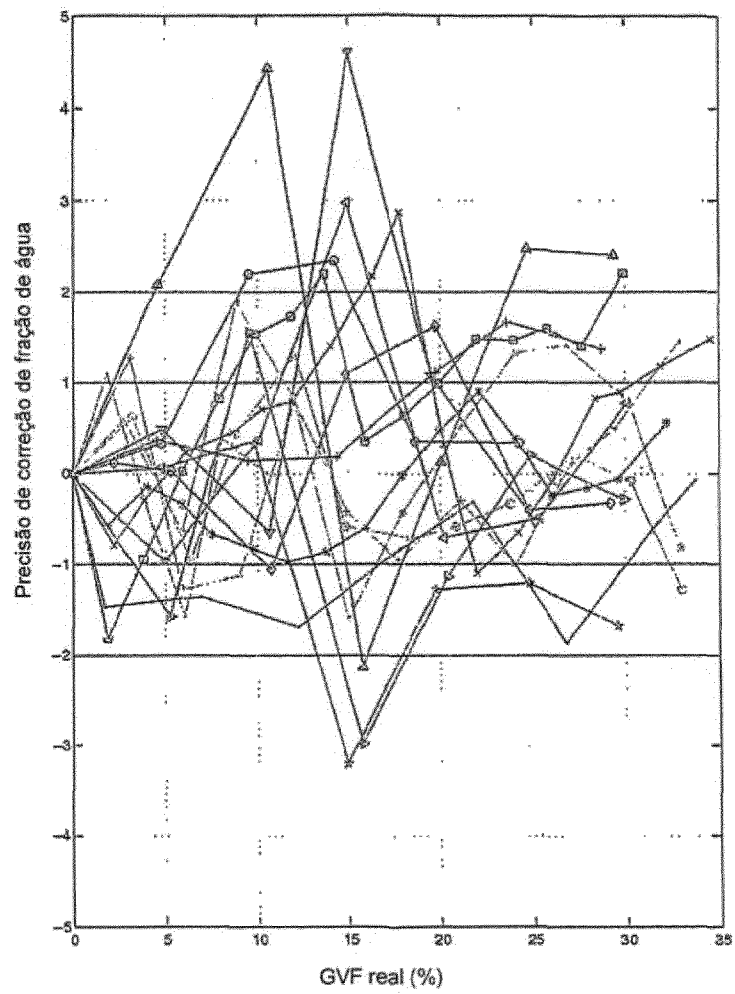


FIG. 48

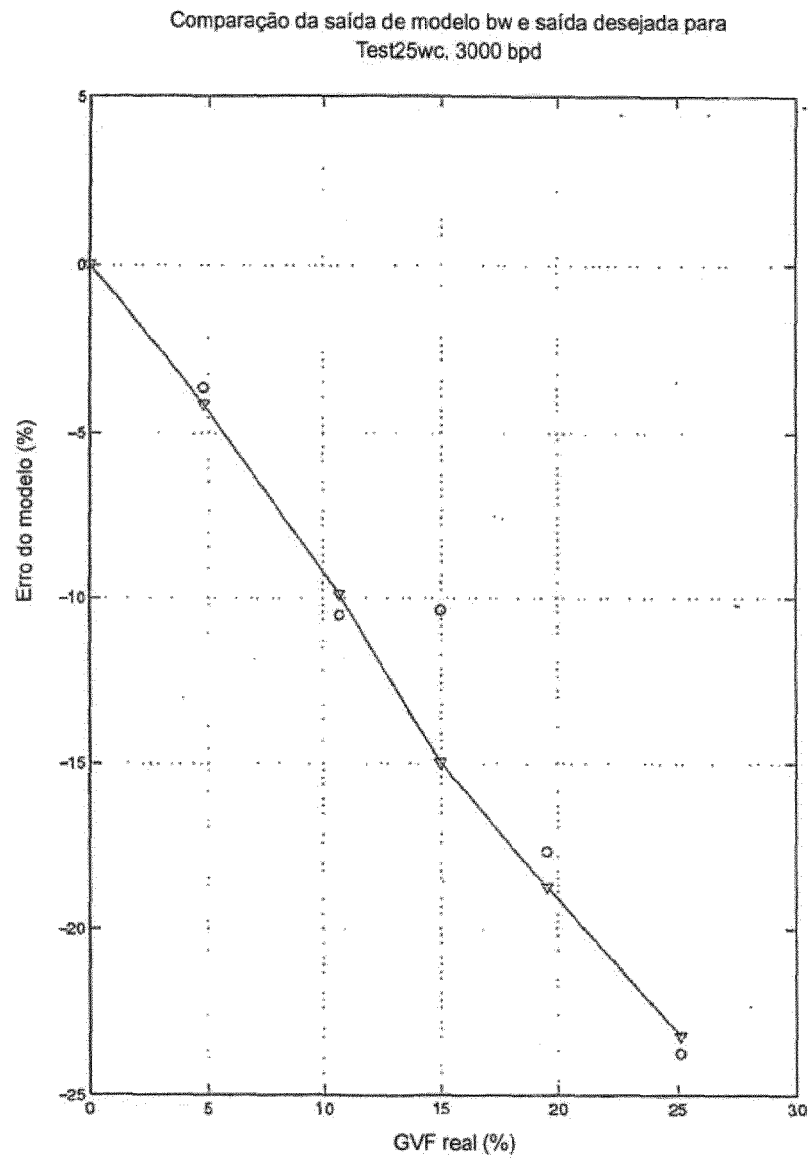


FIG. 49

FIG. 50A

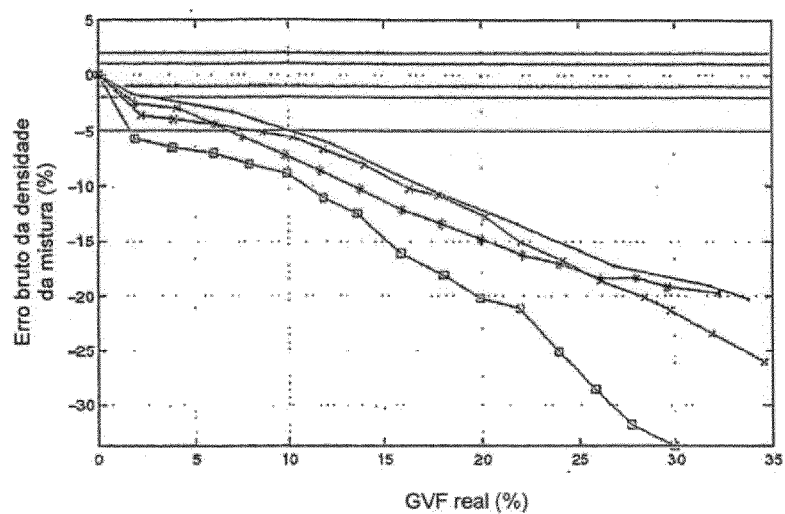


FIG. 50B

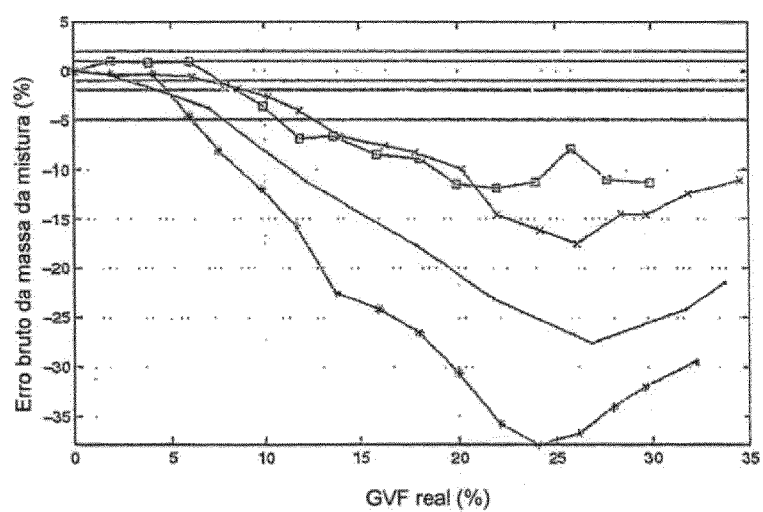


FIG. 51A

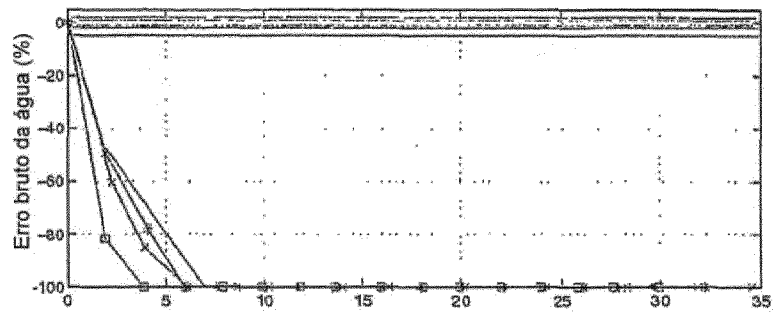


FIG. 51B

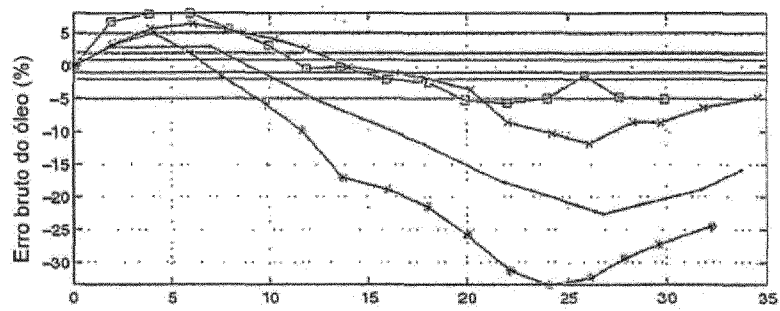
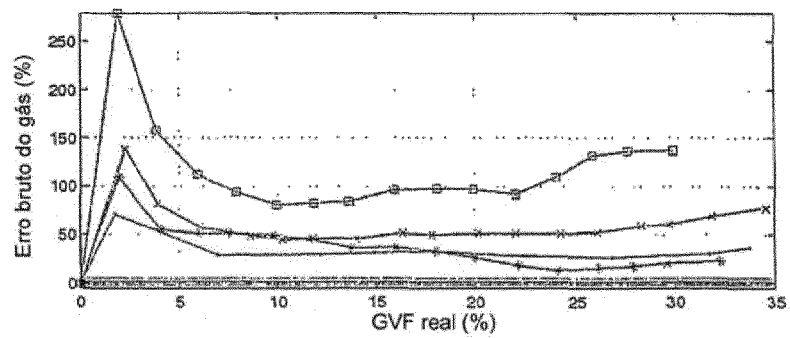


