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

(11) **PI 0207229-7 B1**

(22) Data do Depósito: 08/02/2002

(45) Data de Concessão: 15/03/2016

(RPI 2358)

(54) Título: MÉTODOS E APARELHO DE MEDIDA DE FLUXO DE MASSA UTILIZANDO FILTRAGEM SELETIVA DE MODO

(51) Int.Cl.: G06G 7/161; H03M 1/64; G01F 1/84

(30) Prioridade Unionista: 16/02/2001 US 09/788.189, 16/02/2001 US 09/788,194, 16/02/2001 US 09/785.869

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

(72) Inventor(es): TIMOTHY J. CUNNINGHAM, DAVID LEE CAMPBELL, THOMAS DEAN SHARP

"MÉTODOS E APARELHO DE MEDIDA DE FLUXO DE MASSA UTILIZANDO FILTRAGEM SELETIVA DE MODO"

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção relaciona-se com sensores e métodos relacionados e mais particularmente, com métodos e aparelho de medida de fluxo de massa.

FUNDAMENTO DA INVENÇÃO

Várias aplicações de sensor envolvem a detecção de vibração mecânica ou de outro movimento. Exemplos de sensores que utilizam tal detecção de movimento incluem os medidores de fluxo de massa Coriolis e os densitômetros de tubo que vibra. Estes dispositivos tipicamente incluem um conduto ou outro recipiente que é periodicamente acionado, isto é, vibrado. As propriedades tal como fluxo de massa, densidade e semelhantes associadas com um material contido no conduto ou recipiente podem ser determinadas por processar sinais a partir dos transdutores de movimento posicionados na estrutura de refreamento, a medida que os modos de vibração do sistema preenchido com o material que vibra geralmente são afetados pelas características de massa combinada, rigidez e de amortecimento do conduto de depósito ou da estrutura de recipiente e o material contido nos mesmos.

Um medidor de fluxo de massa Coriolis típico inclui um ou mais condutos que são conectados em linha em uma tubulação ou em outro sistema de transporte e transportam material, por exemplo, fluidos, misturas de cloreto de cálcio e lama e semelhantes, no sistema. Cada conduto pode ser visto como possuindo um conjunto de modos de vibração natu-

rais incluindo, por exemplo, os modos de curvatura simples, torcional, radial e acoplado. Em uma aplicação de medição de fluxo de massa Coriolis típica, um conduto é excitado em ressonância em um de seus modos de vibração naturais a medida que um material flui através do conduto e o movimento do conduto é medido em pontos ao longo do conduto. A excitação é tipicamente proporcionada por um atuador, por exemplo, um dispositivo eletromecânico, tal como um acionador de voz tipo bobina, o qual perturba o conduto de um modo periódico. Medidores de fluxo de massa Coriolis ilustrativos são descritos nas Patentes N^{os} 4.109.524 para Smith, 4.491.025 para Smith et al. e na Re 31.450 para Smith.

Infelizmente, a precisão dos medidores de fluxo de massa Coriolis convencionais pode ser comprometida por não linearidades e assimetrias na estrutura do conduto, pelo movimento surgindo a partir de forças estranhas, tal como forças geradas por bombas e compressores que estão ligados com o medidor de fluxo e o movimento surgindo a parir de forças de pressão exercidas pelo material fluindo através do conduto do medidor de fluxo. Os efeitos destas forças são normalmente reduzidos pela utilização de projetos de medidores de fluxo que são equilibrados para reduzir os efeitos que podem ser atribuídos à vibração externa e pela utilização de filtros no domínio de freqüência, por exemplo, filtros de banda de passagem projetados para filtrar os componentes dos sinais de movimento para longe da freqüência de excitação. Entretanto, as maneiras de se abordar a filtragem mecânica são freqüentemente limitadas por considerações mecânicas, por

exemplo, as limitações de material, exigências de montagem, limitações de peso, limitações de tamanho e semelhantes e a filtragem no domínio de freqüência pode ser ineficaz ao remover contribuições de vibração não desejadas próximas à freqüência de excitação.

A publicação PCT WO 00/49371 discute um sistema para determinar um parâmetro do processo (isto é, o fluxo de massa) utilizando as técnicas de filtragem de força. A força do sistema filtra os sinais de movimento representando o movimento de um conduto de modo que somente sinais representando a força de interesse sejam utilizados na determinação do parâmetro do processo.

A publicação PCT WO 00/04345 utiliza um resolvedor modal normal para estimar um parâmetro do processo. O resolvedor modal normal real é utilizado para determinar os componentes normais reais dos sinais de movimento representando o movimento de um conduto.

A publicação PCT WO 00/08423 descreve um método e aparelho nos quais um parâmetro do processo associado com um material contido em um conduto é estimado por se estimar um componente de flexibilidade residual modal normal real associado com o modo normal real de movimento do conduto. Uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento do contudo são recebidos. Uma estimativa compensada com a flexibilidade residual do fluxo de massa é gerada a partir da pluralidade de sinais de movimento recebidos e do componente de flexibilidade residual modal normal real estimado.

Sumário da Invenção

De acordo com modalidades preferida da invenção, o fluxo de massa de um material em um conduto é estimado pela filtragem seletiva de modo de uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento do conduto para gerar uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo que os sinais de movimento filtrados com seleção de modo representem, de preferência, o movimento associado com um modo de vibração do conduto. Uma pluralidade de estimativas de fase são geradas a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo. Uma estimativa de fluxo de massa é gerada a parir da pluralidade de estimativas de fase. A pluralidade de estimativas de fase podem ser estimadas utilizando-se uma referência de fase derivada a partir de um da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

Em algumas modalidades da invenção, uma transformação de modo é aplicada junto a pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de resposta de modo em um domínio de coordenada de modo. Uma transformação com seleção de modo é aplicada junto à pluralidade de sinais de resposta de modo para gerar a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo. Em outras modalidades da invenção, uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo é estimada. O primeiro e segundo sinais de referência de quadratura são gerados baseado na freqüência estimada. A pluralidade de estimativas de fase são geradas a partir da pluralidade de si-

nais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

Ainda em outras modalidades da invenção, uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo são geradas a partir da pluralidade de estimativas de fase e a estimativa de fluxo de massa é gerada a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo. A pluralidade de estimativas de diferença de tempo podem ser geradas a partir da pluralidade de estimativas de fase por se dividir a pluralidade de estimativas de fase por uma freqüência do modo para gerar uma pluralidade de valores de diferença de tempo. Uma pluralidade de diferenças de tempo de referência de fluxo zero podem ser aplicadas junto à pluralidade de valores de diferença de tempo para gerar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo. A freqüência do modo pode ser estimada a partir de um sinal de modo de movimento gerado a partir da pluralidade de sinais de movimento. A densidade do material no conduto também pode ser estimada a partir da freqüência do modo estimada.

De acordo com outros aspectos da invenção, o fluxo de massa de um material em um conduto pode ser determinado por se processar uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento do conduto utilizando um sinal da pluralidade de sinais de movimento como uma referência de tempo para gerar uma igual pluralidade de estimativas de diferença e estimar um parâmetro de inclinação de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença com uma igual pluralidade de diferenças de refe-

rência representando o movimento do conduto em um fluxo de massa conhecido. A estimativa do fluxo de massa pode ser estimada a partir do parâmetro de inclinação estimado e do fluxo de massa conhecido.

Em algumas modalidades da invenção, uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de referência é gerada. A pluralidade de estimativas de diferença é multiplicada por um pseudo-inverso da matriz ampliada para se determinar o parâmetro de inclinação. Em outras modalidades, a pluralidade de estimativas de diferença é multiplicada por um pseudo-inverso das diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação. O parâmetro de graduação também pode ser repetidamente estimado para determinar o parâmetro de inclinação, utilizando, por exemplo, um procedimento de estimativa do Quadrado da Menor Média (LMS).

De acordo com outros aspectos da invenção, um aparelho inclui um conduto configurado para conter um material. Uma pluralidade de transdutores de movimento estão de forma operacional associados com o conduto e podem ser operados para produzir uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento do conduto. Um circuito de processamento de sinal recebe as pluralidade de sinais de movimento e filtra com seleção de modo a pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo, de modo que os sinais de movimento filtrados com seleção de modo representem, de preferência, o movimento associado com um modo de vibração do conduto. O circuito de processamento de sinal gera uma plu-

ralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e gera uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de fase. O circuito de processamento de sinal pode gerar a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma referência de fase derivada a partir de um sinal da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

Ainda de acordo com outras modalidades da invenção, um aparelho inclui um conduto e uma pluralidade de transdutores de movimento, de forma operacional associados com o conduto, os quais geram uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento do conduto. Um circuito de processamento de sinal recebe as pluralidade de sinais de movimento e processa a pluralidade de sinais de movimento utilizando um sinal da pluralidade de sinais de movimento como uma referência de tempo para gerar uma igual pluralidade de estimativas de diferença. O circuito de processamento de sinal estima um parâmetro de inclinação de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença com uma igual pluralidade de diferenças de referência representando o movimento do conduto em um fluxo de massa conhecido e gera uma estimativa de fluxo de massa a partir do parâmetro de inclinação estimado e do fluxo de massa conhecido. O circuito de processamento de sinal pode gerar uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de referência e pode multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença por um pseudo-inverso da matriz ampliada para determinar o parâmetro de inclinação. Alternativamente, o

circuito de processamento de sinal pode multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença por um pseudo-inverso das diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação. O processamento de sinal pode também repetidamente estimar a função de graduação.

Pode ser visto que um aspecto da invenção é um parelho compreendendo um aparelho operacionalmente associado com uma estrutura e operacional para produzir uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura; um aparelho que filtra a pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura; e um aparelho que gera uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo de modo que os sinais de movimento filtrados com seleção de modo representem, de preferência, o movimento associado com um modo de vibração da estrutura.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de fase.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo entre a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e um aparelho para gerar uma medida de correlação a partir da pluralidade de

estimativas de diferença de tempo; e um aparelho para determinar a condição de um sistema medidor de fluxo de massa a partir da medida de correlação gerada.

De preferência, o aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende um aparelho para gerar a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma referência de fase derivada a partir de um sinal da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o aparelho para a filtragem seletiva de modo compreende um aparelho para aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de resposta modal em um domínio de coordenada de modal; e um aparelho para aplicar uma transformação seletiva de modo junto à pluralidade de sinais de resposta modal para gerar a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende um aparelho para estimar uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; um aparelho para gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e um aparelho para gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

De preferência, o aparelho para gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais

de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende um aparelho para multiplicar um sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos respectivos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos componentes de sinal real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e um aparelho para estimar um arcotangente de um quociente dos sinais componente real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar uma estimativa de fase.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

De preferência, o aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende um aparelho para dividir a pluralidade de estimativas de fase por uma freqüência do modo para gerar uma pluralidade de valores de diferença de tempo.

De preferência, o aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase adicionalmente compreende um aparelho para aplicar uma pluralidade de diferenças de tempo

de referência de fluxo zero junto à pluralidade de valores de diferença de tempo para gerar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

De preferência, o aparelho para a filtragem seletiva de modo compreende um aparelho para aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar um sinal de movimento modal em um domínio de coordenada modal e um aparelho para estimar a freqüência do modo a partir do sinal de movimento modal.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para estimar a densidade de material no conduto a partir da freqüência do modo estimada.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para estimar um parâmetro de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença de tempo com uma pluralidade de diferenças de tempo de referência representando o movimento da estrutura sob uma perturbação conhecida.

De preferência, o aparelho onde a perturbação é o fluxo de massa.

De preferência, o aparelho para estimar o parâmetro compreende um aparelho para gerar uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de tempo de referência; e um aparelho para multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso da matriz ampliada para determinar o parâmetro.

De preferência, o aparelho para estimar um parâmetro compreende a etapa de repetidamente estimar a função de graduação.

De preferência, o aparelho para repetidamente estimar um parâmetro compreende a etapa de aplicar o procedimento de estimativa do Quadrado da Menor Média (LMS).

De preferência, o aparelho para estimar um parâmetro é precedido pelo aparelho para processar uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura sob a perturbação conhecida para gerar a pluralidade de diferenças de tempo de referência.

De preferência, o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de inclinação e adicionalmente compreendendo um aparelho para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir do parâmetro de inclinação e do fluxo de massa conhecido.

De preferência, o aparelho para estimar um parâmetro de inclinação compreende um aparelho para multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por uma pseudo-inverso da pluralidade de diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação.

De preferência, o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de intercepção e adicionalmente compreendendo um aparelho para determinar uma condição do sistema a partir do parâmetro de intercepção.

De preferência, o aparelho para a filtragem seletiva de modo é precedido por um aparelho para receber a pluralidade de sinais de movimento a partir de uma pluralidade de transdutores de movimento de forma operacional associados

com a estrutura e onde o dito aparelho para determinar uma condição do sistema compreende um aparelho para determinar uma condição de um transdutor de movimento a partir do parâmetro de intercepção.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para estimar a densidade de um material na estrutura a partir da freqüência do modo estimada.

De preferência, o aparelho adicionalmente compreendendo um aparelho para estimar uma freqüência de um primeiro sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e um aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir de um segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e da freqüência estimada.

De preferência, o aparelho para gerar uma estimativa de diferença compreende um aparelho para gerar um primeiro e segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e um aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

De preferência, o aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende um aparelho para gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais

de referência; e um aparelho para gerar uma estimativa de diferença de tempo a partir da estimativa de fase.

De preferência, o aparelho para gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende um aparelho para multiplicar o segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais componentes real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e um aparelho para estimar um arcotangente de um quociente do sinais componentes real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar a estimativa de fase.

Pode ser visto que um aspecto adicional da invenção é um método para operar um aparelho, o método compreendendo a etapa de estimar o movimento de uma estrutura, a etapa de filtragem seletiva de modo de uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura; e a etapa de gerar uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo representando o movimento associado com uma modo de vibração da estrutura.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de fase.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo as etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e gerar uma medida de correlação a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo; e determinar uma condição do sistema de medidor de fluxo de massa a partir da medida de correlação gerada.

De preferência, o método onde a dita etapa para gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende a etapa de gerar a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma referência de fase derivada a partir de um da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o método onde a dita etapa de aplicar um filtro seletivo de modo compreende as etapas de aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de resposta modal em um domínio de coordenada modal; e aplicar uma transformação seletiva de modo junto à pluralidade de sinais de resposta modal para gerar a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende as etapas de estimar uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtra-

dos com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de multiplicar um sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos respectivos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais componentes real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e estimar um arcotangente de um quociente dos sinais componentes real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar uma estimativa de fase.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende a etapa de dividir a pluralidade de estimativas de fase por uma freqüência do modo para gerar uma pluralidade de valores de diferença de tempo.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase adicionalmente compreende a etapa de aplicar uma pluralidade de diferenças de tempo de referência de fluxo zero junto à pluralidade de valores de diferença de tempo para gerar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende corrigir a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma pluralidade de valores de fase de fluxo zero.

De preferência, o método onde a dita de etapa de filtragem seletiva de modo compreende a etapa de aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar um sinal de movimento modal em um domínio de coordenada modal e onde o método adicionalmente compreende a etapa de estimar a freqüência do modo a partir do sinal de movimento modal.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de estimar a densidade do material no conduto a partir da freqüência de modo estimada.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo a etapa de estimar um parâmetro de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença de tempo com uma pluralidade de diferenças de tempo de referência representando o movimento da estrutura sob uma perturbação conhecida.

De preferência, o método onde a perturbação é o fluxo de massa.

De preferência, o método onde a dita etapa de estimar um parâmetro compreende as etapas de gerar uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de tempo de referência; e multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso da matriz ampliada para determinar o parâmetro.

De preferência, o método onde a dita etapa de estimar um parâmetro compreende a etapa de repetidamente estimar a função de graduação.

De preferência, o método onde a dita etapa de repetidamente estimar compreende a etapa de aplicar um procedimento de estimativa do Quadrado da Menor Média (LMS).

De preferência, o método onde a dita etapa de estimar um parâmetro é precedida pela etapa de processar uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura sob a perturbação conhecida para gerar a pluralidade de diferenças de tempo de referência.

De preferência, o método onde o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de inclinação e adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir do parâmetro de inclinação e do fluxo de massa conhecido.

De preferência, o método onde a dita etapa de estimar uma parâmetro de inclinação compreende a etapa de multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo

por um pseudo-inverso da pluralidade de diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação.

De preferência, o método onde o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de intercepção e adicionalmente compreendo a etapa de determinar uma condição do sistema a partir do parâmetro de intercepção.

De preferência, o método onde a dita etapa de filtragem seletiva de modo é precedida pela etapa de receber a pluralidade de sinais de movimento a partir de uma pluralidade de transdutores de movimento de forma operacional associados com a estrutura e onde a dita etapa de determinar uma condição do sistema compreende a etapa de determinar uma condição de um transdutor de movimento a partir do parâmetro de intercepção.

De preferência, o método adicionalmente compreendendo estimar a densidade de um material na estrutura a partir da freqüência do modo estimada.

De preferência, o método compreendendo as etapas de estimar uma freqüência de um primeiro sinal de movimento filtrado com seleção de modo dentre a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e gerar uma estimativa de diferença a partir de um segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo dentre a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e da freqüência estimada.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma estimativa de diferença compreende as etapas de gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratu-

ra baseado na freqüência estimada; e gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

De preferência, o método onde a etapa de gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência; e gerar uma estimativa de diferença de tempo a partir da estimativa de fase.

De preferência, o método onde a dita etapa de gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de multiplicar o segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelo primeiro e pelo segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais componentes real e imaginário do segundos sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e estimar um arcotangente de um quociente dos sinais componentes real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar a estimativa de fase.

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Filtro Seletivo de Modo: Um filtro seletivo de modo opera no domínio físico-modal-físico para passar somente os modos desejado para o resto da cadeia de processamento de sinal. Um filtro de passagem de modo consiste de um fil-

tro modal, de uma matriz de seleção e de uma matriz para converter a informação modal de volta para o domínio físico (normalmente utilizando a matriz de formato de modo, Φ, ou algum subconjunto da mesma).

Matriz de seleção de modo: Matriz diagonal com uns na localização correspondendo aos modo desejados.

Matriz de formato de modo: Matriz modal reduzida para as localizações físicas desejadas; transformação de domínio modal para domínio físico.

Modo de vibração: uma propriedade única de uma estrutura que pode ser utilizada para definir como a estrutura irá responder (mover-se) à força. Em termos matemáticos, um vetor de Eigen da matriz de equações de movimento da estrutura (algumas vezes chamada de matriz dinâmica).

Estimativa de fase: O diferença (em radianos ou em graus) entre dois sinais sinoidais. Qualquer sinal sinoidal pode ser decomposto em 3 parâmetros constantes, Amplitude, Fase e Freqüência, os quais definem o valor do sinal a qualquer tempo t. Os sinais de coleta podem ser quase exatamente representados como sinóides, com uma freqüência comum e uma amplitude e fase para cada um. A diferença na fase entre os sinais de coleta é proporcional ao fluxo.

Medida de correlação: A correlação é uma medida de quanto de uma quantidade de saída (por exemplo, movimento, energia, delta t, etc.) está relacionada com uma quantidade de entrada (por exemplo, força, energia, fluxo, etc.). Pode ser utilizada para confirmar se a relação assumida (por exemplo, o fluxo de massa é proporcional ao retardo de tem-

po) entre os valores medidos e/ou calculados se mantém verdadeira. Uma alteração de boa correlação para correlação ruim pode implicar em que a relação assumida não mais se mantém verdadeira, por exemplo, devido a um falha de coleta. A correlação ruim também pode ser devido à energia adicional sendo colocada em um sistema que não estava presente durante a configuração ou calibragem inicial. Por exemplo, um sensor Coriolis que trabalha bem em uma condição de laboratório, com a única entrada de energia sendo o acionador, pode dar erros na medida de fluxo quando sujeito aos fluxos ruidosos causados pela injeção de ar, desde que não existe energia adicional significativa devido ao fluxo. Uma medida de correlação, tal como o erro padrão da estimativa, pode identificar que o sistema se alterou.