FIG. 51C



Test06wc, 3000 bpd

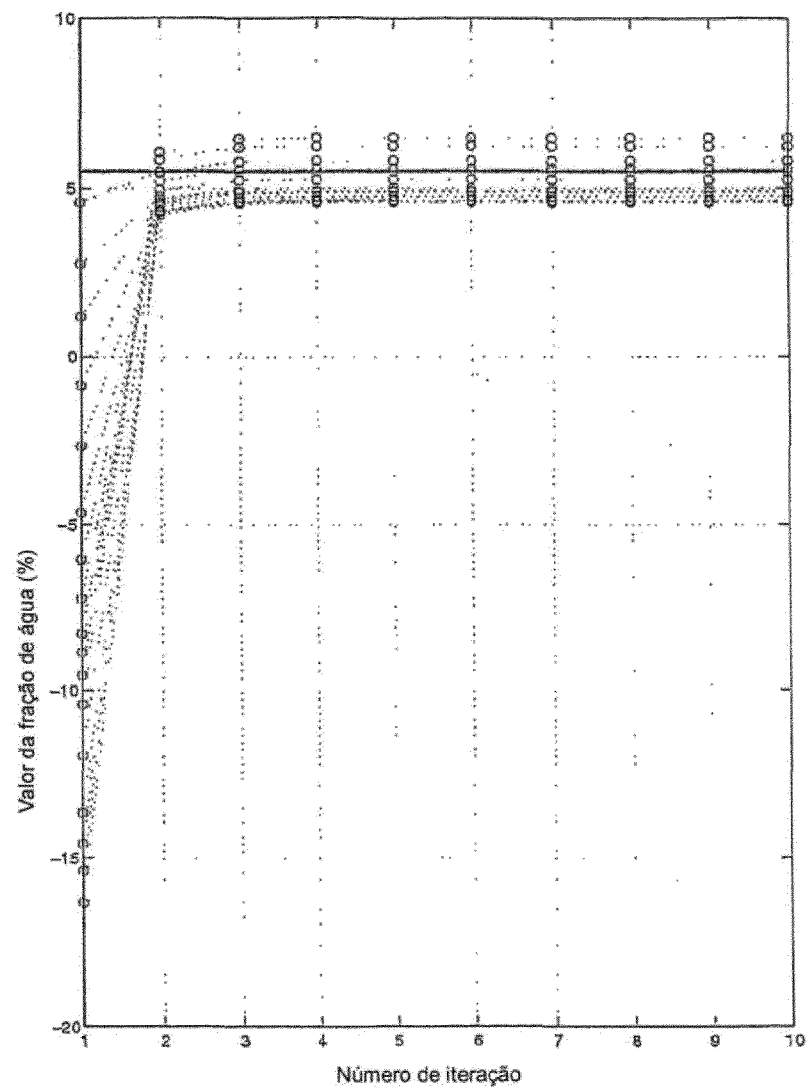


FIG. 52

FIG. 53A

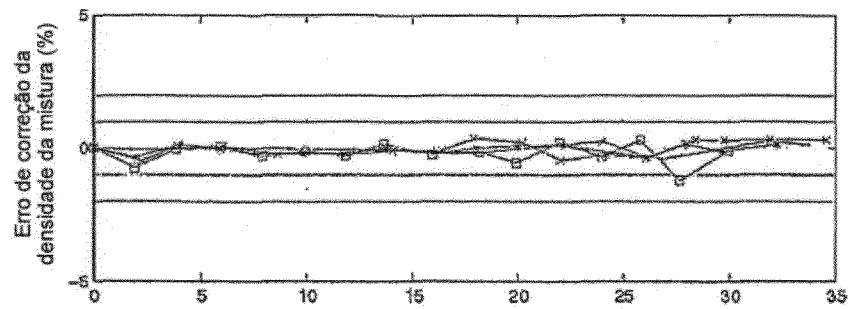


FIG. 53B

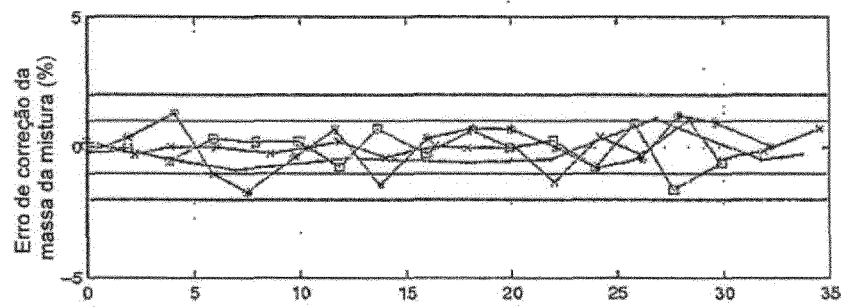


FIG. 53C

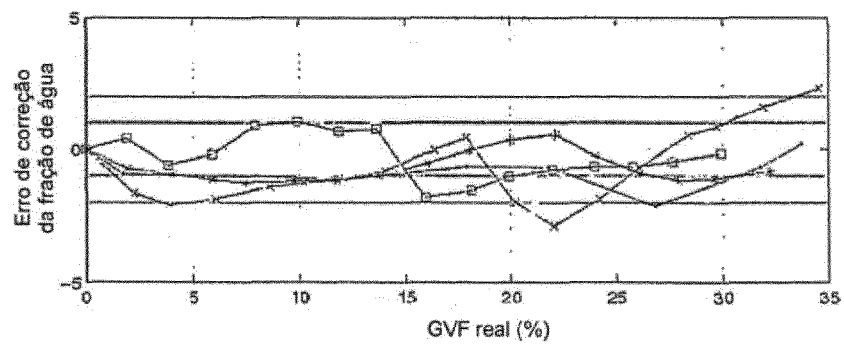


FIG. 54A

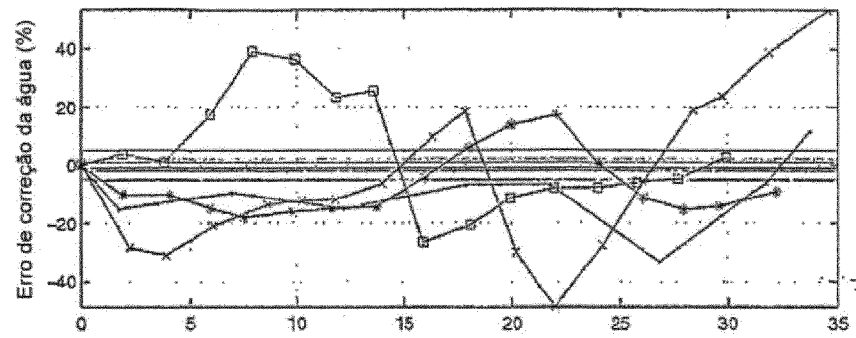


FIG. 54B

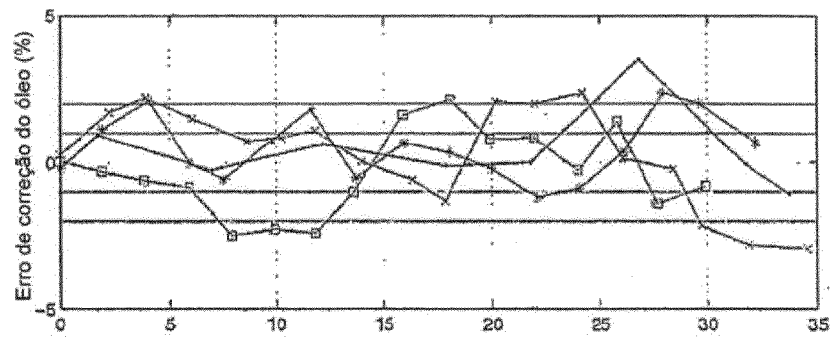


FIG. 54C

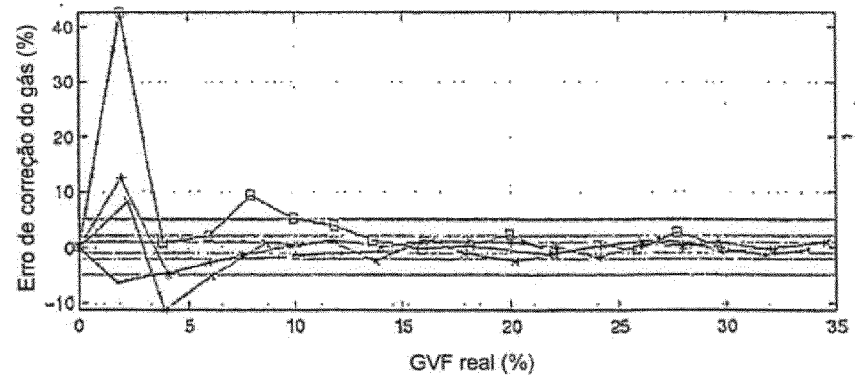


FIG. 55A

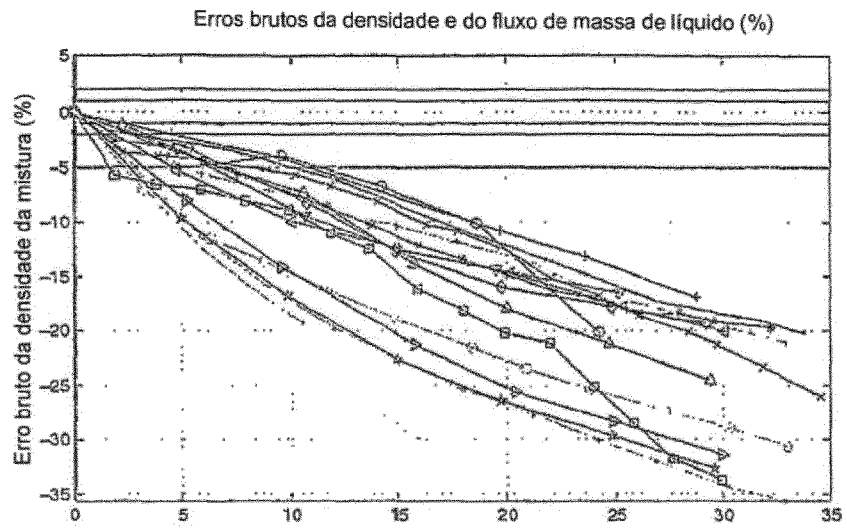
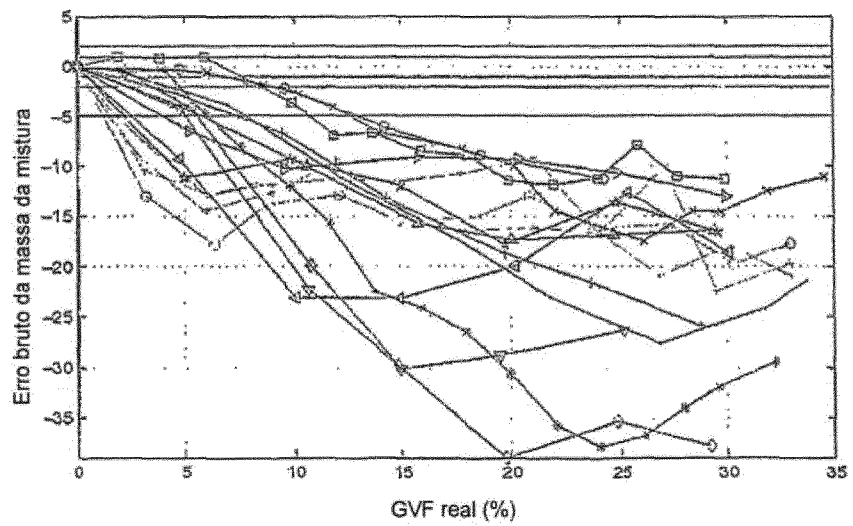