Transformação Modal: Uma alteração nos sistemas de coordenadas do domínio físico para o domínio modal, definido como $x = \Phi\eta$, onde η é a coordenada modal. A coordenada modal é uma destas idéias matemáticas que pode ser pensadas como definindo alguma coisa e então vendo se a mesma é uma definição útil. Também pode ser pensada como alguma coisa simples como ir de definir um círculo no plano x-y para utilizar coordenadas polares, as quais requerem que tanto x como y variem, para utilizar as coordenadas polares r e θ, onde θ tem que variar. A transformação para novas coordenadas simplifica a descrição do sistema.

Primeiro e segundo sinais de referência de quadratura: um modo padrão para demodular sinais sinoidais. A demodulação é um método para estimar a amplitude e a fase de

qualquer sinóide, uma vez que sua freqüência seja conhecida. O filtro de entalhe proporciona a estimativa de freqüência dos sinais de coleta. A partir da estimativa de freqüência, a função de mexer gera duas sinóides na mesma freqüência, 90 graus fora de fase uma com a outra (a definição da quadratura, 90 graus em fase), normalmente em alguma amplitude de unidade.

Função de graduação: Multiplicação de um sinal por uma constante, ou um vetor de constantes.

Matriz ampliada: Ampliar uma matriz é adicionar fileiras ou colunas para uma dada matriz. Utilizada para combinar uma matriz desconhecida com uma constante conhecida para utilizar toda a dimensão do problema, isto é, adicionar uma coluna de uns, ou uma fileira com zero na mesma. Ampliar o parâmetro de inclinação com o parâmetro de intercepção é uma técnica de ajuste de curva de menores quadrados.

Parâmetro de Inclinação e de Intercepção: A equação $y = mx + b$ é uma representação paramétrica de uma linha. m é o parâmetro de inclinação, b é o parâmetro de intercepção.

Pseudo-inverso da matriz ampliada: Matematicamente, uma linha pode ser ajustada para exatamente dois pontos. Entretanto, quaisquer dois pontos de dado também possuem um componente de ruído desconhecido. Ajustar uma linha para cada 2 pontos fornece uma estimativa ruidosa da linha. A utilização de vários conjuntos de pontos de dado pode fazer a média do ruído de vida útil real, fornecendo uma estimativa melhor, menos ruidosa dos parâmetros de inclinação e de intercepção. Um modo para ajustar uma linha reta através de

vários pontos com muitos ruídos é utilizar uma técnica de menores quadrados. Uma técnica de menores quadrados minimiza a soma das distâncias de todos os pontos de dado a partir da linha ajustada. Um pseudo-inverso é um modo eficiente, padrão, para implementar um processo de ajuste de menores quadrados. A utilização da matriz ampliada no pseudo-inverso encontra ambos parâmetros de inclinação e de intercepção em um cálculo. Ampliar a matriz para o pseudo-inverso permite que a linha de melhor ajuste possua uma parâmetro de intercepção não zero, isto é, ela não tem que passar através da origem.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A FIG. 1é um diagrama esquemático conceitualmente ilustrando uma estrutura de sensor de fluxo com tubo curvo.

A FIG. 2 é um diagrama esquemático conceitualmente ilustrando uma estrutura de sensor de fluxo com tubo reto.

A FIG. 3 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho de estimativa de fluxo de massa de acordo com as modalidades da invenção.

A FIG. 4 é um diagrama esquemático ilustrando um circuito de processamento de sinal de acordo com outras modalidades da invenção.

A FIG. 5 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho de estimativa de fluxo de massa de acordo com outras modalidades da invenção.

A FIG. 6 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho para estimar o fluxo de massa e a densidade de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 7 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho para gerar as estimativas de fase de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 8 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho para gerar estimativas de fase de acordo com outras modalidades da invenção.

A FIG. 9 é um diagrama esquemático ilustrando um aparelho para gerar estimativas de diferença de tempo de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 10 é um fluxograma ilustrando as operações para estimar o fluxo de massa de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 11 é um fluxograma ilustrando as operações para estimar o fluxo de massa de acordo com outras modalidades da invenção.

As FIGS. 12 e 13 são diagramas de forma de onda ilustrando as operações de estimativa de fluxo de massa de acordo com a invenção.

A FIG. 14 é um fluxograma ilustrando as operações para repetidamente estimar um vetor de graduação do fluxo de massa de acordo com modalidades da presente invenção.

A FIG. 15 é um fluxograma ilustrando operações para gerar estimativas de fase de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 16 é um fluxograma ilustrando as operações para estimar o fluxo de massa de acordo com outras modalidades da invenção.

A FIG. 17 é um fluxograma ilustrando as operações para gerar as estimativas de diferença de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 18 é um fluxograma ilustrando operações para estimar o fluxo de massa de acordo com modalidades da invenção.

A FIG. 19 é um fluxograma ilustrando as operações para estimar a densidade de acordo com modalidades da invenção.

As FIGS. 20A, 20B e 21 até 27 são diagramas de forma de onda ilustrando efeitos típicos de alterações do sistema de acordo com aspectos da invenção.

As FIGS. 28 até 30 são fluxogramas ilustrando operações para monitorar a condição do sistema e compensar as alterações do sistema de acordo com modalidades da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES

A presente invenção será agora mais totalmente descrita de maneira mais completa daqui para frente com referência aos desenhos acompanhantes, nos quais as modalidades preferidas da invenção são apresentadas. Esta invenção pode, entretanto, ser incorporada em várias formas diferentes e não deve ser construída como limitada às modalidades expostas aqui dentro; ao invés disso, estas modalidades são proporcionadas de modo que esta revelação será inteira e completa e irá transportar completamente o escopo da invenção para os com conhecimento na técnica. Números iguais referem-se aos elementos iguais do início ao fim. Como será apreciado pelos com conhecimento na técnica, a presente in-

venção pode ser incorporada como sistemas (aparelho), métodos, ou produtos de programa de computador.

As modalidades da presente invenção descritas aqui dentro relacionam-se com os medidores de fluxo de massa Coriolis. Os com conhecimento na técnica irão apreciar, entretanto, que a invenção descrita aqui dentro geralmente é aplicável para a determinação de movimento em uma ampla variedade de estruturas mecânicas e assim o aparelho e métodos da presente invenção não estão limitados à medição de fluxo de massa Coriolis.

Como será apreciado pelos com conhecimento na técnica, a presente invenção pode ser incorporada como aparelho e/ou método e/ou produto de programa de computador. Por conseqüência, a presente invenção pode ser implementada em hardware ou em uma combinação de aspectos de hardware e de software. Adicionalmente, a presente invenção também pode tomar a forma de um produto de programa de computador incluindo um meio de armazenamento utilizável por computador possuindo o código de programa legível por computador incorporado no meio. Qualquer meio legível por computador adequado pode ser utilizado, incluindo dispositivos de memória semicondutora (por exemplo, RAMs, ROMs, EEPROMs e semelhantes), discos rígidos, CD-ROMs, dispositivos de armazenamento óticos e dispositivos de armazenamento magnéticos.

O código de programa de computador para realizar as operações da presente invenção pode ser escrito em uma linguagem de programação orientada a objeto, tal como Java® ou C++ e/ou em uma linguagem de programação de procedimen-

tos, tal como "C". O código de programa pode executar em um único computador ou dispositivo de processamento de dados, tal como um microcontrolador, microprocessador, ou processador de sinal digital (DSP), ou pode ser executado em vários dispositivos, por exemplo, em vários dispositivos de processamento de dados que comunicam-se via barramentos de dados seriais ou paralelos dentro de uma placa de circuito eletrônico, chassi ou conjunto, ou os quais formam parte de uma rede de comunicações de dados tal como uma rede de área local (LAN), rede de área ampla (WAN), ou a Internet.

A presente invenção é descrita abaixo com referência às ilustrações de fluxograma e/ou aos diagramas de blocos de métodos , aparelho (sistemas) e produtos de programa de computador de acordo com as modalidades da invenção. Será entendido que cada bloco das ilustrações de fluxograma e/ou dos diagramas de blocos e combinações de blocos nas ilustrações de fluxograma e/ou nos diagramas de blocos, pode ser implementado pelo código de programa de computador (instruções). Este código de programa de computador pode ser proporcionado para um processador de um computador de propósito geral, computador de propósito especial, ou para outro aparelho de processamento de dados programável para produzir um mecanismo, de modo que as instruções, as quais executa via o processador do computador ou de outro aparelho de processamento de dados programável, criem meios para implementar as funções especificadas nos bloco ou nos blocos do fluxograma e/ou do diagrama de blocos.

Estes produtos de programa de computador também podem ser incorporados em uma meio de armazenamento legível por computador (por exemplo, disco magnético ou memória semicondutora, memória de código magnética ou semelhante) que pode direcionar um computador ou outro aparelho de processamento de dados programável para funcionar de uma maneira particular, de modo que o programa de computador armazenado na memória legível do computador produza um artigo de fábrica incluindo o dispositivo de instrução que implementa a função especificada no bloco ou nos blocos do fluxograma e/ou do diagrama de blocos.

O código de programa de computador também pode ser carregado em um computador ou em outro aparelho de processamento de dados programável para causar uma série de etapas de operação para serem executadas no computador ou em outros aparelhos programáveis para produzir um processo implementado por computador de modo que o código que executa no computador ou no outro aparelho programável proporcione as etapas para implementar as funções especificadas no bloco ou nos blocos do fluxograma e/ou do diagrama de blocos.

COMPORTAMENTO MODAL DE UM CONDUTO QUE VIBRA

O comportamento de uma estrutura que vibra tal como um conduto do medidor de fluxo de massa Coriolis pode ser descrito em termos de um ou mais modos naturais possuindo as freqüências de vibração naturais associadas. Os modos e as freqüências naturais associadas podem ser matematicamente descritos por vetores de Eigen e pelos valores de Eigen associados, os vetores de Eigen sendo únicos em magnitu-

de relativa mas não em magnitude absoluta e ortogonais com respeito à massa e à rigidez da estrutura. O conjunto de vetores linearmente independentes pode ser utilizado como uma transformação para equações de desacoplamento que descrevem o movimento da estrutura. Em particular, a resposta da estrutura à uma excitação pode ser representada como uma superposição de modos graduados, a graduação representando a contribuição de cada modo para o movimento da estrutura. Dependendo da excitação, alguns modos podem contribuir mais do que outros. Alguns modos podem ser indesejáveis pelo fato deles poderem contribuir com energia na freqüência ressonante dos modos desejados e portanto, podem adulterar as medidas tomadas na freqüência ressonante de um modo desejado, tal como as medidas de diferença de fase tomadas na freqüência de acionamento.

Os medidores de fluxo de massa Coriolis convencionais tipicamente utilizam a filtragem estrutural e temporal para reduzir os efeitos dos modos indesejáveis. As técnicas de filtragem estrutural convencionais incluem utilizar aspectos mecânicos tal como barras de fixação projetadas para desacoplar os modos de curvatura em fase e fora de fase, atuadores posicionados de modo que eles sejam menos prováveis de excitar modos indesejáveis e transdutores posicionados de modo que eles seja menos sensíveis aos modos indesejáveis. As técnicas de filtragem estrutural podem ser muito eficazes em reduzir a energia de modos indesejáveis, mas podem ser limitadas por exigências geométricas e de fabricação.

As técnicas de filtragem temporal tipicamente modificam os sinais do transdutor baseado nos parâmetros do domínio do tempo ou do domínio de freqüência. Por exemplo, um medido de fluxo de massa Coriolis típico pode incluir os filtros no domínio do tempo projetados para remover os componentes de freqüência que estão de forma significativa relacionados com os modos indesejados. Entretanto, a energia fora de ressonância dos modos indesejados pode contribuir de forma considerável para a energia na freqüência ressonante de um modo desejado. Pelo fato dos filtros no domínio de freqüência geralmente serem ineficazes em distinguir a contribuição de vários modos em uma dada freqüência, a contribuição de modos indesejados em uma freqüência de medida pode ser uma fonte de erro significativa nas medidas de parâmetro do processo.

Uma estrutura de conduto do sensor com amortecimento insignificante e fluxo zero pode ser assumido como possuindo os modos de vibração puramente natural ou normal reais, isto é, em cada modo, cada ponto da estrutura alcança a diferença máxima simultaneamente. Entretanto, um conduto real possuindo amortecimento não insignificante e um material fluindo através do mesmo possui uma resposta à excitação geralmente complexa, isto é, os pontos da estrutura geralmente não alcançam simultaneamente a amplitude máxima. O movimento da estrutura do conduto pode ser descrito como um modo complexo possuindo os componentes real e imaginário ou, alternativamente, os componentes de magnitude e de fase. As

forças Coriolis comunicadas pelo material que flui tornam o movimento do conduto do sensor matematicamente complexo.

Mesmo se complexo, o movimento de uma estrutura de conduto pode ser descrito como uma superposição do modo natural graduado ("normal" ou "grau único de liberdade"(SDOF)), a medida que as partes real e imaginária de um modo complexo são, por definição, linearmente independentes. Para representar o movimento complexo, coeficientes de graduação complexos podem ser utilizados em se combinar os modos normais reais constituintes. Os modos normais reais particulares podem estar muito correlacionados com o componente imaginário do modo complexo enquanto estando de forma significativa menos correlacionados com o componente real do modo complexo. Por conseqüência, estes modos normais reais particulares podem estar mais estritamente correlacionados com as forças Coriolis associadas com o material no conduto do sensor e assim podem proporcionar informação para gerar uma estimativa precisa de um parâmetro associado com o material.

Um modelo conceitual de um tipo de sensor do medidor de fluxo de massa Coriolis 100 é proporcionado na FIG. 1. Os transdutores de movimento 105A, 105B, 105C, 105D (por exemplo, transdutores de velocidade) estão posicionados para detectar o movimento relativo do primeiro e do segundo conduto curvos 103A, 103B do sensor 100 que são vibrados por um atuador 106 a medida que um material 108 flui através dos condutos 103A, 103B, os transdutores de movimento 105A, 105B, 105C, 105D produzindo os sinais de movimento 109. Um sensor do medidor de fluxo de massa Coriolis de "tubo reto" 200

ilustrado na FIG. 2 inclui um conduto 203 configurado para conter um material 208 de uma tubulação 207 conectada com o sensor 200 nas flanges 202. Dentro de uma caixa 204 envolvendo o conduto 203, um atuador 206 é operativo para excitar o conduto 203. Os transdutores de movimento 205A, 205B, 205C, 205D (por exemplo, transdutores de velocidade, acelerômetros ou outros dispositivos de percepção de movimento) estão posicionados ao longo do conduto 203. Os transdutores de movimento 205A, 205B, 205C, 205D produzem os sinais de movimento 209 representando o movimento do conduto 203 em resposta a uma pluralidade de forças F que podem incluir, por exemplo, uma força de acionamento comunicada pelo atuador 206, forças Coriolis surgindo do material que flui 208, forças de pressão exercidas pelo material 208 e outras forças estranhas tal como as forças comunicadas pela tubulação 207 e forças geradas por bombas, compressores e por outro equipamento (não apresentado) conectados com a tubulação 207 e transportadas para o conduto 203 via as flanges 202.

Para uma estrutura de medidor de fluxo tal como estas ilustradas nas FIGS. 1 e 2, um vetor de resposta x pode ser construído a partir dos sinais produzidos pelos transdutores de movimento que estão operacionalmente associados com a estrutura, tal como os sinais de movimento 109, 209 produzidos pelos transdutores de movimento 105A, 105B, 105C, 105D, 205A, 205B, 205C, 205D das FIGS. 1 e 2. Por exemplo, os sinais de movimento podem ser amostrados para gerar os valores de sinal de movimento x_1, x_2, ..., x_n de um vetor de resposta x. Uma matriz modal normal real Φ, ou

seja, uma matriz de vetor de Eigen relacionando o vetor de movimento físico com um vetor de movimento modal η representando o movimento em uma pluralidade de modos naturais (SDOF), podem estão ser identificados de modo que:

$$x = \Phi\eta \qquad (1)$$

A matriz modal Φ pode ser identificada utilizando-se uma série de técnicas, incluindo as técnicas de tentativa e erro ou inversa.

MEDIDORES DE FLUXO DE MASSA ILUSTRATIVOS

De acordo com as modalidades da presente invenção, as técnicas de filtragem modal seletiva são utilizadas para produzir os sinais de movimento filtrados com seleção de modo que são então utilizados para gerar as estimativas de fase, as quais por sua vez são utilizadas para gerar uma estimativa de fluxo de massa. Modalidades ilustrativas de acordo com este aspecto da presente invenção serão agora descritos, em particular, as modalidades utilizando os sensores de "tubo reto" tal como o sensor 200 da FIG. 2. Entretanto, os com conhecimento na técnica irão apreciar que a presente invenção também é aplicável junto às estruturas com conduto curvado, tal como esta utilizada no sensor 100 ilustrado na FIG. 1, bem como junto à outras estruturas contendo material utilizadas em medidores de fluxo de massa, densitômetros e semelhantes. Os com conhecimento na técnica irão adicionalmente apreciar que a presente invenção também é aplicável para a caracterização de movimento em uma variedade de outras estruturas.

A FIG. 3 ilustra um aparelho de estimativa de fluxo de massa 300 de acordo com modalidades da presente invenção. O aparelho 300 inclui um conduto contendo material 203 e os transdutores de movimento operacionalmente associados 205A, 205B, 205C, 205D de um sensor do medidor de fluxo 200, junto com um circuito de processamento de sinal 301 que é operacional para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir dos sinais de movimento 305 produzidos pelos transdutores de movimento 205A, 205B, 205C, 205D. Números iguais são utilizados nas FIGS. 2 e 3 para denotar componentes iguais do sensor 200, cuja descrição detalhada não será repetida aqui levando-se em consideração a descrição da FIG. 2.

O circuito de processamento de sinal 301 inclui um filtro seletivo de modo 310 que é configurado para receber os sinais de movimento 305 e operacional para seletivamente passar um ou mais componentes dos sinais de movimento 305 para produzir uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo 315. O circuito de processamento de sinal 301 também inclui um estimador de fase 320 que responde aos sinais de movimento filtrados com seleção de modo 315 e operacional para gerar uma pluralidade de estimativas de fase 325 a partir dos mesmos. O circuito de processamento de sinal 301 adicionalmente inclui um estimador de fluxo de massa 330 que responde ao estimador de fase 320 e produz uma estimativa de fluxo de massa 335 a partir da pluralidade de estimativas de fase 325.

A FIG. 4 ilustra uma implementação ilustrativa de um filtro seletivo de modo 410, do estimador de fase 420 e do estimador de fluxo de massa 430 de acordo com modalidades da presente invenção. Uma pluralidade de sinais de movimento 405a, por exemplo, saídas analógicas a partir do transdutores de velocidade ou de outros transdutores de movimento operacionalmente associados com um conduto ou com outro vaso contendo material, é amostrada e digitalizada por um conversor A/D 440, produzindo uma pluralidade de sinais de movimento digitais 405b. Os sinais de movimento digitais 405b são processados por um filtro seletivo de modo digital 410 para produzir uma pluralidade de sinais de movimento digitais filtrados com seleção de modo 415. Um estimador de fase digital 420 gera uma pluralidade de estimativas de fase digitais 425 a partir da pluralidade de sinais de movimento digitais filtrados com seleção de modo 415. Um estimador de fluxo de massa digital 430 produz uma estimativa de fluxo de massa digital 435 a partir da pluralidade de estimativas de fase digitais 425. Como apresentado, o filtro seletivo de modo 410, o estimador de fase 420 e o estimador de fluxo de massa 430 podem ser implementados como código de programa legível por computador executado por um processador de dados 450, por exemplo, uma combinação de um computador (por exemplo, um microcontrolador, microprocessador, processador de sinal digital (DSP), ou outro dispositivo de computação) com um meio de armazenamento associado (por exemplo, memória semicondutora, armazenamento magnético e/ou armazenamento ótico).