FIG. 55B



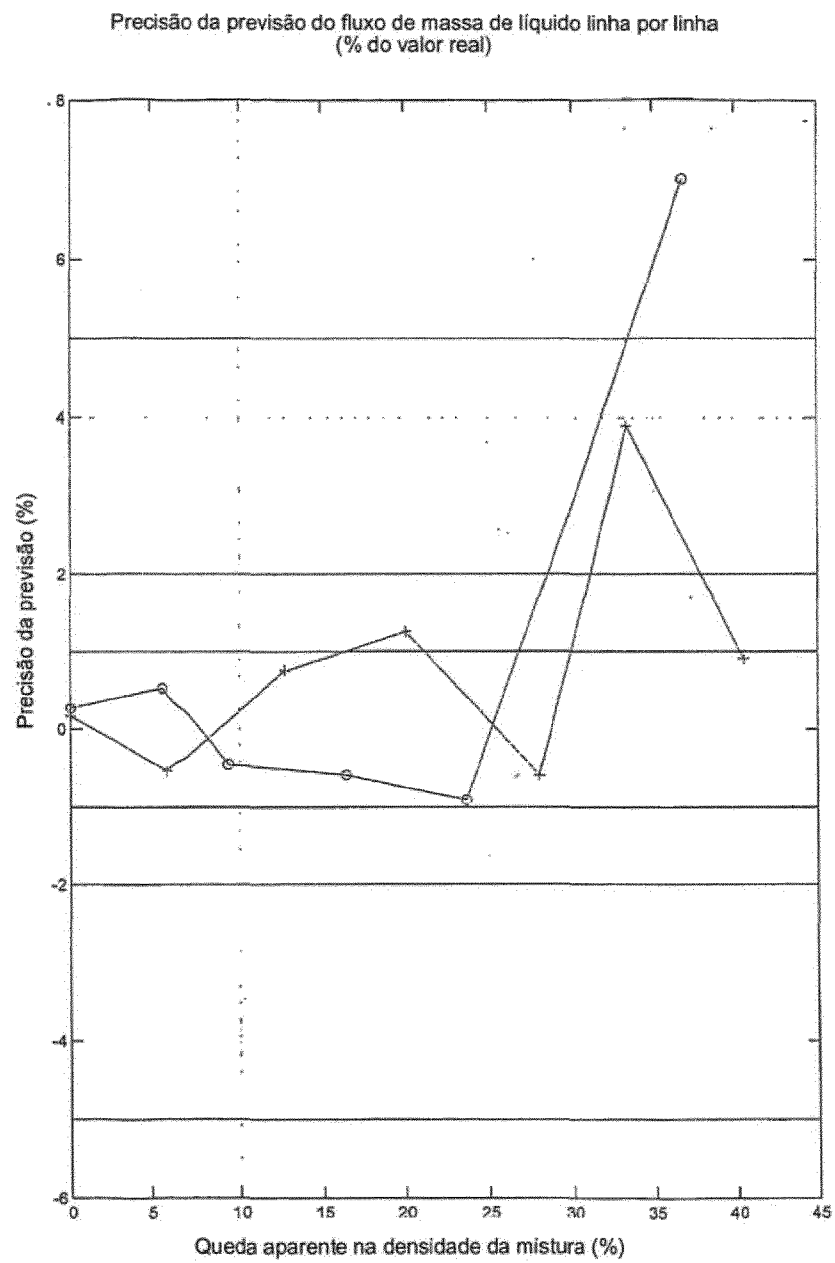


FIG. 56

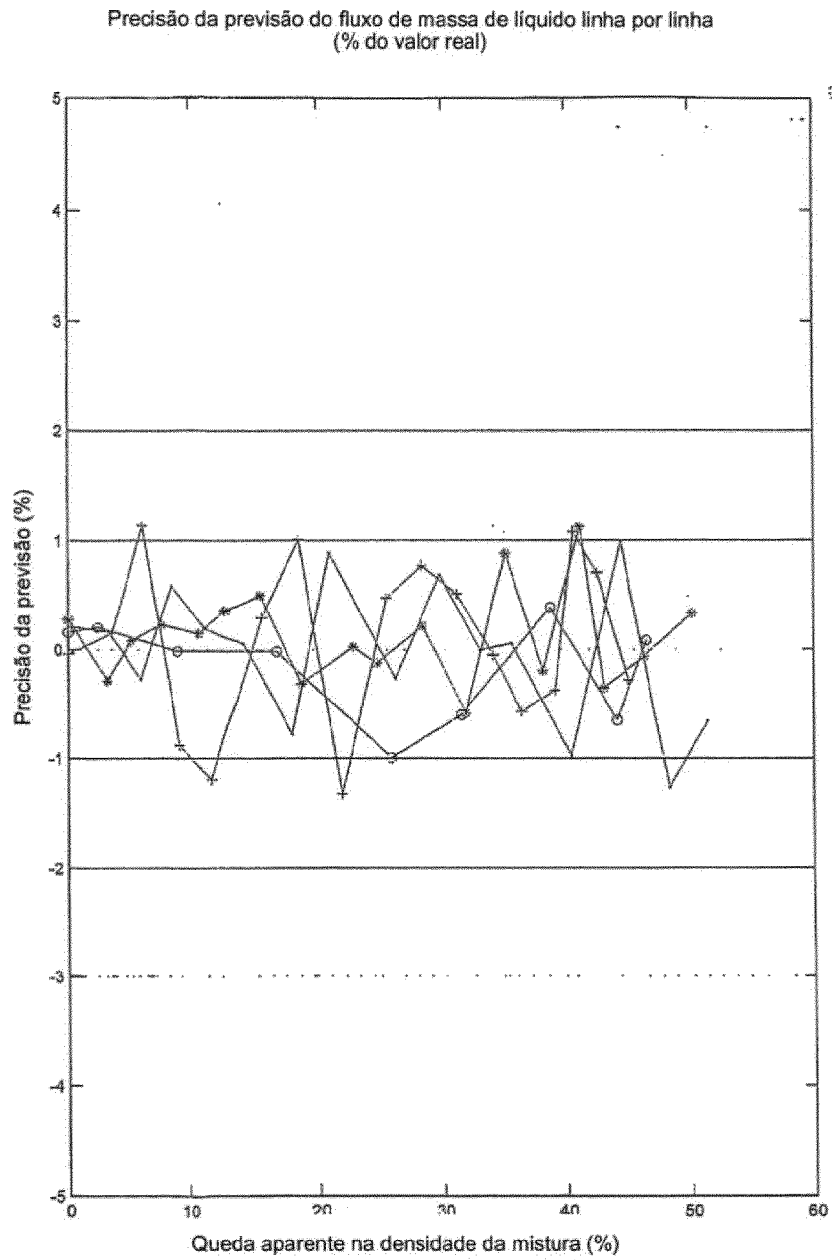


FIG. 57

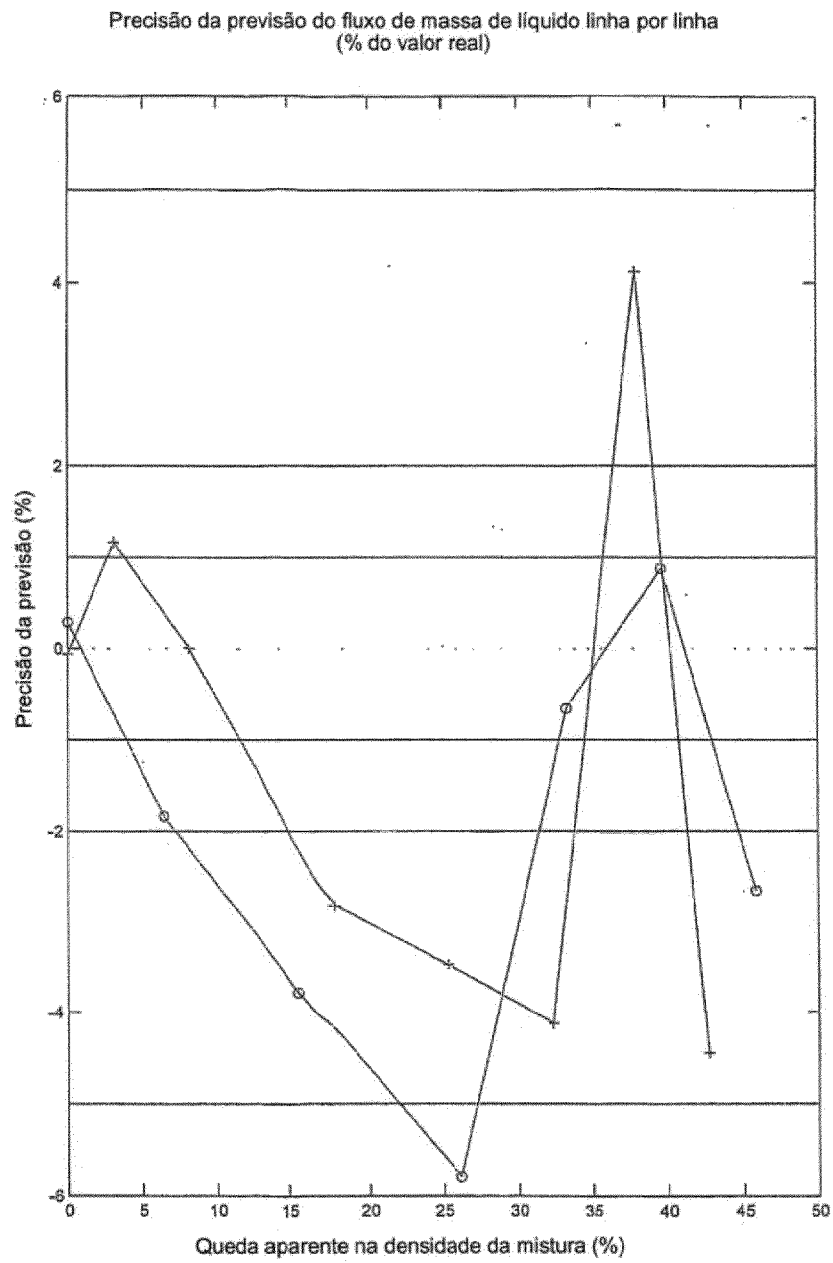


FIG. 58

Precisão da previsão do fluxo de massa de líquido linha por linha
(% do valor real)

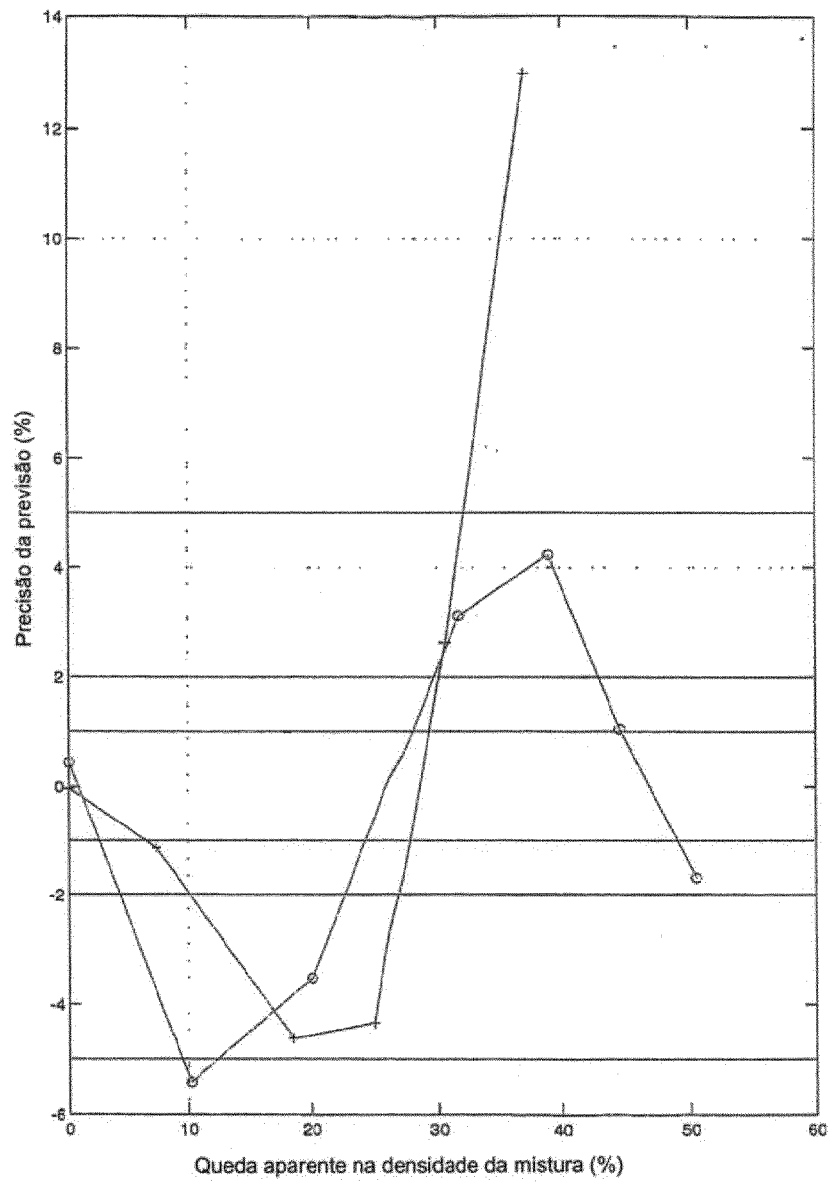


FIG. 59

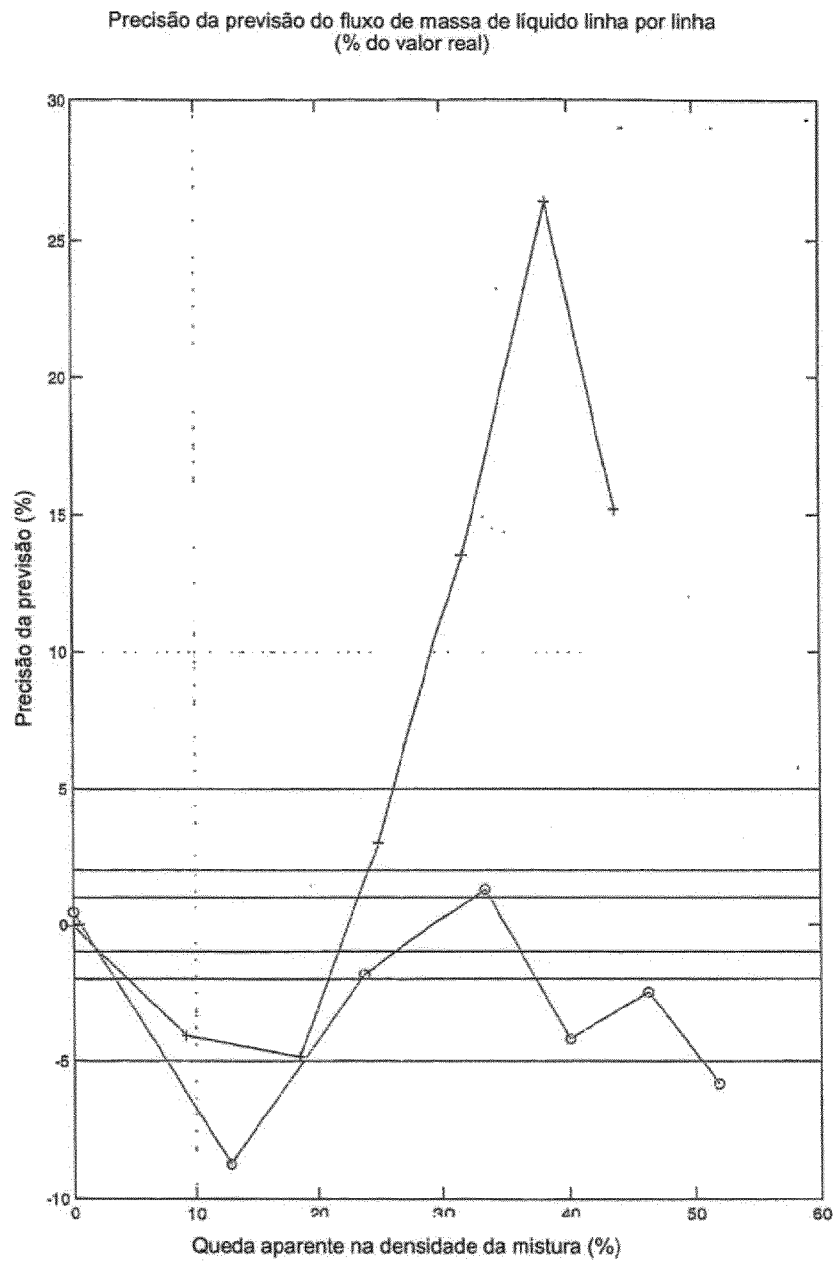


FIG. 60

Precisão da previsão do fluxo de massa de líquido linha por linha
(% do valor real)