A FIG. 5 ilustra um aparelho de estimativa de fluxo de massa ilustrativo 500 de acordo com outras modalidades da presente invenção. O aparelho 500 inclui um conduto contendo material 203 e os transdutores de movimento operacionalmente associados 205A, 205B, 205C, 205D de um sensor de tubo reto 200 tal como este descrito com referência à FIG. 2, cuja a descrição adicionalmente detalhada não será repetida levando-se em consideração a descrição da FIG. 2. Um circuito de processamento de sinal 501 inclui um filtro seletivo de modo 510 que é configurado para receber os sinais de movimento 505 produzidos pelo sensor 200 e operacional para seletivamente passar um ou mais componentes dos sinais de movimento 505 para produzir uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo 515. O filtro seletivo de modo 510 é adicionalmente operacional para produzir pelo menos um sinal de movimento modal 517, isto é, pelo menos um sinal que represente o movimento do conduto 203 em um domínio modal definido por pelo menos um modo natural (SDOF) do conduto 203. O filtro seletivo de modo 510 de preferência é derivado de uma caracterização modal do sensor 200.

O circuito de processamento de sinal 501 adicionalmente inclui um estimador de fase 520 que responde ao filtro seletivo de modo 510 e é operacional para gerar uma pluralidade de estimativas de fase 525 a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo 515. O circuito de processamento de sinal 501 também inclui um estimador de fluxo de massa 530 que responde ao estimador de fase 520 e produz uma estimativa de fluxo de massa 535 a

partir da pluralidade de estimativas de fase 525 utilizando pelo menos uma estimativa de freqüência do modo 545 gerada por um estimador de freqüência do modo 540. O estimador de freqüência do modo 540 produz a pelo menos uma estimativa de freqüência do modo 545 em resposta ao pelo menos um sinal de movimento modal 517. O circuito de processamento de sinal 501 adicionalmente inclui um estimador de densidade 550 que responde à pelo menos uma estimativa de freqüência do modo 545 para gerar uma estimativa de densidade 555.

A FIG. 6 ilustra um aparelho 600 operacional para estimar o fluxo de massa e a densidade a partir de uma pluralidade de sinais de movimento 605, de acordo com modalidades da invenção. O aparelho 600 inclui um filtro seletivo de modo 610, um estimador de fase 620, um estimador de fluxo de massa 630, um estimador de freqüência do modo 640 e um estimador de densidade 650. O filtro seletivo de modo (ou de "passagem de modo") 610 inclui uma transformação modal 612 que transforma uma pluralidade de sinais de movimento 605 em uma pluralidade de sinais de movimento modal 613 que representam o movimento em uma pluralidade de modos naturais, como descrito acima com referência à equação (1). O filtro seletivo de modo 610 também inclui uma transformação seletiva de modo 614 que seletivamente transforma a pluralidade de sinais de movimento modal 613 de volta para fora do domínio modal, produzindo os sinais de movimento filtrados com seleção de modo 615 que são filtrados de modo que os componentes dos sinais de movimento original 615 que estão associados com um ou mais modos desejados sejam preferencialmente pas-

sados em relação aos componentes associados com outros modos naturais não desejados. Os sinais de movimento modal 613 são passados à diante para o estimador de freqüência do modo 640, o qual gera uma ou mais estimativas de freqüência do modo 645.

Os sinais de movimento filtrados com seleção de modo 615 são passados à diante para o estimador de fase 620, o qual gera uma pluralidade de estimativas de fase 625 a partir dos mesmos utilizando uma referência de fase que é derivada a partir da pluralidade de sinais de movimento 605. Por exemplo, como descrito em detalhes com referência à FIG. 7 abaixo, a referência de fase pode ser derivada a partir de um ou mais sinais de movimento filtrados com seleção de modo 615. Alternativamente, a referência de fase pode ser derivada a partir de uma ou mais estimativas de freqüência do modo 645 geradas a partir de um ou mais sinais de movimento modal 613 pelo estimador de freqüência do modo 640.

As estimativas de fase 625 são passadas à diante para o estimador de fluxo de massa 630 que inclui um estimador de diferença de tempo 632 e um integrador espacial 634. Utilizando a uma ou mais estimativas de freqüência do modo 645 geradas pelo estimador de freqüência do modo 640, o estimador de diferença de tempo 632 gera uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo 633 a partir da pluralidade de estimativas de fase 625. O estimador de diferença de tempo 640 também pode utilizar as diferenças de tempo de referência de fluxo zero 631, isto é, valores representando diferenças de tempo sob uma condição de fluxo de massa zero

os quais podem adulterar as medidas em outras taxas de fluxo de massa, para gerar diferenças de tempo 633 que estão corrigidas para tal "deslocamento zero". Como descrito abaixo, uma estimativa de uma freqüência de modo de acionamento pode ser gerada pelo estimador de freqüência do modo 640 e as estimativas de fase podem ser divididas por esta freqüência do modo de acionamento estimada para se produzir estimativas de diferença de tempo não corrigidas. As estimativas de diferença de tempo não corrigidas podem então ser corrigidas utilizando-se as diferenças de tempo de referência de fluxo zero 631 (por exemplo, pela subtração das mesmas) para gerar as estimativas de diferença de tempo 633.

As estimativas de diferença de tempo 633 geradas pelo estimador de diferença de tempo 632 são proporcionadas para um integrador espacial 634. Como descrito em detalhes abaixo, o integrador espacial 634 pode determinar um parâmetro de inclinação de uma função do vetor de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença de tempo 633 com uma pluralidade de diferenças de tempo de referência 637 correspondendo a um fluxo de massa conhecido. Este parâmetro de inclinação pode então ser utilizado para gerar uma estimativa de fluxo de massa 635 a partir do fluxo de massa conhecido.

Como também apresentado na FIG. 6, o estimador de densidade 650 também pode utilizar a estimativa de freqüência do modo 645 para gerar uma estimativa de densidade do material para o qual o fluxo de massa está sendo determinado. O estimador de densidade 650 pode utilizar técnicas si-

milares a aquelas utilizadas para gerar uma estimativa de densidade 655 a partir de um sinal do transdutor filtrado com seleção que não é de modo. Por exemplo, de acordo com modalidades da presente invenção, as estimativas de densidade podem ser geradas por se utilizar as estimativas de freqüência modal em vez das estimativas de freqüência convencionais utilizadas nas patentes mencionadas acima.

As FIGS. 7 até 9 ilustram estruturas ilustrativas para implementar vários componentes da FIG. 6. Será apreciado que o filtro seletivo de modo 610, o estimador de fase 620, o estimador de fluxo de massa 630, o estimador de freqüência do modo 640 da FIG. 6, bem como as estruturas das FIGS. 7 até 9 podem ser implementados em um domínio digital, por exemplo, como módulos executáveis, subrotinas, objetos e/ou outros tipos de software e/ou firmware rodando em um microprocessador, microcontrolador, DSP ou em outro dispositivo de computação. Em tais implementações, "sinais", tal como os sinais de movimento modal 613, os sinais de movimento filtrados com seleção de modo 615 e as estimativas de fase 633 podem incluir vetores de valores de sinal digital que são produzidos em intervalos de cálculo e baseados nos quais os cálculos são executados para implementar as funções descritas. Entretanto, será apreciado que todos ou alguns destes sinais podem, em geral, ser digitais ou analógicos e que as operações executadas nos mesmos podem ser executadas por hardware digital, de propósito especial, e/ou por hardware analógico, análogo.

A FIG. 7 ilustra um exemplo de um estimador de fase 700 de acordo com modalidades da presente invenção. O estimador de fase 700 inclui um estimador de freqüência 710 que estima uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo 701, de uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo 701_1, 701_2, ..., 701_n. O estimador de freqüência 710 produz uma estimativa de freqüência 715 a qual é aplicada junto a um gerador de sinal de referência de quadratura 720 que gera o primeiro e o segundo (por exemplo, seno e coseno) sinais de referência 725a, 725b que têm a freqüência estimada e que estão em quadratura de fase com respeito um ao outro. O estimador de freqüência 710 pode, por exemplo, ser uma filtro de encaixe adaptável digitalmente implementado que é operacional para determinar a estimativa de freqüência 715 e o gerador de sinal de referência 720 pode gerar os sinais de referência de quadratura 725a, 725b utilizando uma função de "mexer". Entretanto, será apreciado que outras técnicas, incluindo outras técnicas de processamento de sinal digital ou analógico para gerar sinais de fase e de referência de quadratura, podem ser utilizadas para gerar a estimativa de freqüência 715 e/ou os sinais de referência de quadratura 725a, 725b. Por exemplo, ao invés de gerar a estimativa de freqüência 715 a partir de um sinal filtrado de forma seletiva em relação ao modo como apresentado na FIG. 7, a estimativa de freqüência pode ser uma estimativa de freqüência do modo, tal como uma ou mais das estimativas de freqüência do modo 645 produzidas pelo estimador de freqüência do modo 640 da FIG. 6.

O primeiro e o segundo sinais de referência de fase 725a, 725b são aplicados para uma pluralidade de calculadores de fase 730_1, 730_2, ..., 730_n, cada um dos quais gera as respectivas estimativas de fase 735_1, 735_2, ..., 735_n a partir dos respectivos sinais de movimento filtrados com seleção de modo 701_1, 701_2, ..., 701_n. As estimativas de fase 735_1, 735_2, ..., 735_n são então normalizadas com respeito a uma das estimativas de fase 735_1 por um normalizador 740 para produzir uma pluralidade de estimativas de fase normalizadas 745_1, 745_2, ..., 745_n. As estimativas de fase normalizadas 745_1, 745_2, ..., 745_n podem então ser utilizadas para estimar o fluxo de massa, como descrito acima com referência à FIG. 6.

Referindo-se novamente à FIG. 6, o estimador de freqüência de modo 640 pode utilizar as técnicas de estimativa de freqüência similares a aquelas descritas acima com referência à FIG. 7. Por exemplo, as técnicas de filtragem de encaixe adaptável de determinação de freqüência podem ser utilizadas para gerar pelo menos uma estimativa de freqüência 645 para pelo menos um dos sinais de movimento modal 617.

Operações de cálculo ilustrativas para demodular um sinal de movimento filtrado com seleção de modo 701j utilizando os sinais de referência de quadratura sintetizados (por exemplo, seno e coseno) 725a, 725b são ilustradas na FIG. 8. O sinal de movimento filtrado com seleção de modo 701j é separadamente multiplicado por cada um dos sinais de referência de quadratura 725a, 725b, gerando os sinais do componente real e imaginário 805b, 805a. Um calculador de

arcotangente 810 então calcula um arcotangente dos sinais de componente real e imaginário 805b, 805a para gerar uma estimativa de fase 735j. De preferência, os sinais de componente real e imaginário 805b, 805a são filtrados antes da aplicação junto ao calculador de arcotangente 810, de modo que componentes que não são DC dos sinais 805b, 805a seja atenuados.

A FIG. 9 ilustra uma estrutura de cálculo ilustrativa para gerar estimativas de diferença de tempo corrigidas 633 de acordo com modalidades da presente invenção. Um vetor das estimativas de fase 625 (o qual pode ser normalizado) é dividido por uma freqüência do modo estimada 645, de preferência uma ou mais freqüências associadas com um modo de acionamento. O vetor resultante das diferenças de tempo 915 é então corrigido por se subtrair um vetor correspondente das diferenças de tempo de referência de fluxo zero 631, produzindo-se um vetor de estimativas de diferença de tempo corrigido 633. Uma correção similar poderia alternativamente ser alcançada por se subtrair um vetor dos valores de fase associados com o fluxo zero a partir das estimativas de fase 735_1, 735_2, ..., 735_n descritas acima.

INTEGRAÇÃO ESPACIAL DAS ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA DE TEMPO

De acordo com outros aspectos da presente invenção, as estimativas de diferença de tempo, tal como as estimativas de diferença de tempo corrigidas descritas acima, podem ser processadas utilizando-se uma procedimento de "integração espacial" para produzir uma estimativa de fluxo de massa. De acordo com várias modalidades da presente invenção

descritas abaixo, várias técnicas podem ser utilizadas para determinar um parâmetro de inclinação que relaciona as estimativas de diferença de tempo associadas com um fluxo de massa desconhecido com as diferenças de tempo de referência associadas com um fluxo de massa conhecido, incluindo as técnicas pseudo-inversas de forma fechada e as técnicas repetitivas. Este parâmetro de inclinação pode ser utilizado para gerar uma estimativa do fluxo de massa desconhecido.

Como descrito no Pedido de Patente dos Estados Unidos Número de Série 09/116.410 mencionado acima, depositado em 16 de julho de 1998, um vetor Y_e dos valores de diferença de tempo no fluxo de massa conhecido F_c pode ser identificado e um fluxo de massa desconhecido pode ser descrito em termos deste vetor de diferença de tempo Y_e por uma multiplicação escalar, ou seja, um vetor das diferenças de tempo estimadas X_e para um fluxo de massa desconhecido pode ser graduado por um fator de graduação a (daqui para frente referido como uma "parâmetro de inclinação") para produzir o vetor de diferença de tempo de referência Y_e. De modo a determinar o fluxo de massa desconhecido, o fluxo de massa conhecido F_c é multiplicado pelo parâmetro de inclinação a. O vetor de diferença de tempo de referência Y_e e o vetor de estimativa de diferença de tempo X_e podem ser relacionado como:

$$x_e = aY_e + b \qquad (2)$$

Reorganizando-se a equação (2) obtém-se:

$$x_e = \begin{bmatrix} Y_e & \begin{matrix} 1 \\ M \\ 1 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = Zc, \qquad (3)$$

onde a matriz ampliada Z é formada por se ampliar o vetor de diferença de tempo de referência Y_e com uma coluna de uns. A equação (3) pode ser resolvida para o vetor de graduação c por ser multiplicar anteriormente o vetor de estimativa de diferença de tempo Xe pelo pseudo inverso W da matriz ampliada Z:

$$c = Z^{-1}X_e = WX_e, \qquad (4)$$

onde o operador de matriz inversa ($^{-1}$) é utilizado para denotar um pseudo inverso. Resolvendo-se para o vetor c e então multiplicando-se F_c pelo parâmetro de inclinação a do vetor c pode-se produzir uma estimativa do fluxo de massa.

As FIGS. 10 e 11 são ilustrações de fluxograma das operações ilustrativas para gerar uma estimativa do fluxo de massa a partir de uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo de acordo com várias modalidades da presente invenção. Os com conhecimento na técnica irão entender que as operações destas ilustrações de fluxograma podem ser implementadas utilizando-se instruções de computador. Estas instruções podem ser executadas em um computador ou em outro aparelho de processamento de dados, tal como o processador de dados 450 da FIG. 4, para criar um aparelho (sistema)

operacional para executar as operações ilustradas. As instruções de computador também podem ser armazenadas como código de programa legível por computador em uma meio legível por computador, por exemplo, uma memória de circuito integrado, um disco magnético, uma fita ou semelhantes, que podem direcionar um computador ou outro aparelho de processamento de dados para executar as operações ilustradas, assim proporcionando métodos para executar as operações ilustradas. O código de programa legível por computador também pode ser executado em um computador ou em outro aparelho de processamento de dados para causar que o aparelho execute um processo implementado por computador. Por conseqüência, as FIGS. 10 e 11 suportam o aparelho (sistemas), produtos de programa de computador e métodos para executar as operações ilustradas nas mesmas.

A FIG. 10 ilustra as operações 1000 para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir de um vetor X_e de estimativas de diferença de tempo ao longo das linhas descritas acima de acordo com as modalidades da presente invenção. Um pseudo-inverso W de uma matriz ampliada Z incluindo um vetor de diferenças de tempo de referência Y_e associado com um fluxo de massa conhecido F_c ampliada por uma coluna de uns é determinado (bloco 1010). A determinação da matriz ampliada Z e da matriz pseudo-inversa W pode ser feita em uma base intermitente, por exemplo, na calibragem, para reduzir as cargas computacionais. O vetor de estimativas de diferença de tempo X_e é multiplicado pela matriz pseudo-inversa W, para produzir um vetor de graduação c, incluindo um parâme-

tro de inclinação a um parâmetro de intercepção b (bloco 1020). O parâmetro de inclinação a é então multiplicado pelo fluxo de massa conhecido F_c para produzir uma estimativa de fluxo de massa (Bloco 1030). Será apreciado que a estimativa de fluxo de massa pode ser adicionalmente processada; por exemplo, a estimativa de fluxo de massa pode ter a média determinada com outras estimativas de fluxo de massa determinadas através de um período de tempo para produzir uma medida de fluxo de massa filtrada (Bloco 1040). O parâmetro de intercepção b também pode ser monitorado, por exemplo, para detectar as alterações do sistema (Bloco 1050).

Existem várias vantagens em monitorar o parâmetro de intercepção b do vetor c, como será discutido em detalhes abaixo. Entretanto, não é necessário calcular o parâmetro de intercepção b de modo a gerar a estimativa de fluxo de massa. A equação (2) pode ser rescrita como:

$$X_e = Y_e a \quad (5)$$

não utilizando-se o parâmetro de intercepção b. A equação (5) pode ser vista como uma tentativa de associar o formato do vetor de estimativa de diferença de tempo X_e com o formato do vetor de diferença de tempo de referência Y_e sem levar em consideração a normalização de fase. A equação (5) pode funcionar se o vetor de estimativa de diferença de tempo Y_e e o vetor de diferença de tempo de referência X_e forem arbitrariamente normalizados e pode produzir melhores resultados se todas as fases forem normalizadas pela fase de referência

antes da determinação das estimativas de diferença de tempo X_e. Para resolver o parâmetro de inclinação a, a seguinte relação pode ser utilizada:

$$a = Y_e^{-1} X_e. \qquad (6)$$

A Fig. 11 ilustra as operações 1100 para gerar uma estimativa de fluxo de massa sem determinar o parâmetro de intercepção b de acordo com modalidades da presente invenção. Um pseudo-inverso Y_e^{-1} do vetor de diferenças de tempo de referência Y_e associado com um fluxo de massa conhecido F_c é determinado (Bloco 1110). A determinação do pseudo-inverso Y_e^{-1} pode ser feita em uma base intermitente, por exemplo, na calibragem, para reduzir as cargas computacionais. O vetor de estimativas de diferença de tempo X_e é multiplicado pelo pseudo-inverso Y_e^{-1} para determinar um parâmetro de inclinação a (Bloco 1120). O parâmetro de inclinação a é então multiplicado pelo fluxo de massa conhecido F_c para produzir uma estimativa de fluxo de massa (Bloco 1130). Será apreciado que a estimativa de fluxo de massa pode ser adicionalmente processada; por exemplo, a estimativa de fluxo de massa pode ter a média determinada com outras estimativas de fluxo de massa determinadas através de um período de tempo para produzir uma medida de fluxo de massa filtrada (Bloco 1140).

As FIGS. 12 e 13 graficamente ilustram resultados de teste para um protótipo de medidor de fluxo de massa Coriolis de acordo com modalidades da invenção que indicam que

a determinação do parâmetro de intercepção b não é necessária para gerar as estimativas de fluxo de massa. Em particular, as FIGS. 12 e 13 ilustram que as estimativas de fluxo de massa geradas através dos intervalos de tempo de interesse (aproximadamente 10 até aproximadamente 30 segundos) utilizando os respectivos métodos pseudo-inverso descritos acima (isto é, com e sem determinação do parâmetro de intercepção b, respectivamente) apresentam um grau similar de concordância com as medidas de taxa de fluxo de massa experimentais para os intervalos de tempo obtidos utilizando outros métodos.