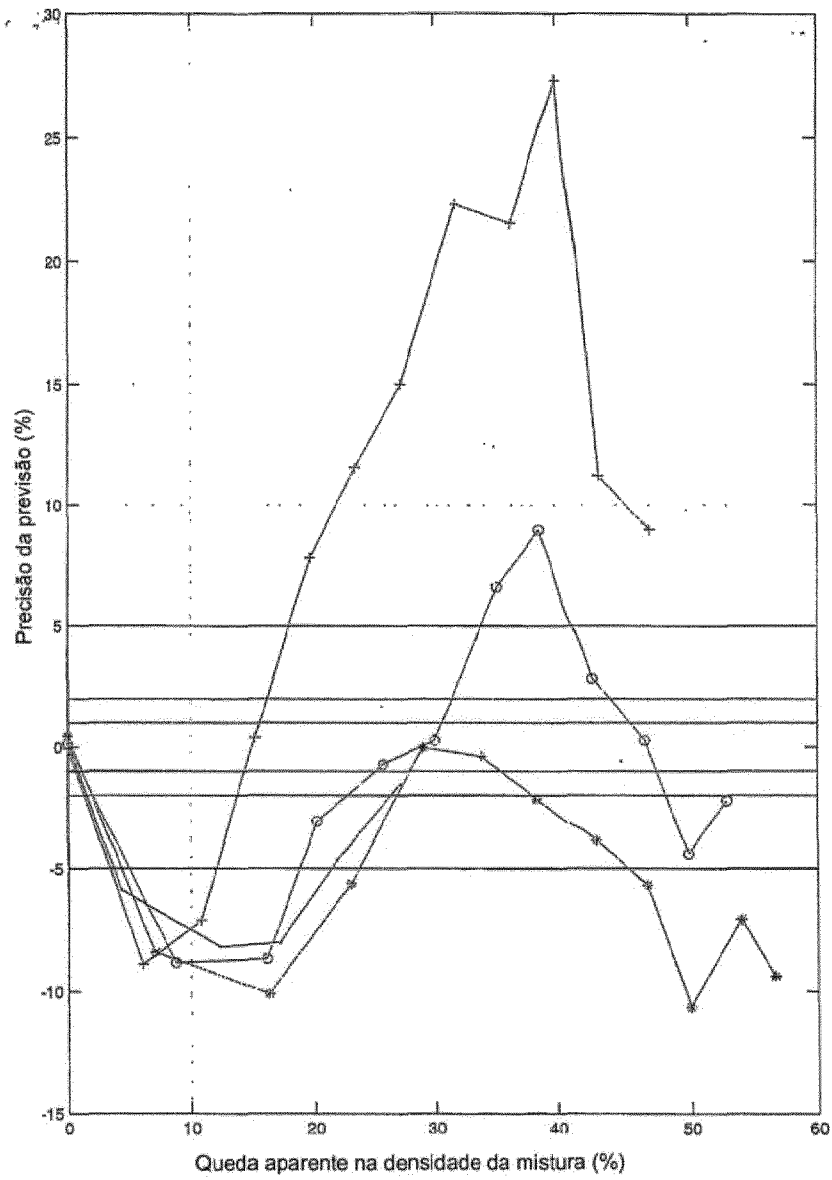


FIG. 61

Precisão da correção da densidade nos dados de treinamento do modelo
(3Dnn)

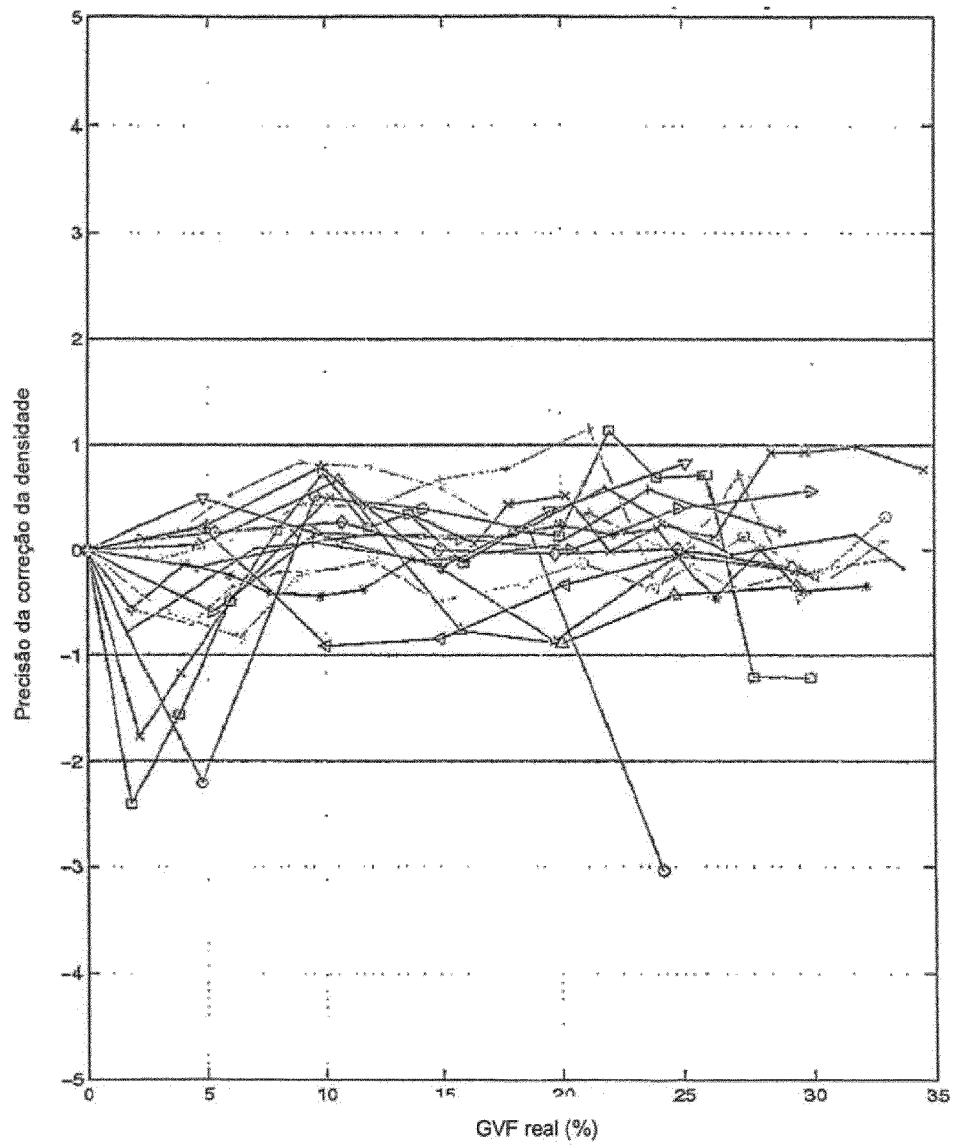


FIG. 62

Precisão da correção do fluxo de massa nos dados de treinamento do modelo
(3Dnn)