De acordo com outras modalidades da presente invenção, uma técnica repetitiva pode ser utilizada para resolver o vetor c em vez das técnicas pseudo-inversas descritas acima. Uma equação de erro

$$L(k) = \mathrm{X}_e(k) - \mathrm{Z}c(k-1), \qquad (7)$$

e uma função de custo associada

$$J = \frac{1}{2}L^2 \qquad (8)$$

podem ser definidas. Um método de gradiente pode ser utilizado para encontrar uma solução que reduza a função de custo J para um nível desejado, com o gradiente dado por:

$$\frac{\partial J}{\partial c} = -LZ. \qquad (9)$$

Pequenas etapas podem ser executadas para descer o gradiente em direção a um valor mínimo da função de custo J. Em uma k^{a}

etapa, uma nova estimativa do vetor c(k) é produzida utilizando a seguinte relação:

$$\mathbf{c}(k) = \mathbf{c}(k-1) - \gamma \frac{\partial J}{\partial c} = \mathbf{c}(k-1) + \gamma L \mathbf{Z}, \qquad (10)$$

onde o vetor c(k-1) representa o resultado produzido pela repetição k-1 precedente e γ é uma taxa adaptável para o processo. Os cálculos podem ser repetidamente executados até que a função de custo J seja reduzida para um nível predeterminado. γ deve ser maior do que zero e menor do que 2 para garantir a convergência. O valor de γ geralmente tem impacto sobre a taxa de convergência e sobre a sensibilidade do processo repetitivo ao ruído. Geralmente, quanto maior o valor de γ, mais rápido o processo converge; entretanto, um valor grande para γ pode aumentar a sensibilidade ao ruído. Um valor ótimo para γ pode ser determinado experimentalmente, com o valor tipicamente sendo 0,1.

A equação (10) representa a maneira de se abordar do Quadrado da Menor Média (LMS) para a estimativa de parâmetro. Uma versão do Quadrado da Menor Média Normalizado (NLMS) potencialmente mais robusta deste maneira de se abordar adaptável também pode ser utilizada como se segue:

$$\mathbf{c}(k) = \mathbf{c}(k-1) - \gamma \frac{\mathbf{Z}^T L(k)}{\alpha + \|\mathbf{Z}\|_2^2}, \quad (11)$$

onde

$$0 < \gamma < 2 \qquad (12),$$

onde α é uma constante que está incluída para reduzir a probabilidade de instabilidade numérica se a norma de Z se aproximar de zero. De modo a proporcionar a convergência para a equação (11), a equação (12) deve ser satisfeita. O valor de α de preferência é uma valor positivo pequeno e pode ser selecionado baseado em experimentação.

A FIG. 14 ilustra as operações 1400 de acordo com modalidades da presente invenção, nas quais um vetor de graduação c é repetidamente determinado ao longo das linhas descritas acima. Um vetor X_e de estimativas de diferença de tempo é gerado (Bloco 1410). Uma estimativa de vetor de graduação inicial c(k) é gerada (Bloco 1420). O valor inicial c(k) pode ser, por exemplo, zero ou uma estimativa final de um vetor de graduação c gerado a partir de um valor anterior de X_e. Assumindo que a taxa de fluxo não altera-se drasticamente entre as medidas de fluxo, a última escolha pode aumentar a velocidade de convergência, a medida que o valor anteriormente estimado para o vetor de graduação c deve estar próximo do novo valor a ser determinado. Um erro L(k) e custo J(k) associados são determinados, por exemplo, utilizando as equações (7) e (8) (Bloco 1440). Se o custo J(k) for menor do que um valor predeterminado, indicando uma precisão aceitável da estimativa do vetor de graduação c(k), uma estimativa do fluxo de massa pode ser gerada (Blocos 1450, 1455) e um novo vetor de estimativas de diferença de tempo X_e gerado (Bloco 1410). Se não, uma estimativa atualizada do vetor de graduação c(k) é gerada utilizando, por exemplo, a equação (10) ou a equação (11) (Blocos 1460,

1470) e os novos valores de erro e da função de custo são calculados (Blocos 1430, 1440).

Os com conhecimento na técnica irão apreciar que as operações diferentes destas descritas com referência à FIG. 14 podem ser utilizadas com a presente invenção. Por exemplo, será apreciado que vários dos cálculos podem ser combinados ou variados. também será apreciado que existem várias técnicas repetitivas diferentes que podem ser utilizadas para resolver a equação (3) além das técnicas LMS e NLMS descritas acima.

As FIGS. 15 até 19 são ilustrações de fluxograma de operações ilustrativas de acordo com várias modalidades da presente invenção. Os com conhecimento na técnica irão entender que as operações destas ilustrações de fluxograma podem ser implementadas utilizando instruções de computador. Estas instruções podem ser executadas em um computador ou em outro aparelho de processamento de dados, tal como o processador de dados 450 da FIG. 4, para criar um aparelho (sistema) operacional para executar as operações ilustradas. As instruções de computador também podem ser armazenadas como código de programa legível por computador em um meio legível por computador, por exemplo, uma memória de circuito integrado, um disco magnético, uma fita ou semelhantes, que podem direcionar um computador ou outro aparelho de processamento de dados para executar as operações ilustradas, assim proporcionado o método para executar as operações ilustradas. O código de programa legível por computador também pode ser executado em um computador ou em outro aparelho de pro-

cessamento de dados para fazer com que o aparelho execute o processo implementado por um computador. Por conseqüência, as FIGS. 15 até 19 suportam o aparelho (sistemas), produtos de programa de computador e métodos para executar as operações ilustradas nas mesmas.

De acordo com modalidades da presente invenção ilustradas pela FIG. 15, as operações 1500 para gerar as estimativas de fase associadas com o movimento de uma estrutura incluem a filtragem seletiva de modo de uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura para gerar uma pluralidade correspondente de sinais de movimento filtrados com seleção de modo utilizando, por exemplo, as técnica tal como estas descritas acima com referência à FIG. 6. (Bloco 1510). Uma pluralidade de estimativas de fase é então gerada a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (Bloco 1520).

Nas operações ilustrativas de estimativa de fluxo de massa 1600 de acordo com as modalidades da presente invenção ilustradas na FIG. 16, uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de um conduto são filtradas com seleção de modo para produzir uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (Bloco 1610). Uma pluralidade de estimativas de fase são então geradas a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (Bloco 1620) e são utilizadas para gerar uma estimativa de fluxo de massa (Bloco 1630).

Nas operações de estimativa de diferença ilustrativas 1700 de acordo com outras modalidades da presente in-

venção ilustradas na FIG. 17, uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de uma estrutura são filtrados com seleção de modo para produzir uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (Bloco 1710). Uma freqüência de um primeiro sinal de movimento filtrado com seleção de modo é determinada utilizando, por exemplo, as operações de filtragem de encaixe adaptáveis descritas acima com referência à FIG. 7 (Bloco 1720). Uma estimativa de diferença, por exemplo, uma estimativa de diferença de fase e/ou uma estimativa de diferença de tempo, é então determinada a partir de um segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo utilizando, por exemplo, as operações de demodulação descritas com referência à FIG. 7 (Bloco 1730).

A FIG. 18 ilustra as Operações 1800 para gerar uma estimativa de fluxo de massa de acordo ainda com outras modalidades da presente invenção. Uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de um conduto são processados para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença, por exemplo, estimativas de diferença de tempo ou estimativas de diferença de fase (Bloco 1810). Um parâmetro de inclinação relacionando a pluralidade de estimativas de diferença com um pluralidade de valores de diferença de referência correspondendo a um fluxo de massa conhecido é então estimado (Bloco 1820) e uma estimativa de fluxo de massa é gerada a partir do parâmetro de inclinação estimado e do fluxo de massa conhecido (Bloco 1830). Estas operações podem

ser implementadas utilizando, por exemplo, as operações descritas acima com referência às FIGS. 10 e 11.

Nas operações ilustrativas de estimativa de densidade 1900 de acordo com outras modalidades da presente invenção ilustradas na FIG. 19, uma transformação modal é aplicada junto a uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de um recipiente contendo material para gerar pelo menos um sinal de movimento modal representando o movimento correspondente em uma domínio modal definido por pelo menos um modo de vibração do recipiente (Bloco 1910). Pelo menos uma freqüência do modo é então determinada a partir do pelo menos um sinal de movimento modal (Bloco 1920) e uma densidade do material no recipiente é determinada a partir da pelo menos uma estimativa de freqüência de modo (Bloco 1930), por exemplo, como descrito acima com referência à FIG. 6.

Monitorando a Intercepção Espacial ou outras medidas de correlação para detectar a condição do sistema

Como mencionado acima com referência às FIGS, 10 e 11, apesar do parâmetro de intercepção b do vetor de graduação c não ser necessário para a estimativa do fluxo de massa, ele pode ser útil para detectar alterações do sistema, tal como falha do transdutor de movimento, alterações nas condições de montagem e semelhantes. A utilização potencial do parâmetro de intercepção é ilustrada pelos gráficos das FIGS. 20A e 20B e 21. As FIGS. 20A e 20B graficamente ilustram alterações simuladas na taxa de fluxo de massa calculada e o parâmetro de intercepção espacial, respectivamente,

para falhas de um transdutor de movimento em aproximadamente 20 segundo, a falha do transdutor particular sendo simulada por se zerar os elementos correspondentes nos vetores de estimativas de diferença de tempo produzidas pelo transdutor. Como apresentado na FIG. 20A, a perda de um transdutor produz uma alteração na taxa de fluxo de massa calculada, a qual pode ser erroneamente interpretada como uma alteração real na taxa de fluxo de massa.

A alteração no parâmetro de intercepção pode ser utilizada, de acordo com modalidades da presente invenção, para iniciar um projeto de correção de falha. Por exemplo, como apresentado nas FIGS. 20A e 20B, o pseudo-inverso W de uma matriz ampliada Z pode ser recalculado por se descobrir a fileira correspondendo ao transdutor com falha e então utilizado para gerar novas estimativas de fluxo de massa. Como apresentado na FIG. 20A, onde tal correção é implementada para as estimativas de fluxo de massa começando em aproximadamente 40 segundo, uma precisão aperfeiçoada pode ser alcançada. Em particular, para o exemplo apresentado, um erro de 0,5% é alcançado com tal correção na comparação com o erro de 4% ocorrendo sem tal correção.

Como apresentado na FIG. 21, a qual ilustra os valores do parâmetro de intercepção para falhas de cada membro de um grupo de cinco transdutores de movimento, as falhas de um transdutor de movimento podem ser sinalizadas por uma alteração grande correspondente no parâmetro de intercepção, um fenômeno que tipicamente não ocorreria em resposta a uma simples alteração no fluxo de massa. Outras alterações do

sistema, tal como alterações na montagem ou em outras condições, também podem ser identificadas pelas alterações no parâmetro de intercepção. Em particular, a FIG. 22 ilustra alterações no parâmetro de intercepção para um protótipo de medidor de fluxo de massa Coriolis após o amortecimento ser adicionado para a estrutura do medidor.

O parâmetro de intercepção é um dentre uma variedade de medidas de correlação diferentes que podem ser utilizadas para detectar alterações do sistema de acordo com modalidades da presente invenção. Em geral, uma vez que o vetor de graduação c tenha sido calculado, a equação (3) acima pode ser aplicada para fornecer um vetor de diferenças de tempo X_{est}, o qual é um ajuste de menor quadrado de um vetor "medido" de diferenças de tempo X_e (produzido como descrito acima) para um vetor base.

$$\mathbf{X}_{est} = \mathbf{Zc}. \qquad (13)$$

O vetor prognosticado de diferenças de tempo X_{est} pode ser comparado com o vetor medido de estimativas de diferença de tempo X_e para produzir uma medida de correlação que pode ser utilizada para vários propósitos. A comparação pode ser feita de forma intermitente ou em cada cálculo de fluxo de massa.

Nas modalidades da presente invenção, um coeficiente de correlação r pode ser gerado a partir do vetor prognosticado de diferenças de tempo X_{est} e utilizado para detectar alterações do sistema. O coeficiente de correlação r é uma quantidade escalar sem dimensão entre +1 e -1 e utiliza

uma quantidade $\overline{X}$, que é uma média das estimativas de diferença de tempo X_e:

$$\overline{X} = \text{média}(X_e) = \sum_{i=1}^{N} \frac{X_{ei}}{N}, \qquad (14)$$

onde N é o número de pontos de dado, por exemplo, o número de sinais de transdutor de movimento. O coeficiente de correlação r pode ser definido como uma proporção da variação explicada sobre a variação total.:

$$r = \pm\sqrt{\frac{\text{variação explicada}}{\text{variação total}}} = \pm\sqrt{\frac{\sum\left(X_{esi} - \overline{X}\right)^2}{\sum\left(X_e - \overline{X}\right)^2}} \qquad (15)$$

FIG. 23 ilustra como tal coeficiente de correlação pode ser utilizado, em particular, ao se detectar a falha do transdutor. O fluxo de massa é estimado através de um primeiro período de tempo de 0 até 15 segundos utilizando os vetores X_e de estimativas de diferença de tempo geradas a partir dos sinais de movimento produzidos pelos transdutores nº 1 até nº 5. Os vetores X_e de estimativas de diferença de tempo subseqüentemente produzidos são então perturbados por se zerar os valores de sinal de movimento correspondendo a um transdutor de movimento (nº 2) de 15 até 30 segundos, simulando-se a falha deste transdutor para este período de tempo. Os vetores X_e de estimativas de diferença de tempo são novamente perturbados de 45 até 60 segundo por se dobrar o valor do sinal de movimento associado com o transdutor nº 2, simulando-se uma alteração de ganho no transdutor ou um

sinal ruidoso do transdutor. Como visto na FIG. 23, a estimativa de fluxo de massa é reduzida aproximadamente 0,1112 kg/s (20 lbm/min) quando a entrada do transdutor nº 2 é zerada e aumentada aproximadamente 0,1134 kg/s (15 lbm/min) com a entrada do sinal de movimento dobrada.

Com as técnicas de medida de fluxo padrão, pode ser difícil dizer se tais alterações podem ser atribuídas às alterações de fluxo de massa reais ou às falhas de medida. Entretanto, de uma maneira similar a esta descrita acima com referência ao parâmetro de intercepção, o coeficiente de correlação r pode ser utilizado para detectar tais alterações no sistema. Como apresentado na FIG. 24, a qual ilustra o comportamento do coeficiente de correlação r através do mesmo intervalo de tempo que o da FIG. 23, o coeficiente de correlação r pode apresentar uma alteração relativamente grande no valor com um sinal de movimento com falha (zerado) ou ruidoso.

O erro de estimativa é outra media de correlação que pode ser utilizada para detectar a condição do sistema. Um erro de estimativa padrão $S_{x,y}$ pode ser expresso como:

$$S_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (X_e - X_{est})^2}{N}} \qquad (16)$$

Como apresentado na FIG. 25, a qual apresenta o comportamento do erro de estimativa padrão $S_{x,y}$ para o intervalo de tempo das FIGS. 23 e 24, o erro de estimativa padrão $S_{x,y}$ pode exibir grandes alterações para as alterações do sistema descritas acima (será observado que a teoria de amostragem in-

dica que para um pequeno número de entradas de transdutor (por exemplo, 6), maior precisão pode ser alcançada por se substituir o N no denominador por N-2).

Outras propriedades do erro de medida de estimativa podem ser exploradas para determinar a fonte de uma falha, tal como a identidade de uma transdutor com falha particular. O erro de estimativa padrão pode ser visto como sendo análogo ao desvio padrão de um conjunto de dados, isto é, pode-se esperar que 99,7% do tempo, o erro de estimativa para uma estimativa de diferença de tempo estará dentro de três vezes a estimativa de erro padrão $S_{x,y}$ do vetor prognosticado de diferenças de tempo X_{est}. Por conseqüência, os respectivos erros de estimativa para as respectivas estimativas de diferença de tempo associadas com os respectivos transdutores podem ser verificados para ver se eles estão dentro de um múltiplo predeterminado (por exemplo, dentro de três vezes) do erro de estimativa padrão. Tal teste pode ser expresso como a seguinte desigualdade:

$$X_{est} - K*s_{x,y} \leq X_e \leq X_{est} + K*s_{x,y}, \qquad (17)$$

a qual pode ser reorganizada para fornecer:

$$-K*s_{x,y} \leq X_e - X_{est} \leq +K*s_{x,y} \qquad (18)$$

Para identificar uma transdutor com falha, por exemplo, os critérios das equações (17) e (18) podem ser

aplicados para cada componente de cada vetor de estimativas de diferença de tempo gerado. Um erro (X_e - X_{est}) de uma estimativa de diferença de tempo particular X_e associada com um transdutor com falha tipicamente será várias vezes o erro de estimativa padrão. Isto é ilustrado na FIG. 26, a qual apresenta o erro (X_e - X_{est}) para um transdutor com falha nº 2 de um grupo de transdutores em relação ao erro de estimativa padrão para o grupo (cujos valores são normalizados por conveniência por se subtrair um vetor nominal). Como apresentado, o erro associado com o transdutor nº 2 é bem externo aos limites do erro de estimativa padrão para o grupo (o qual, para o exemplo apresentado, é aproximadamente $\pm$ 0,07, muito pequeno para ser visto no gráfico da FIG. 26).

Também é possível corrigir a taxa de fluxo de massa calculada para um transdutor com falha uma vez que ele tenha sido identificado. Por exemplo, a matriz ampliada Z pode ser reformulada por se deletar a fileira associada com o transdutor com falha. Uma nova matriz pseudo-inversa W pode então ser formada por se inverter a matriz ampliada reformulada Z. A taxa de fluxo de massa pode então ser estimada por ser multiplicar anteriormente um vetor com dimensão reduzida das estimativas de diferença de tempo X_e no qual a fileira associada com o transdutor com falha pela matriz pseudo-inversa W é zerada. A FIG. 27 ilustra tal correção de uma estimativa de fluxo de massa.

De acordo com modalidades da presente invenção, um aparelho medidor de fluxo de massa pode monitorar um parâmetro de intercepção, coeficiente de correlação, erro padrão

de estimativa ou outra medida de correlação para detectar a condição do sistema. Por exemplo, quando da detecção de uma grande alteração no parâmetro de intercepção, um transdutor com falha em particular pode ser identificado e o filtro seletivo modal e/ou a matriz pseudo-inversa utilizado pelo aparelho para gerar estimativas de diferença pode ser novamente calculado para compensar o transdutor com falha. De forma similar, um erro de uma estimativa de diferença de tempo associada com transdutores particulares, movendo-se fora de uma faixa definida por um erro de estimativa padrão pode ser utilizado para detectar a falha do transdutor e assim ativar a ação de correção.

A FIG. 28 ilustra as operações 2800 para detectar a condição do sistema de acordo com modalidades da presente invenção. Uma pluralidade de estimativas de diferença, por exemplo, um vetor de estimativas de diferença de tempo X_e como descrito acima, é gerado (Bloco 2810). Uma medida de correlação, tal como um parâmetro de intercepção, um coeficiente de correlação ou um erro de estimativa é determinado (Bloco 2820). A condição do sistema é determinada a partir da medida de correlação determinada (Bloco 2830).

A FIG. 29 ilustra as operações ilustrativas 2900 de acordo com outras modalidades da presente invenção. Um vetor de estimativas de diferença de tempo X_e é gerado (Bloco 2910). Uma medida de correlação, tal como um parâmetro de intercepção, um coeficiente de correlação ou um erro de estimativa, é determinado (Bloco 2920). Se uma alteração na medida de correlação vai de encontro a um critério predeter-

minado, um transdutor com falha é identificado (Blocos 2930, 2940). Após identificar o transdutor com falha, os elementos apropriados da matriz ampliada Z podem ser zerados e a matriz pseudo-inversa W pode ser recalculada para uso em cálculos de fluxo de massa subsequentes e em outros cálculos (Blocos 2950, 2960, 2910). Desta maneira, a entrada do transdutor com falha pode ser excluída das estimativas de fluxo de massa subsequentes.

Outra ação corretiva pode ser tomada baseado em uma medida de correlação. Por exemplo, nas operações ilustrativas 3000 de acordo com modalidades da presente invenção ilustradas na FIG. 30, um parâmetro de intercepção é monitorado (Bloco 3010) e se uma alteração no parâmetro de intercepção for de encontro a um critério predeterminado, o aparelho pode recalcular o filtro seletivo de modo que ele usa ao gerar as estimativas de fluxo de massa (Blocos 3020, 3030). Uma variedade de critérios de alteração podem ser utilizados, tal como os critérios baseados no desvio máximo do parâmetro de intercepção a partir de um valor inicial, o desvio médio do parâmetro de intercepção através de um intervalo de tempo predeterminado e semelhantes.

Os com conhecimento na técnica irão apreciar que a presente invenção pode ser implementada de uma série de outros modos diferentes das modalidades descritas aqui dentro. Por exemplo, os cálculos descritos aqui dentro podem ser implementados como cálculos separados, ou podem ser combinados em um ou mais cálculos que alcançam resultados equivalentes. As funções descritas aqui dentro podem, em geral, ser imple-

mentadas utilizando-se as técnicas de processamento digitais e/ou analógicas. Os com conhecimento na técnica também irão apreciar que, apesar da presente invenção poder ser incorporada dentro de um aparelho tal como um medidor de fluxo de massa Coriolis, ou como métodos que podem ser executados por tal aparelho, a presente invenção também pode ser incorporada em um aparelho configurado para operar em associação com um medidor de fluxo ou aparelho sensor, tal como no aparelho de controle de processo. Também será apreciado que a presente invenção pode ser incorporada em um artigo de fabricação na forma de instruções legíveis por computador ou código de programa incorporado em um meio de armazenamento legível por computador tal como um disco magnético, dispositivo de memória de circuito integrado, fita magnética, memória de bolha ou semelhantes. Tal código de programa de computador pode ser executado por um computador ou por outro processador de dados e executado em resposta aos sinais de movimento fornecidos a partir dos transdutores de movimento operacionalmente associados com uma estrutura, tal como um conduto ou outro recipiente.

Nos desenhos e na especificação, foram revelados modalidades típicas preferidas da invenção e apesar de termos específicos serem empregados, eles são utilizados somente em um senso genérico e descritivo e não para propósitos de limitação, o escopo da invenção sendo exposto pelas reivindicações seguintes.

REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho, compreendendo:

um aparelho (105 A até D) operacional para produzir uma pluralidade de sinais de movimento (109) representando o movimento de vibração da estrutura (100);

um aparelho (310) que filtra a pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de vibração da estrutura; e

um aparelho que gera uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (315) de modo que os sinais de movimento filtrados com seleção de modo representam o movimento associado com um modo de vibração da estrutura; e

adicionalmente **CARACTERIZADO** por um aparelho (320) para gerar uma pluralidade de estimativas de fase (325) a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo, com uma estimativa de fase que é a diferença em radianos ou graus, entre dois sinais senoidais.

2. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho (330) para gerar uma estimativa de fluxo de massa (335) a partir da pluralidade de estimativas de fase.

3. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender:

um aparelho (632) para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo (633) entre a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e

um aparelho (634) para gerar uma medida de correlação a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo; e

um aparelho (450) para determinar uma condição de um sistema medidor de fluxo de massa a partir da medida de correlação gerada.

4. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende um aparelho (620) para gerar a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma referência de fase derivada a partir de um da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

5. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para a filtragem seletiva de modo compreende:

um aparelho (612) para aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de resposta modal em um domínio de coordenada modal; e

um aparelho (614) para aplicar uma transformação seletiva de modo junto à pluralidade de sinais de resposta modal para gerar a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

6. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende:

um aparelho (710) para estimar uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo;

um aparelho (720) para gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e

um aparelho (740) para gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

7. Aparelho, de acordo com a reivindicação 6, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende:

um aparelho (725) para multiplicar um sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos respectivos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais de componente real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e

um aparelho (810) para estimar um arcotangente de um quociente dos sinais de componente real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar uma estimativa de fase.

8. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho (632) para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase.

9. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho (630) para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

10. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende um aparelho (530) para dividir a pluralidade de estimativas de fase por uma freqüência do modo para gerar uma pluralidade de valores de diferença de tempo.

11. Aparelho, de acordo com a reivindicação 10, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase adicionalmente compreende um aparelho (632) para aplicar uma pluralidade de diferenças de tempo de referência de fluxo zero junto à pluralidade de valores de diferença de tempo para gerar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

12. Aparelho, de acordo com a reivindicação 10, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para a filtragem seletiva de modo compreende:

um aparelho (612) para aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar um sinal de movimento modal em um domínio de coordenada modal; e

um aparelho (640) para estimar a freqüência do modo a partir do sinal de movimento modal.

13. Aparelho, de acordo com a reivindicação 12, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho (650) para estimar a densidade do material na estrutura a partir da freqüência do modo estimada.

14. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho para estimar um parâmetro de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença de tempo com uma pluralidade de diferenças de tempo de referência representando o movimento da estrutura sob uma perturbação conhecida.

15. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a perturbação é o fluxo de massa.

16. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para estimar um parâmetro compreende:

um aparelho para gerar uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de tempo de referência; e

um aparelho para multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso da matriz ampliada para determinar o parâmetro.

17. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para estimar um parâmetro compreende a etapa de repetidamente estimar a função de graduação.

18. Aparelho, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para repetidamente estimar um parâmetro compreende a etapa de aplicar

um procedimento de estimativa do Quadrado da Menor Média (LMS).

19. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho para estimar um parâmetro é precedido pelo aparelho para processar uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura sob a perturbação conhecida para gerar a pluralidade de diferenças de tempo de referência.

20. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de inclinação e adicionalmente compreendendo um aparelho (630) para gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir do parâmetro de inclinação e do fluxo de massa conhecido.

21. Aparelho, de acordo com a reivindicação 20, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dito aparelho (634) para estimar um parâmetro de inclinação compreende um aparelho para multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso da pluralidade de diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação.

22. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de intercepção e adicionalmente compreendendo um aparelho para determinar uma condição do sistema a partir do parâmetro de intercepção.

23. Aparelho, de acordo com a reivindicação 22, **CARACTERIZADO** pelo fato de que um aparelho para a filtragem

seletiva de modo é precedido por um aparelho para receber a pluralidade de sinais de movimento a partir de uma pluralidade de transdutores de movimento operacionalmente associados com a estrutura e onde o dito aparelho para determinar uma condição do sistema compreende um aparelho para determinar uma condição de um transdutor de movimento a partir do parâmetro de intercepção.

24. Aparelho, de acordo com a reivindicação 12, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender um aparelho (650) para estimar a densidade de um material na estrutura a partir da freqüência do modo estimada.

25. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender:

um aparelho (640) para estimar uma freqüência de um primeiro sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e

um aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir de um segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e da freqüência estimada.

26. Aparelho, de acordo com a reivindicação 25, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aparelho para gerar uma estimativa de diferença compreende:

um aparelho (720) para gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e

um aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

27. Aparelho, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aparelho para gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende:

um aparelho para gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência; e

um aparelho para gerar uma estimativa de diferença de tempo a partir da estimativa de fase.

28. Aparelho, de acordo com a reivindicação 27, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aparelho para gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende:

um aparelho para multiplicar o segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais de componente real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e

um aparelho para estimar um arcotangente de um quociente dos sinais de componente real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar a estimativa de fase.

29. Método para operar o aparelho da reivindicação 1, o método compreendendo:

a etapa de estimar o movimento de vibração da estrutura;

a etapa de filtrar com seleção de modo uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento de vibração da estrutura;

a etapa de gerar uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo representando o movimento associado com um modo de vibração da estrutura; e

adicionalmente **CARACTERIZADO** por uma etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo, com uma estimativa de fase que é a diferença em radianos ou graus, entre dois sinais senoidais.

30. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de fase.

31. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender as etapa de:

gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e

gerar uma medida de correlação a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo; e

determinar uma condição da estrutura a partir da medida de correlação gerada.

32. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende a etapa de gerar a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma referência de fase derivada a partir de um da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

33. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de aplicar um filtro seletivo de modo compreende as etapas de:

aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar uma pluralidade de sinais de resposta modal em um domínio de coordenada modal; e

aplicar uma transformação seletiva de modo junto à pluralidade de sinais de resposta modal para gerar a pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo.

34. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de fase compreende as etapas de:

estimar uma freqüência de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo;

gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e

gerar a pluralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

35. Método, de acordo com a reivindicação 34, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar a plu-

ralidade de estimativas de fase a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de:

multiplicar um sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos respectivos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais de componente real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e

estimar um arcotangente de um quociente dos sinais de componente real e imaginário do sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar uma estimativa de fase.

36. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase.

37. Método, de acordo com a reivindicação 36, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir da pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

38. Método, de acordo com a reivindicação 36, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende a etapa de dividir a pluralidade de estimativas de fase por uma freqüência do modo para gerar uma pluralidade de valores de diferença de tempo.

39. Método, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma

pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase adicionalmente compreende a etapa de aplicar uma pluralidade de diferenças de tempo de referência de fluxo zero junto à pluralidade de valores de diferença de tempo para gerar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo.

40. Método, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma pluralidade de estimativas de diferença de tempo a partir da pluralidade de estimativas de fase compreende corrigir a pluralidade de estimativas de fase utilizando uma pluralidade de valores de fase de fluxo zero.

41. Método, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de filtragem seletiva de modo compreende a etapa de aplicar uma transformação modal junto à pluralidade de sinais de movimento para gerar um sinal de movimento modal em um domínio de coordenada modal e onde o método adicionalmente compreende a etapa de estimar a freqüência do modo a partir do sinal de movimento modal.

42. Método, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de estimar a densidade do material no conduto a partir da freqüência do modo estimada.

43. Método, de acordo com a reivindicação 36, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de estimar um parâmetro de uma função de graduação que relaciona a pluralidade de estimativas de diferença de tempo com uma

pluralidade de diferenças de tempo de referência representando o movimento da estrutura sob uma perturbação conhecida.

44. Método, de acordo com a reivindicação 43, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a perturbação é o fluxo de massa.

45. Método, de acordo com a reivindicação 43, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de estimar um parâmetro compreende as etapa de:

gerar uma matriz ampliada incluindo a pluralidade de diferenças de tempo de referência; e

multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso da matriz ampliada para determinar o parâmetro.

46. Método, de acordo com a reivindicação 43, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de estimar um parâmetro compreende a etapa de repetidamente estimar a função de graduação.

47. Método, de acordo com a reivindicação 46, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de repetidamente estimar compreende a etapa de aplicar um procedimento de estimativa do Quadrado da Menor Média (LMS).

48. Método, de acordo com a reivindicação 43, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de estimar um parâmetro é precedida pela etapa de processar uma pluralidade de sinais de movimento representando o movimento da estrutura sob a perturbação conhecida para gerar a pluralidade de diferenças de tempo de referência.

49. Método, de acordo com a reivindicação 44, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de inclinação e adicionalmente compreendendo a etapa de gerar uma estimativa de fluxo de massa a partir do parâmetro de inclinação e do fluxo de massa conhecido.

50. Método, de acordo com a reivindicação 49, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de estimar um parâmetro de inclinação compreende a etapa de multiplicar a pluralidade de estimativas de diferença de tempo por um pseudo-inverso de uma matriz da pluralidade de diferenças de tempo de referência para determinar o parâmetro de inclinação.

51. Método, de acordo com a reivindicação 43, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o parâmetro da função de graduação é um parâmetro de intercepção e adicionalmente compreendendo a etapa de determinar uma condição do sistema a partir do parâmetro de intercepção.

52. Método, de acordo com a reivindicação 51, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de filtragem seletiva de modo é precedida pela etapa de receber a pluralidade de sinais de movimento a partir de uma pluralidade de transdutores de movimento operacionalmente associados com a estrutura e onde a dita etapa de determinar uma condição do sistema compreende a etapa de determinar uma condição de um transdutor de movimento a partir do parâmetro de intercepção.

53. Método, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender a etapa de estimar a densidade de um material na estrutura a partir da freqüência de modo estimada.

54. Método, de acordo com a reivindicação 29, **CARACTERIZADO** por compreender as etapas de:

estimar uma freqüência de um primeiro sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo; e

gerar uma estimativa de diferença a partir de um segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e da freqüência estimada.

55. Método, de acordo com a reivindicação 54, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma estimativa de diferença compreende as etapas de:

gerar o primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura baseado na freqüência estimada; e

gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência.

56. Método, de acordo com a reivindicação 55, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a etapa de gerar uma estimativa de diferença a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de:

gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência; e

gerar uma estimativa de diferença de tempo a partir da estimativa de fase.

57. Método, de acordo com a reivindicação 56, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a dita etapa de gerar uma estimativa de fase a partir do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência compreende as etapas de:

multiplicar o segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo pelos primeiro e segundo sinais de referência para gerar os respectivos sinais de componente real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo; e

estimar um arcotangente de um quociente dos sinais de componente real e imaginário do segundo sinal de movimento filtrado com seleção de modo para gerar a estimativa de fase.