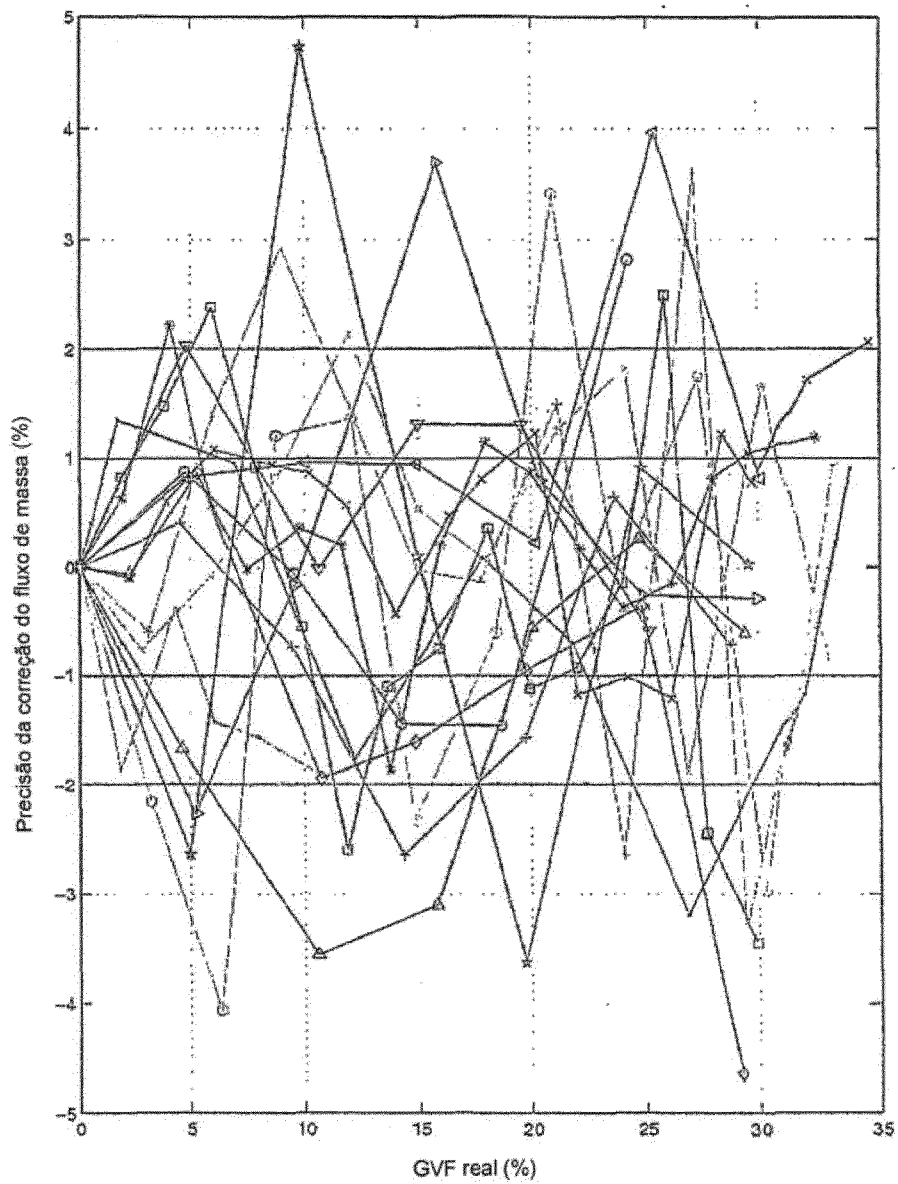


FIG. 63

Erros brutos da densidade e do fluxo de massa de líquido (%)