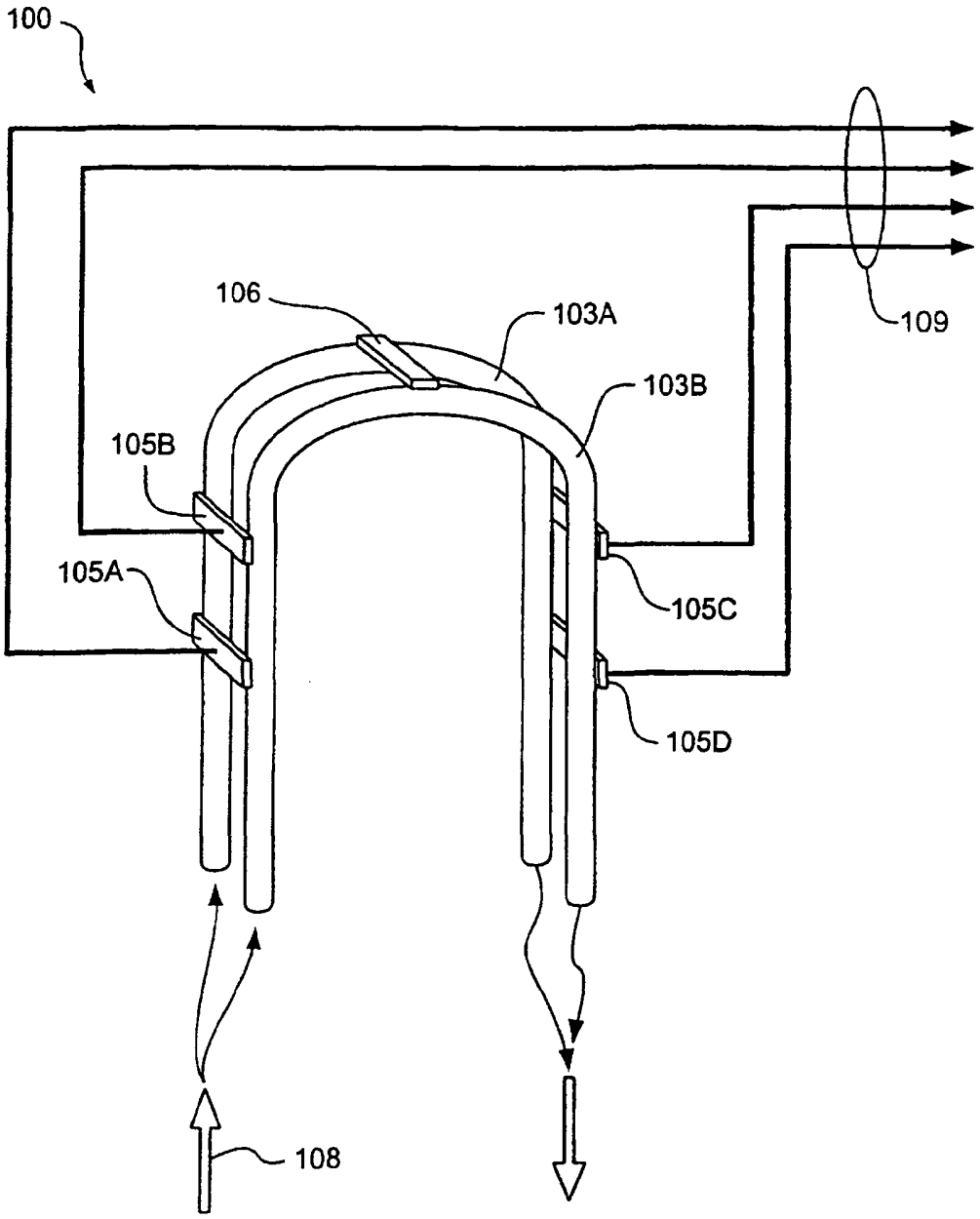


FIG. 1

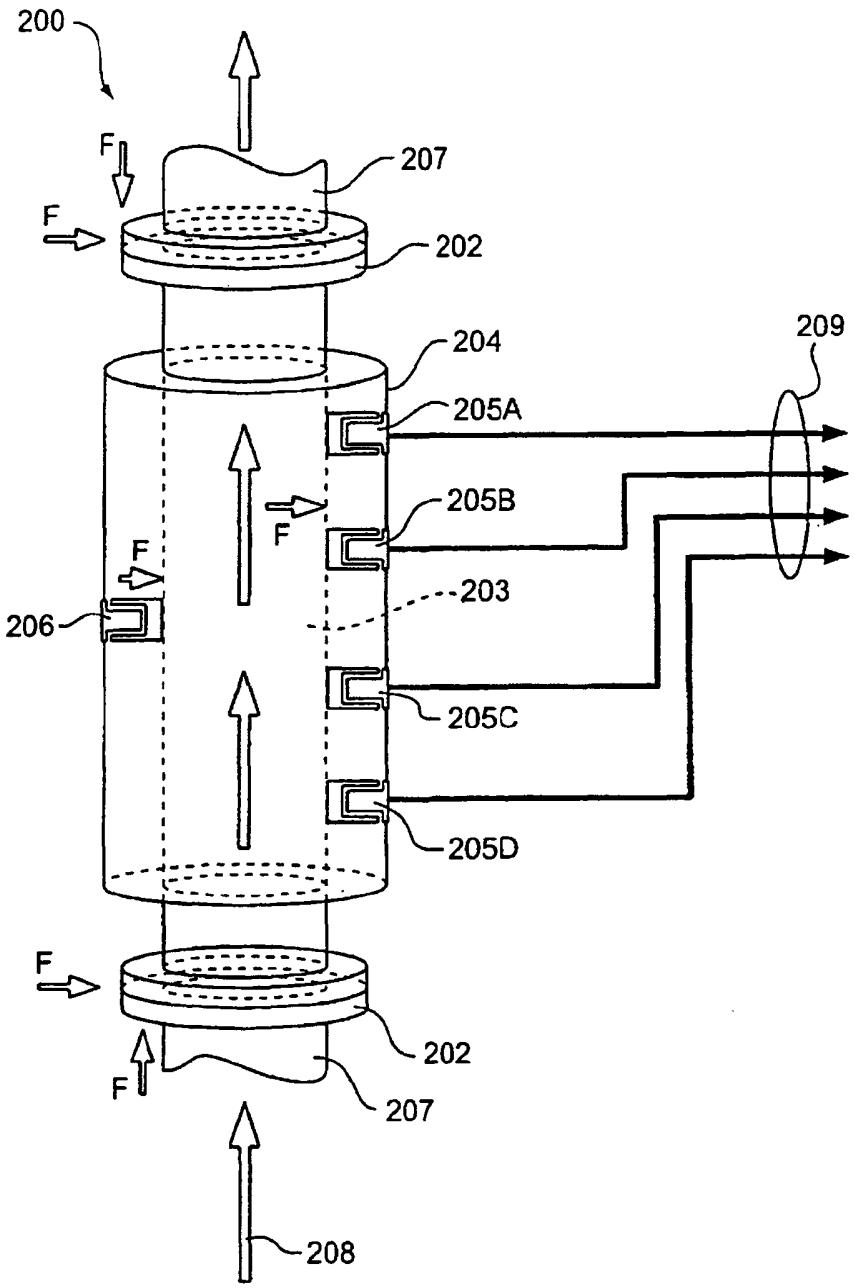

200
F
F
207
202
204
209
205A
205B
F
F
203
206
205C
205D
F
202
F
207
208

FIG. 2

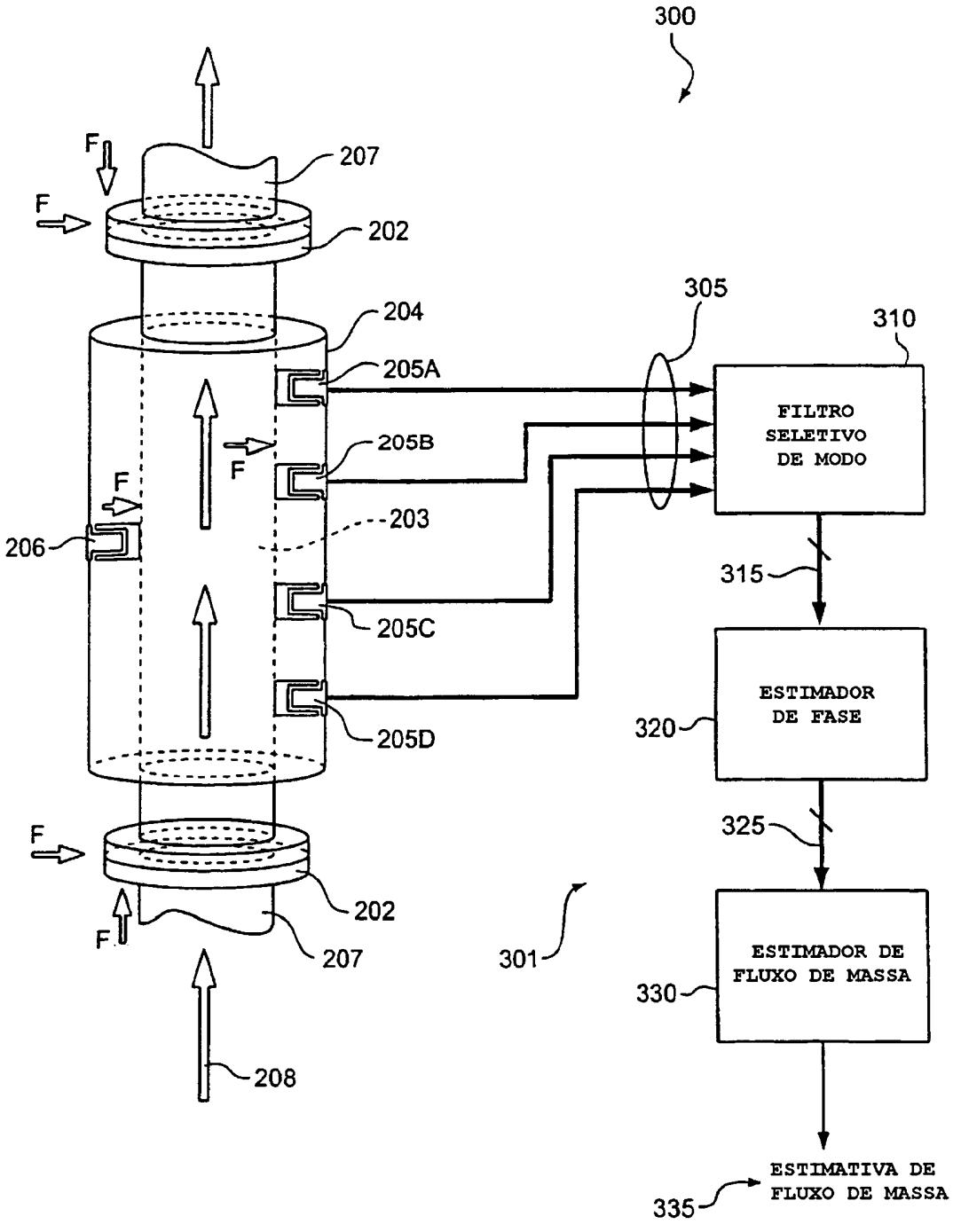

300
F
F
207
202
204
205A
205B
F
F
206
203
205C
205D
F
F
202
207
208
305
310
FILTRO SELETIVO DE MODO
315
ESTIMADOR DE FASE
320
325
ESTIMADOR DE FLUXO DE MASSA
330
301
ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA
335

FIG. 3

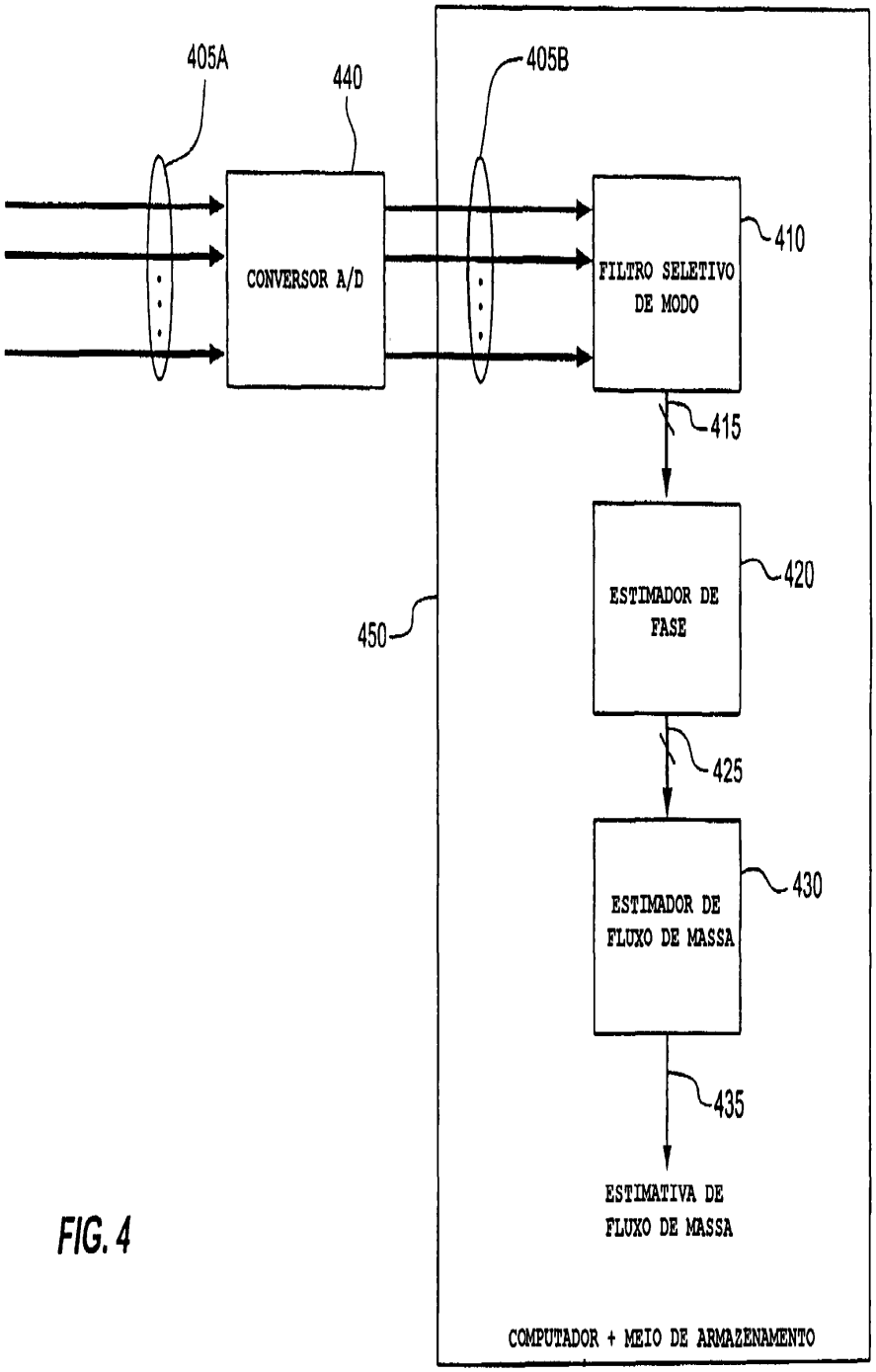

405A
440
405B
CONVERSOR A/D
FILTRO SELETIVO DE MODO
410
415
ESTIMADOR DE FASE
420
450
425
ESTIMADOR DE FLUXO DE MASSA
430
435
ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA
COMPUTADOR + MEIO DE ARMAZENAMENTO

FIG. 4

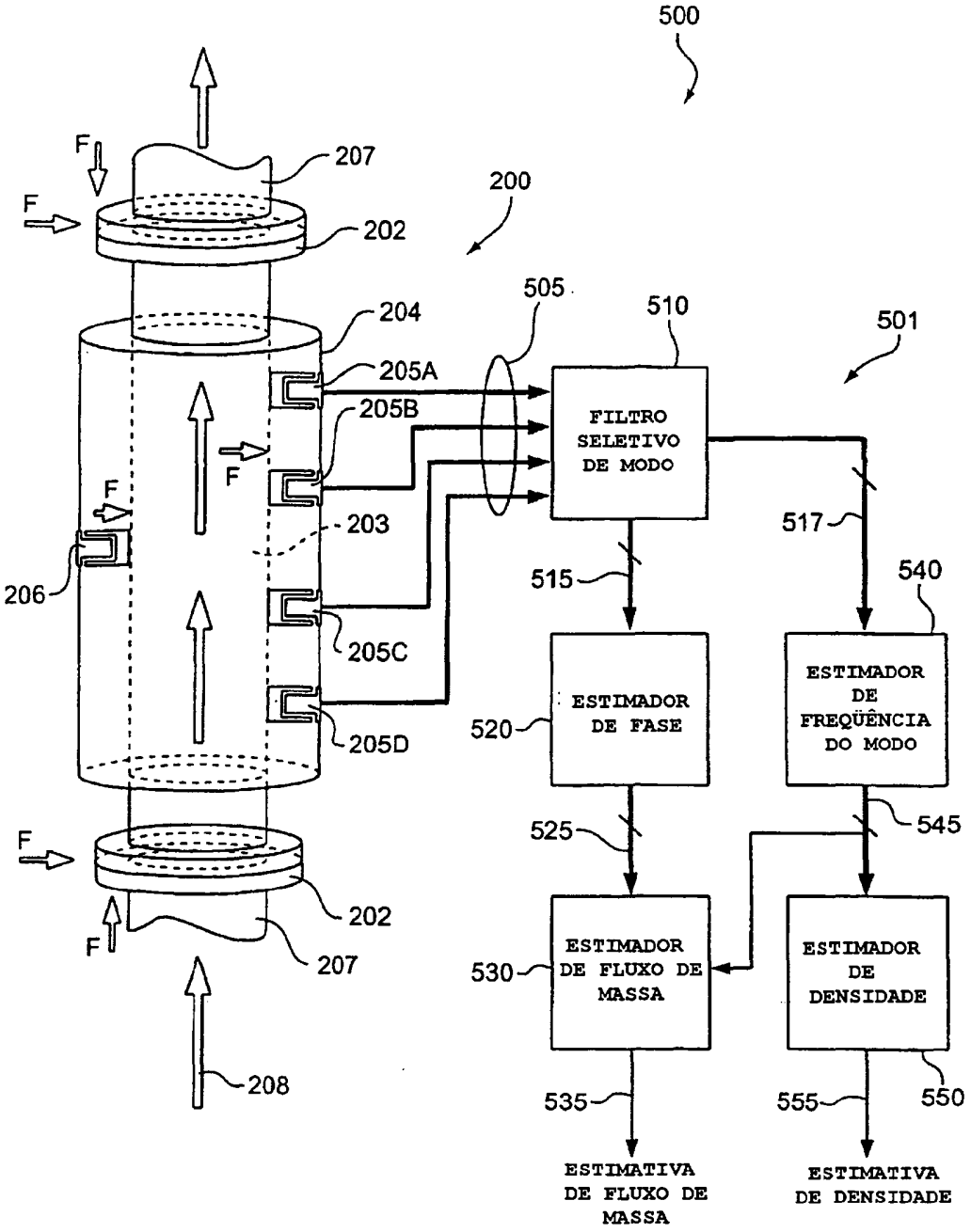

500
200
207
202
204
205A
205B
205C
205D
203
206
F
208
505
510
501
FILTRO SELETIVO DE MODO
517
515
540
ESTIMADOR DE FASE
520
ESTIMADOR DE FREQÜÊNCIA DO MODO
525
545
ESTIMADOR DE FLUXO DE MASSA
530
ESTIMADOR DE DENSIDADE
535
555
550
ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA
ESTIMATIVA DE DENSIDADE

FIG. 5

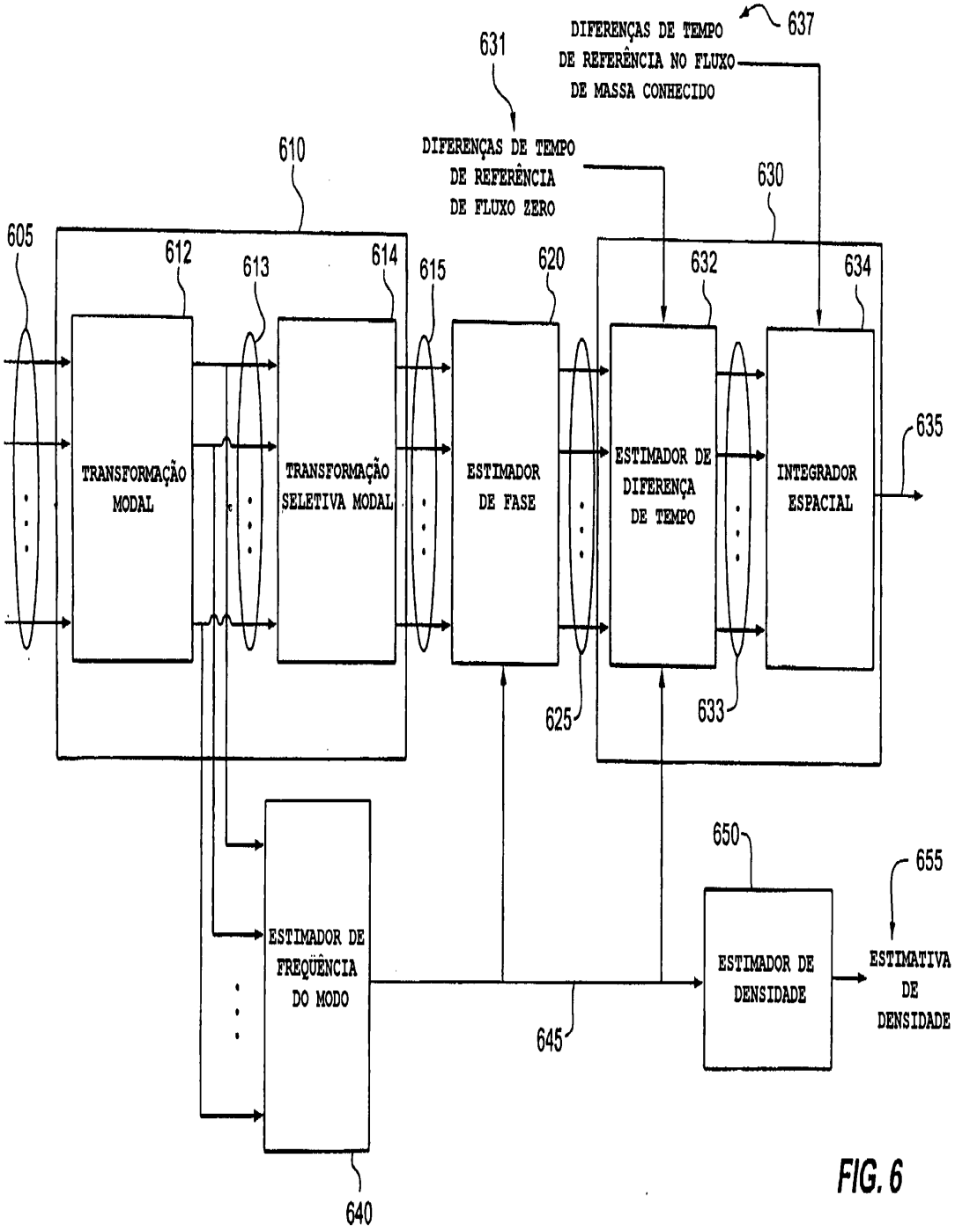

DIFERENÇAS DE TEMPO
DE REFERÊNCIA NO FLUXO
DE MASSA CONHECIDO
637
631
DIFERENÇAS DE TEMPO
DE REFERÊNCIA
DE FLUXO ZERO
610
630
605
612
613
614
615
620
632
634
TRANSFORMAÇÃO
MODAL
TRANSFORMAÇÃO
SELETIVA MODAL
ESTIMADOR
DE FASE
ESTIMADOR DE
DIFERENÇA
DE TEMPO
INTEGRADOR
ESPACIAL
635
625
633
650
655
ESTIMADOR DE
FREQÜÊNCIA
DO MODO
ESTIMADOR DE
DENSIDADE
ESTIMATIVA
DE
DENSIDADE
645
640

FIG. 6

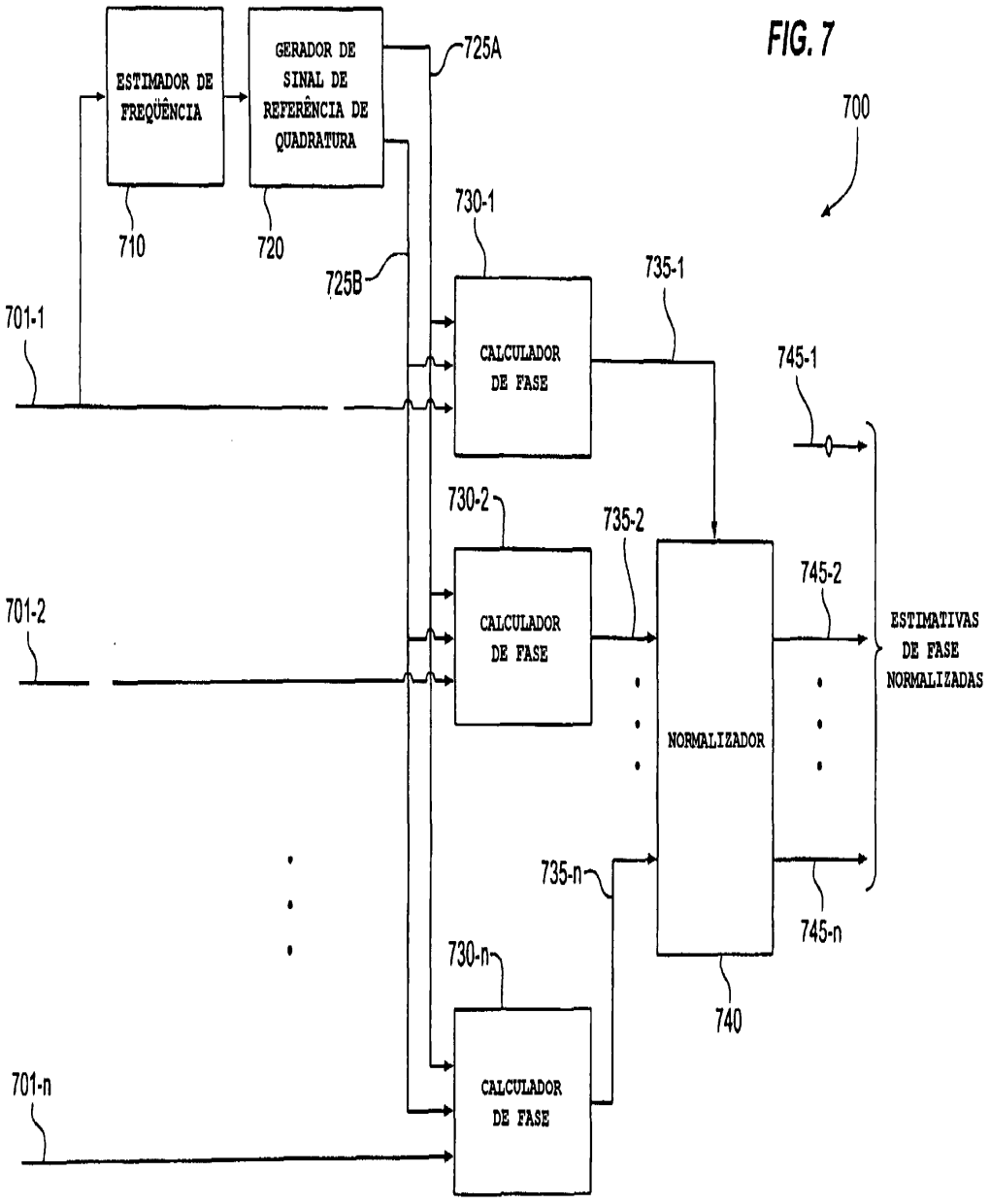

ESTIMADOR DE FREQÜÊNCIA
GERADOR DE SINAL DE REFERÊNCIA DE QUADRATURA
725A
700
730-1
710
720
725B
735-1
701-1
CALCULADOR DE FASE
745-1
730-2
735-2
745-2
701-2
CALCULADOR DE FASE
NORMALIZADOR
ESTIMATIVAS DE FASE NORMALIZADAS
735-n
745-n
730-n
740
701-n
CALCULADOR DE FASE

FIG. 7

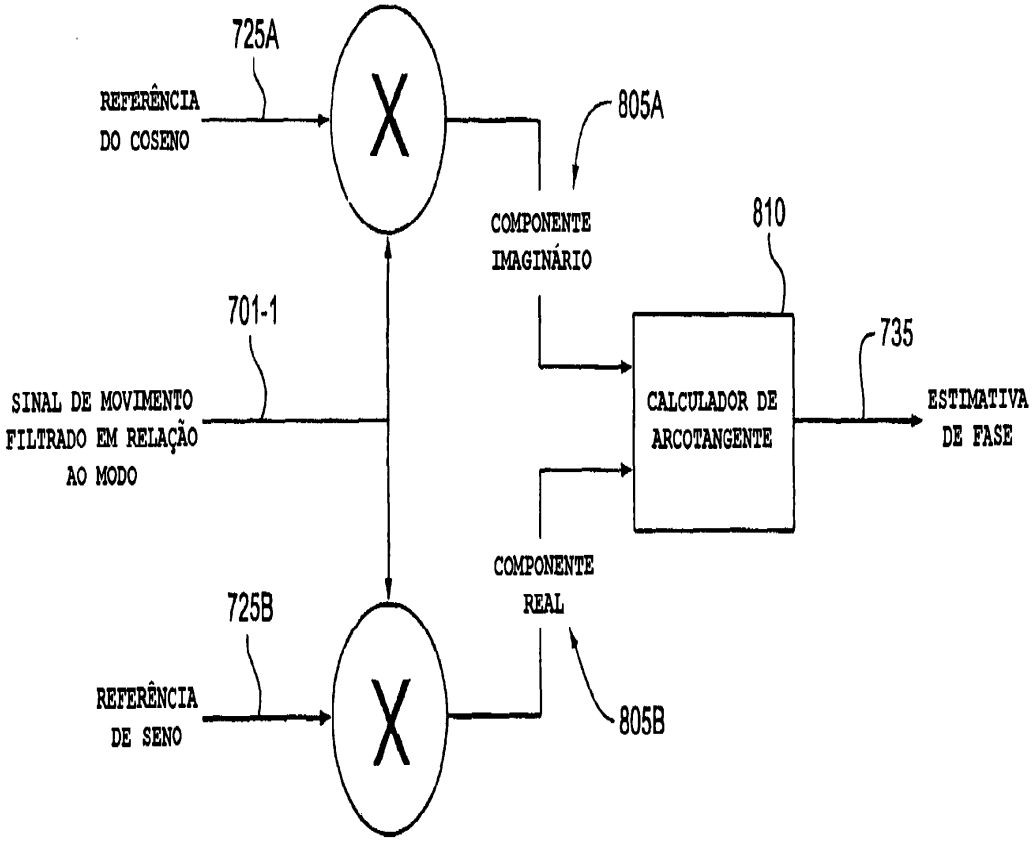

725A
REFERÊNCIA
DO COSENO
X
805A
COMPONENTE
IMAGINÁRIO
810
701-1
SINAL DE MOVIMENTO
FILTRADO EM RELAÇÃO
AO MODO
CALCULADOR DE
ARCOTANGENTE
735
ESTIMATIVA
DE FASE
COMPONENTE
REAL
725B
REFERÊNCIA
DE SENO
X
805B

FIG. 8

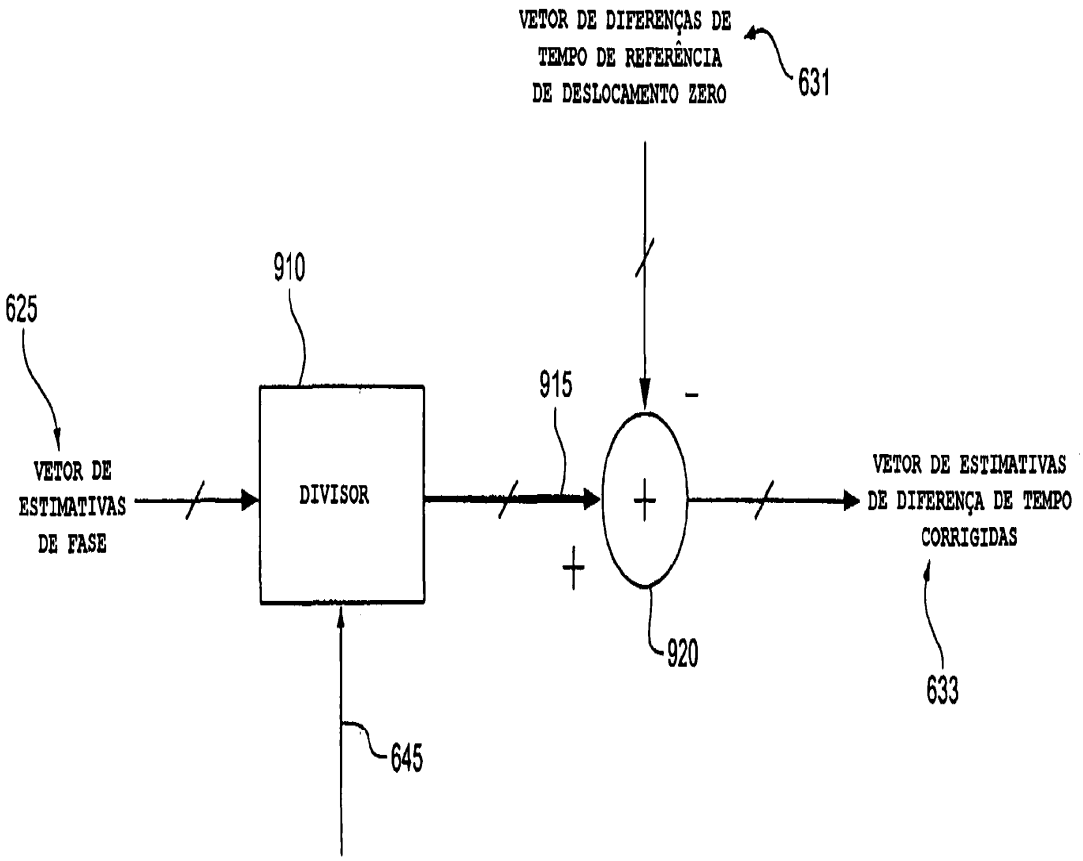

VETOR DE DIFERENÇAS DE TEMPO DE REFERÊNCIA DE DESLOCAMENTO ZERO
631
910
625
915
VETOR DE ESTIMATIVAS DE FASE
DIVISOR
VETOR DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA DE TEMPO CORRIGIDAS
920
633
645

FIG. 9

FIG. 10

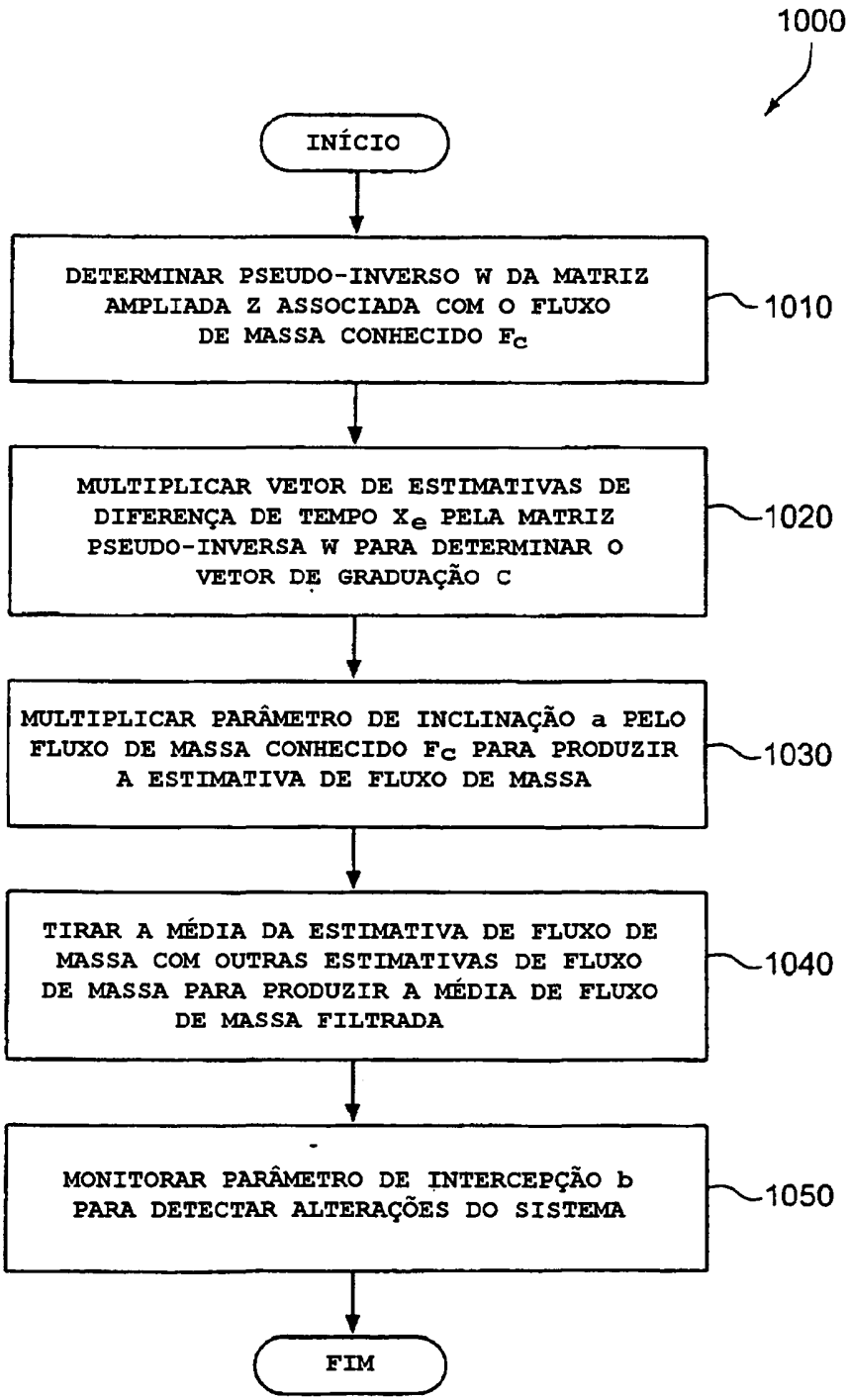
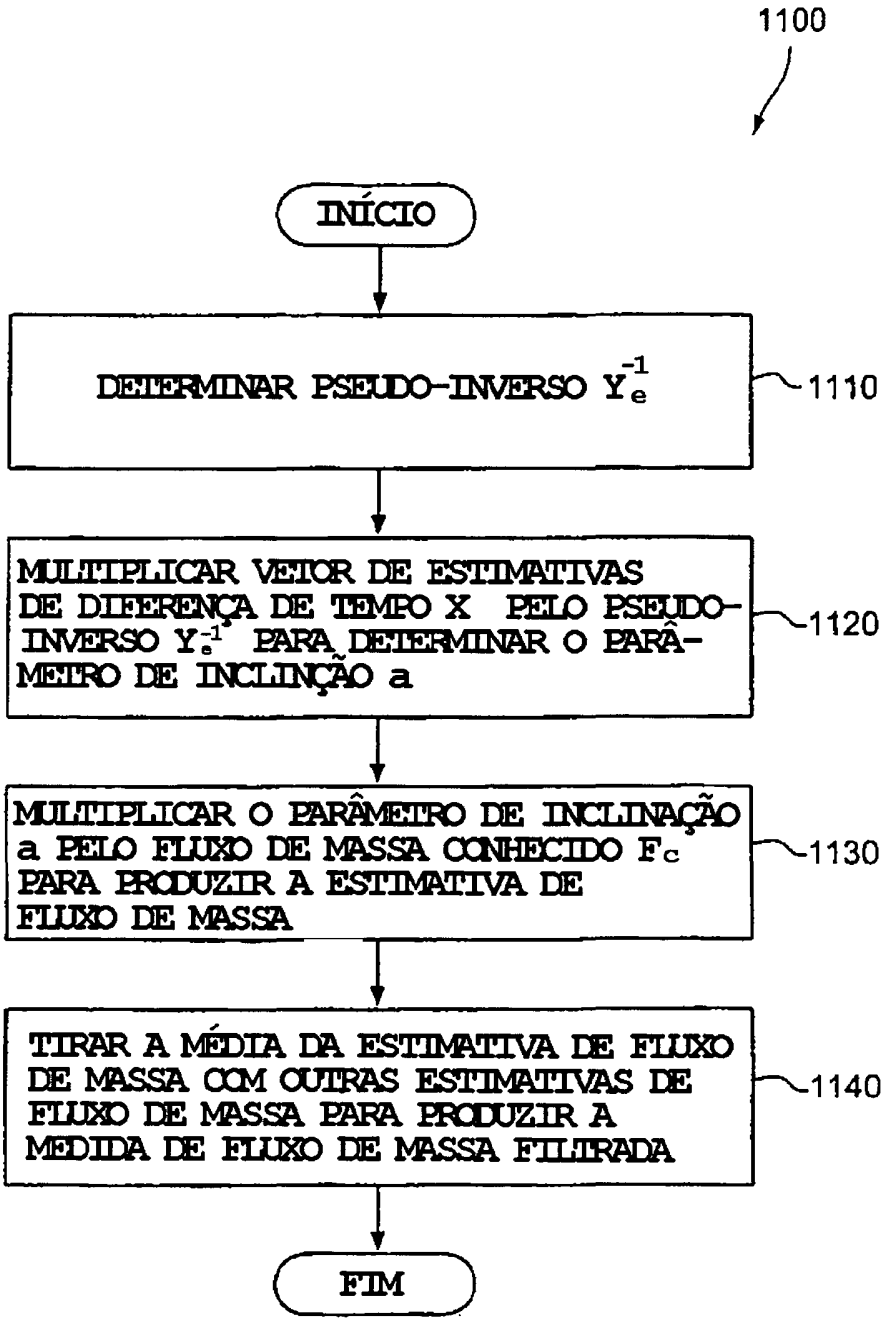

1000
INÍCIO
DETERMINAR PSEUDO-INVERSO W DA MATRIZ AMPLIADA Z ASSOCIADA COM O FLUXO DE MASSA CONHECIDO F_C
1010
MULTIPLICAR VETOR DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA DE TEMPO X_e PELA MATRIZ PSEUDO-INVERSA W PARA DETERMINAR O VETOR DE GRADUAÇÃO C
1020
MULTIPLICAR PARÂMETRO DE INCLINAÇÃO a PELO FLUXO DE MASSA CONHECIDO F_C PARA PRODUZIR A ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA
1030
TIRAR A MÉDIA DA ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA COM OUTRAS ESTIMATIVAS DE FLUXO DE MASSA PARA PRODUZIR A MÉDIA DE FLUXO DE MASSA FILTRADA
1040
MONITORAR PARÂMETRO DE INTERCEPÇÃO b PARA DETECTAR ALTERAÇÕES DO SISTEMA
1050
FIM

FIG. 11


1100
INÍCIO
DETERMINAR PSEUDO-INVERSO Y_e^{-1}
1110
MULTIPLICAR VETOR DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA DE TEMPO X PELO PSEUDO-INVERSO Y_e^{-1} PARA DETERMINAR O PARÂMETRO DE INCLINAÇÃO a
1120
MULTIPLICAR O PARÂMETRO DE INCLINAÇÃO a PELO FLUXO DE MASSA CONHECIDO F_c PARA PRODUZIR A ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA
1130
TIRAR A MÉDIA DA ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA COM OUTRAS ESTIMATIVAS DE FLUXO DE MASSA PARA PRODUZIR A MEDIDA DE FLUXO DE MASSA FILTRADA
1140
FIM

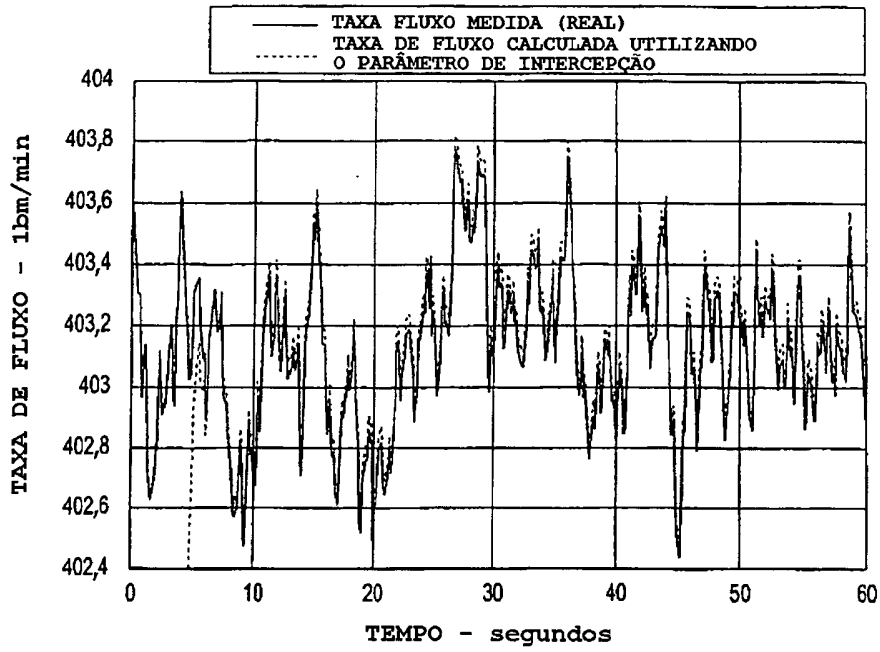

TAXA FLUXO MEDIDA (REAL)
TAXA DE FLUXO CALCULADA UTILIZANDO O PARÂMETRO DE INTERCEPÇÃO
TAXA DE FLUXO - lbm/min
404
403,8
403,6
403,4
403,2
403
402,8
402,6
402,4
0
10
20
30
40
50
60
TEMPO - segundos