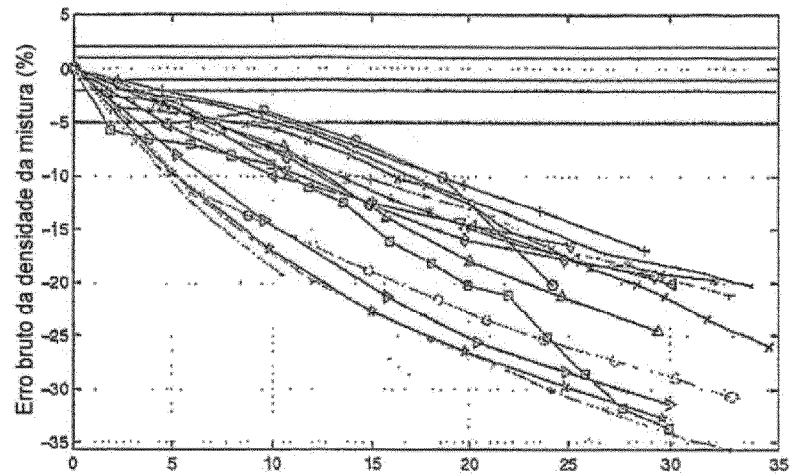


FIG. 64A

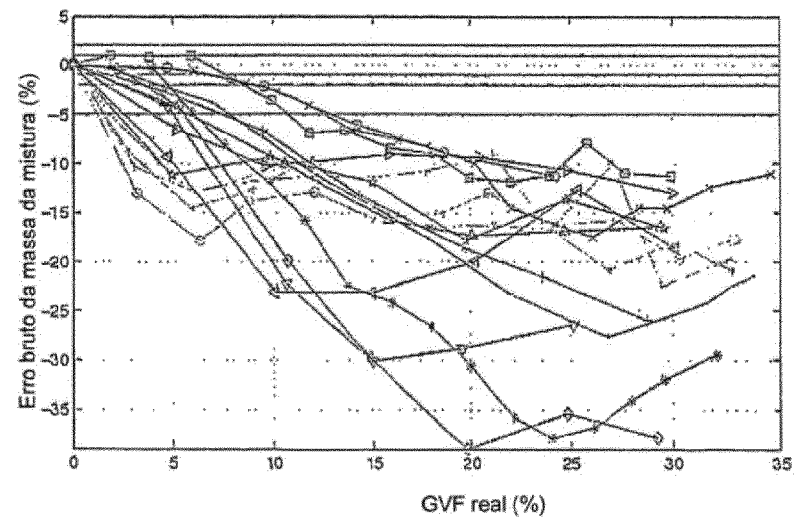


FIG. 64B

FIG. 65A

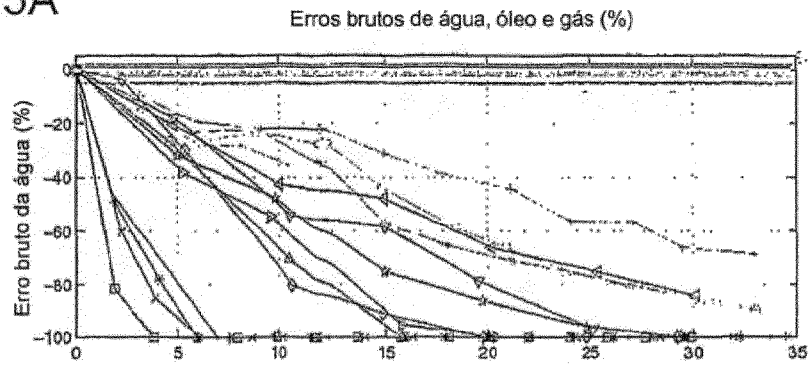


FIG. 65B

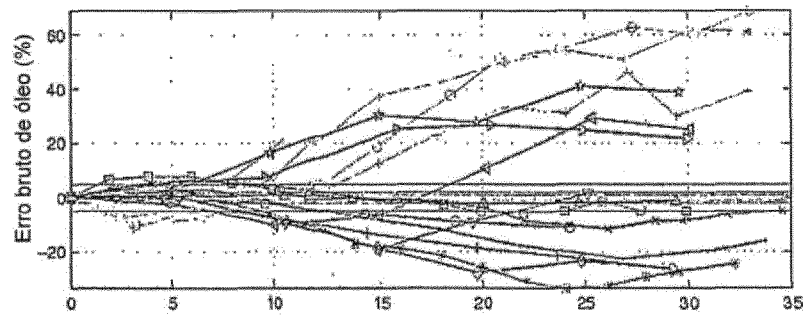


FIG. 65C

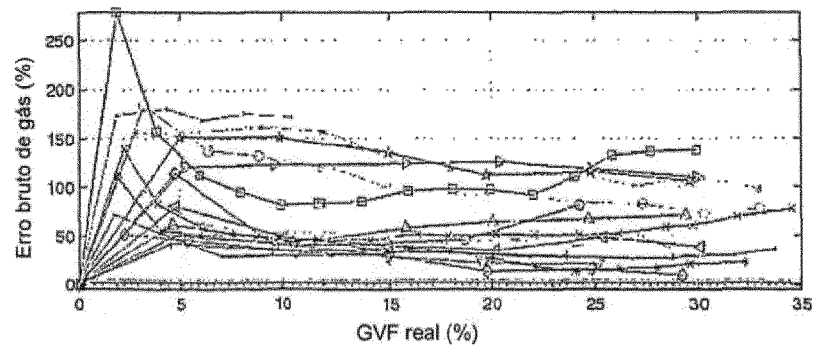


FIG. 66A

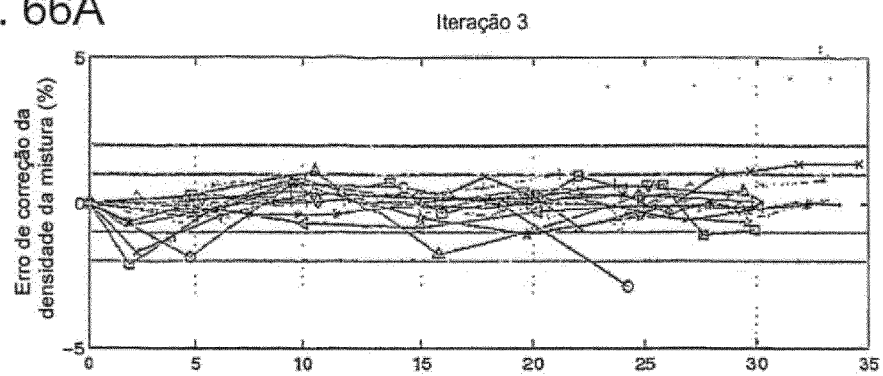


FIG. 66B

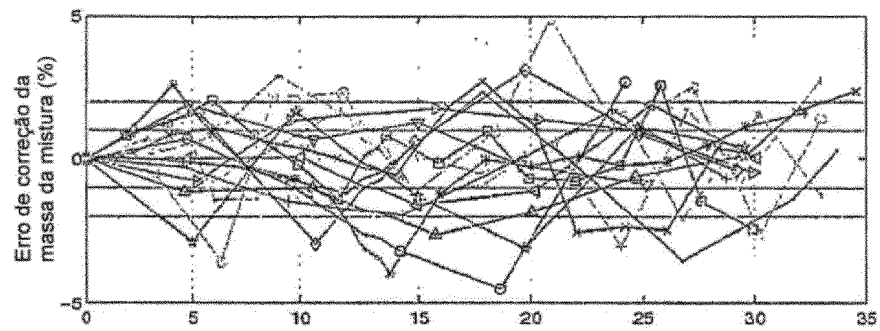


FIG. 66C

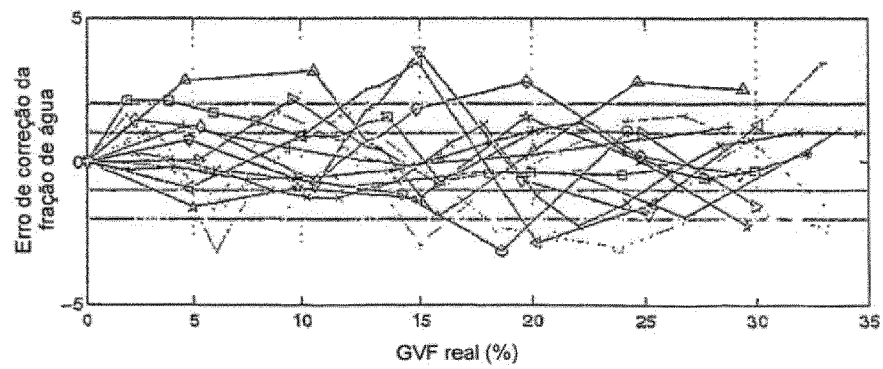


FIG. 67A

Iteração 3

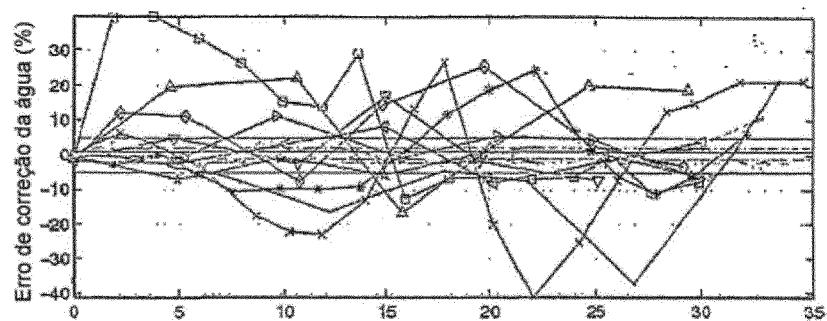


FIG. 67B

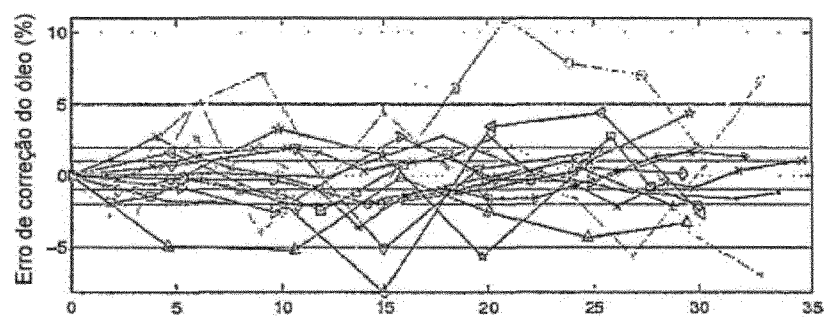
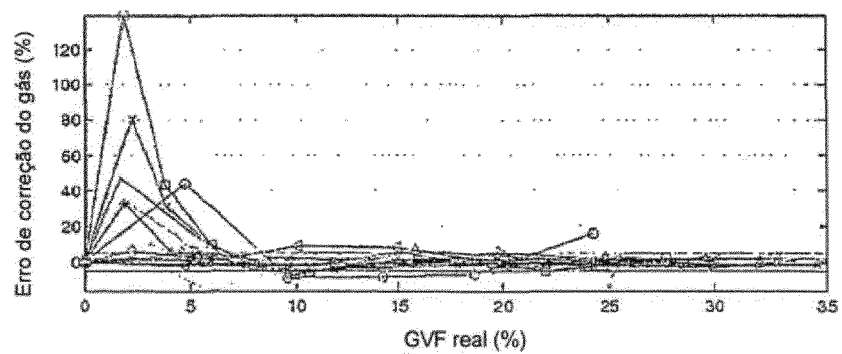


FIG. 67C



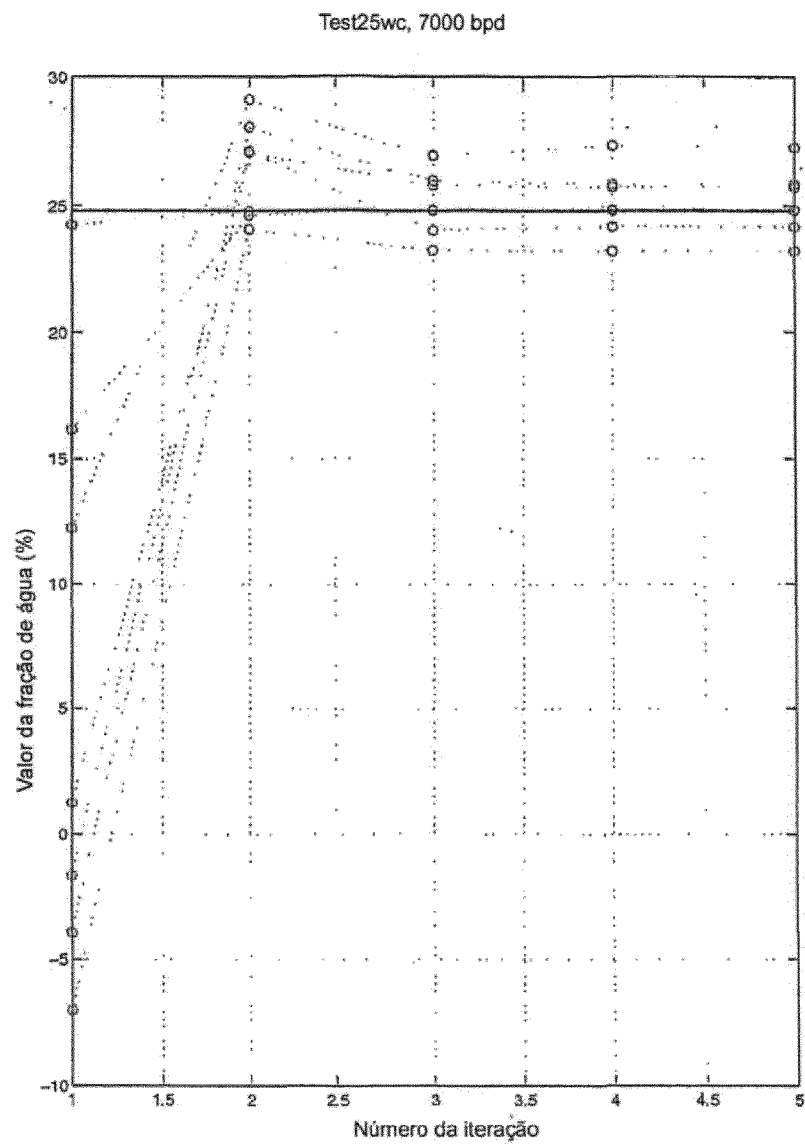


FIG. 68