FIG. 12

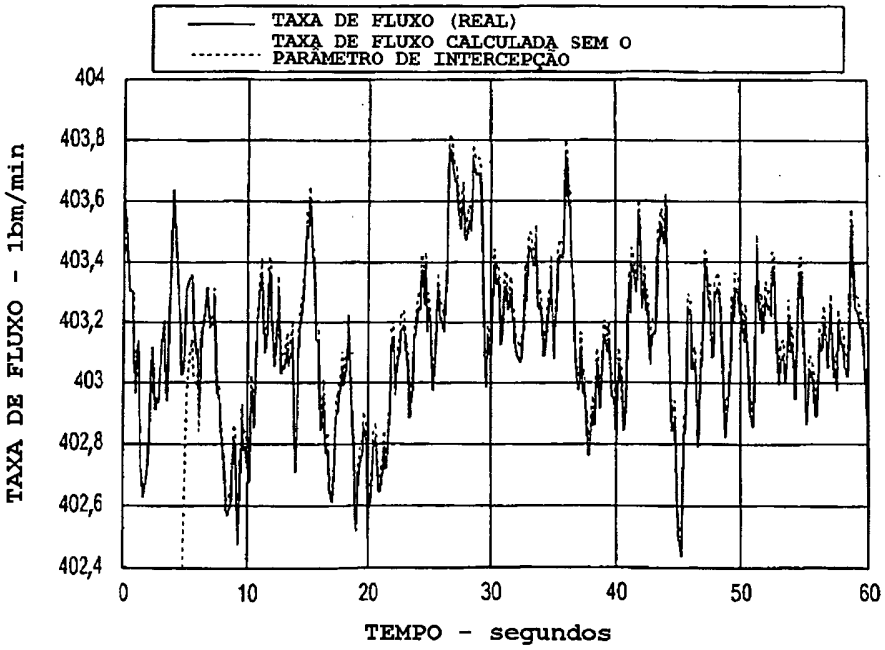

TAXA DE FLUXO (REAL)
TAXA DE FLUXO CALCULADA SEM O PARÂMETRO DE INTERCEPÇÃO
TAXA DE FLUXO - lbm/min
404
403,8
403,6
403,4
403,2
403
402,8
402,6
402,4
0
10
20
30
40
50
60
TEMPO - segundos

FIG. 13

FIG. 14

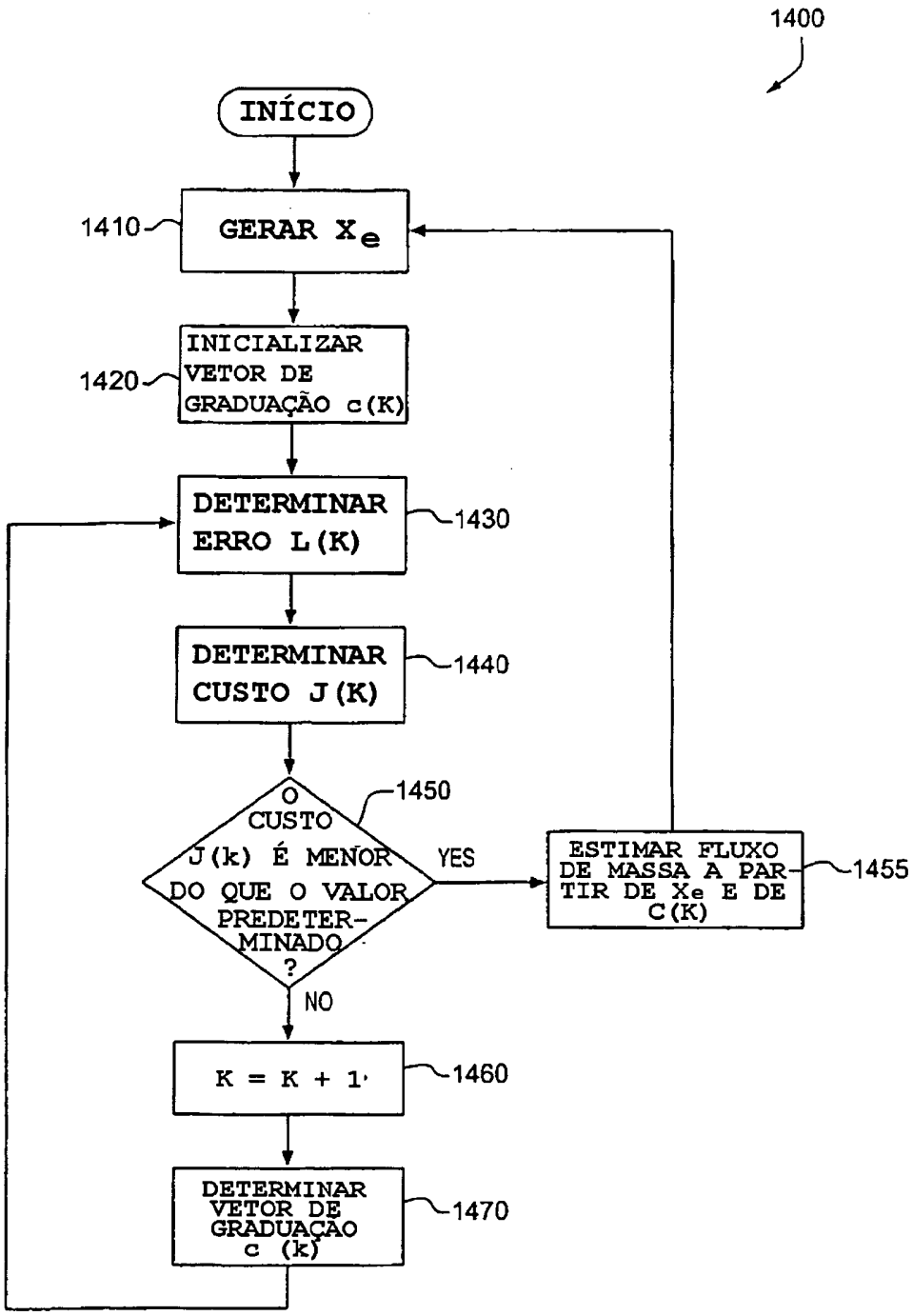

1400
INÍCIO
1410
GERAR X_e
1420
INICIALIZAR VETOR DE GRADUAÇÃO c(K)
DETERMINAR ERRO L(K)
1430
DETERMINAR CUSTO J(K)
1440
O CUSTO J(k) É MENOR DO QUE O VALOR PREDETER-MINADO ?
1450
YES
ESTIMAR FLUXO DE MASSA A PARTIR DE Xe E DE C(K)
1455
NO
K = K + 1
1460
DETERMINAR VETOR DE GRADUAÇÃO c (k)
1470

FIG. 15

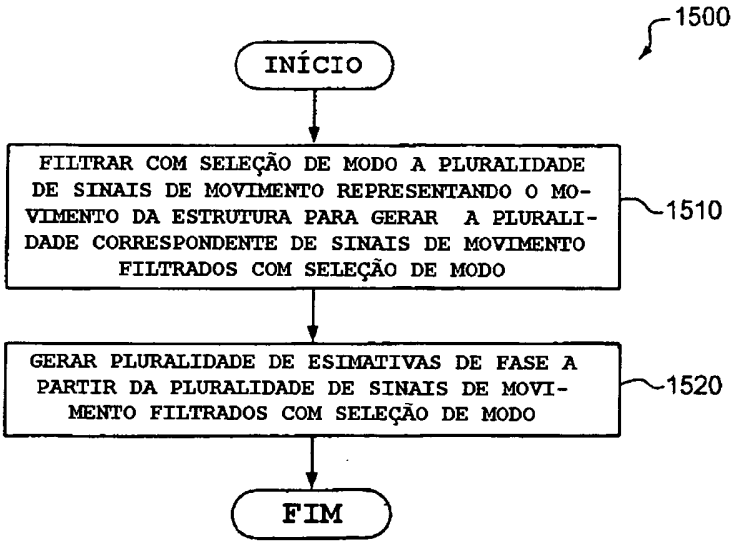

1500
INÍCIO
FILTRAR COM SELEÇÃO DE MODO A PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO REPRESENTANDO O MOVIMENTO DA ESTRUTURA PARA GERAR A PLURALIDADE CORRESPONDENTE DE SINAIS DE MOVIMENTO FILTRADOS COM SELEÇÃO DE MODO
1510
GERAR PLURALIDADE DE ESIMATIVAS DE FASE A PARTIR DA PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO FILTRADOS COM SELEÇÃO DE MODO
1520
FIM

FIG. 16

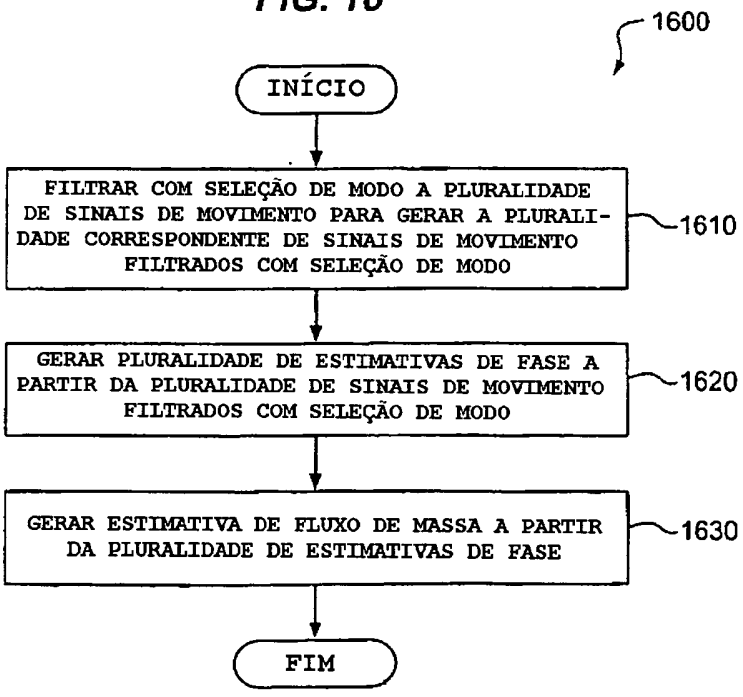

1600
INÍCIO
FILTRAR COM SELEÇÃO DE MODO A PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO PARA GERAR A PLURALIDADE CORRESPONDENTE DE SINAIS DE MOVIMENTO FILTRADOS COM SELEÇÃO DE MODO
1610
GERAR PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE FASE A PARTIR DA PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO FILTRADOS COM SELEÇÃO DE MODO
1620
GERAR ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA A PARTIR DA PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE FASE
1630
FIM

FIG. 17

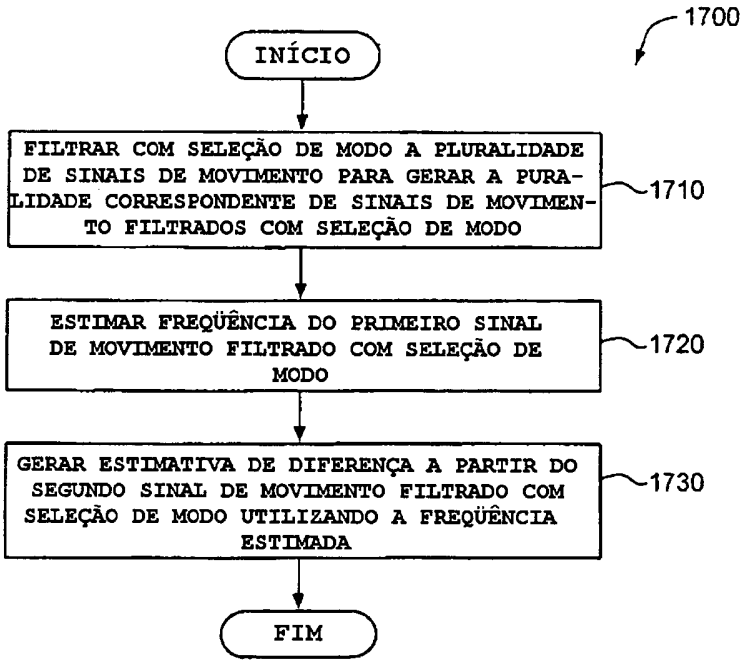

1700
INÍCIO
FILTRAR COM SELEÇÃO DE MODO A PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO PARA GERAR A PLURALIDADE CORRESPONDENTE DE SINAIS DE MOVIMENTO FILTRADOS COM SELEÇÃO DE MODO
1710
ESTIMAR FREQÜÊNCIA DO PRIMEIRO SINAL DE MOVIMENTO FILTRADO COM SELEÇÃO DE MODO
1720
GERAR ESTIMATIVA DE DIFERENÇA A PARTIR DO SEGUNDO SINAL DE MOVIMENTO FILTRADO COM SELEÇÃO DE MODO UTILIZANDO A FREQÜÊNCIA ESTIMADA
1730
FIM

FIG. 18

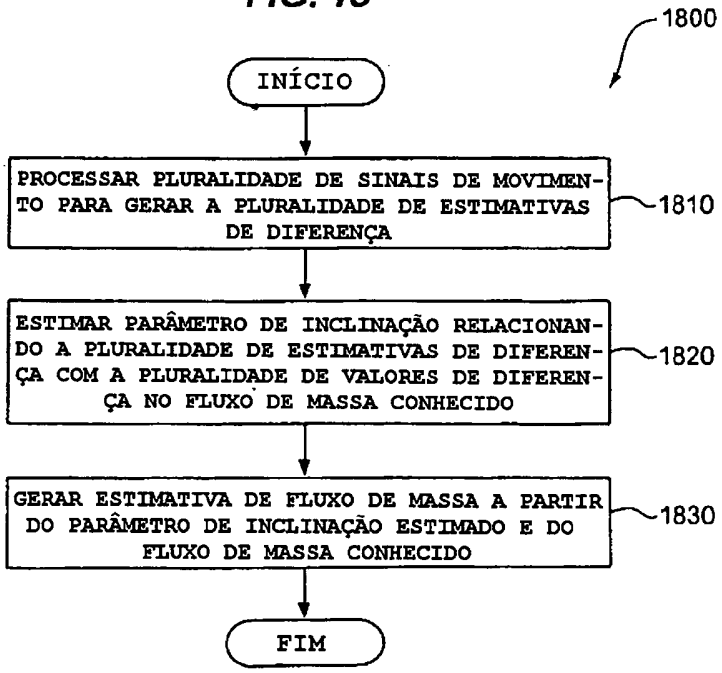
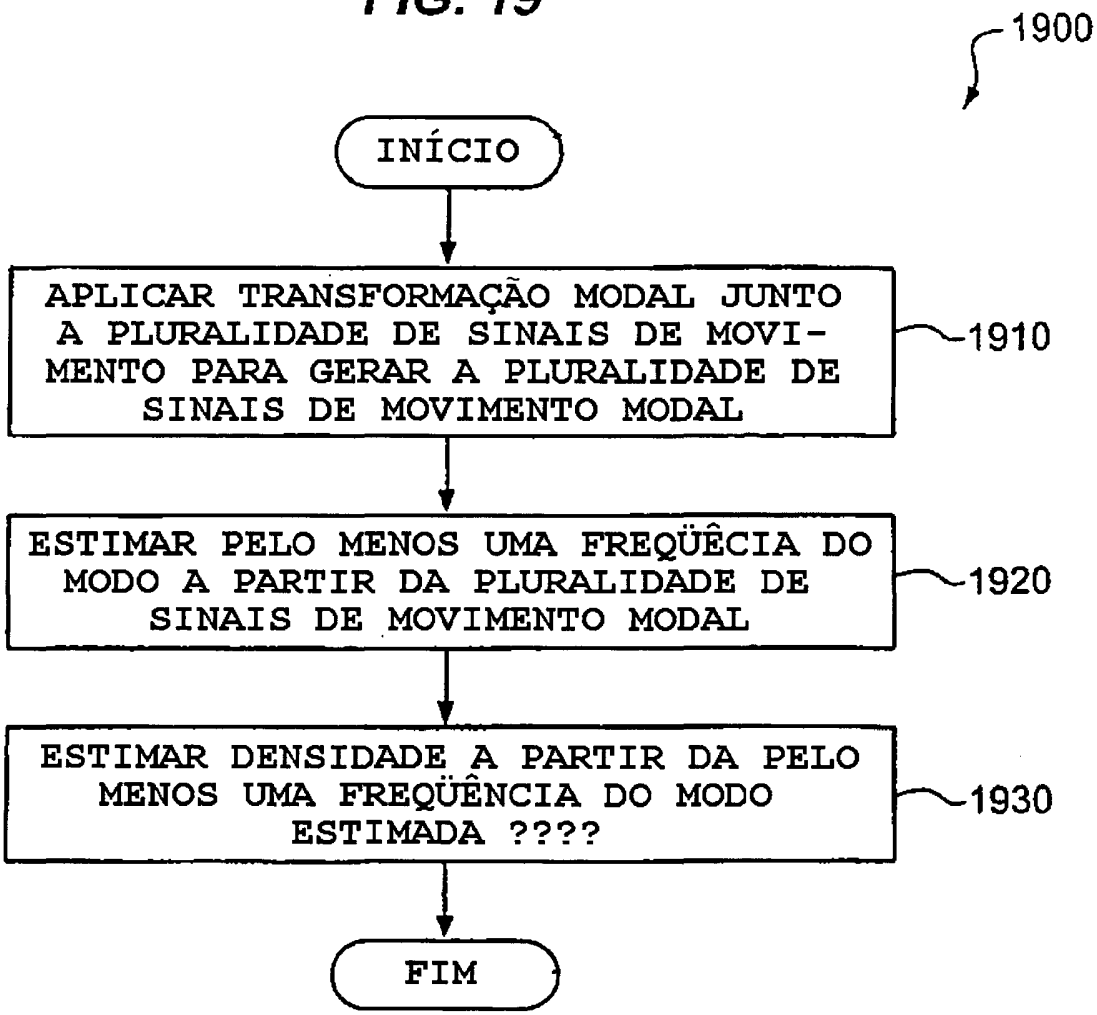

1800
INÍCIO
PROCESSAR PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO PARA GERAR A PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA
1810
ESTIMAR PARÂMETRO DE INCLINAÇÃO RELACIONANDO A PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA COM A PLURALIDADE DE VALORES DE DIFERENÇA NO FLUXO DE MASSA CONHECIDO
1820
GERAR ESTIMATIVA DE FLUXO DE MASSA A PARTIR DO PARÂMETRO DE INCLINAÇÃO ESTIMADO E DO FLUXO DE MASSA CONHECIDO
1830
FIM

FIG. 19


1900
INÍCIO
APLICAR TRANSFORMAÇÃO MODAL JUNTO A PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO PARA GERAR A PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO MODAL
1910
ESTIMAR PELO MENOS UMA FREQÜÊCIA DO MODO A PARTIR DA PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO MODAL
1920
ESTIMAR DENSIDADE A PARTIR DA PELO MENOS UMA FREQÜÊNCIA DO MODO ESTIMADA ????
1930
FIM

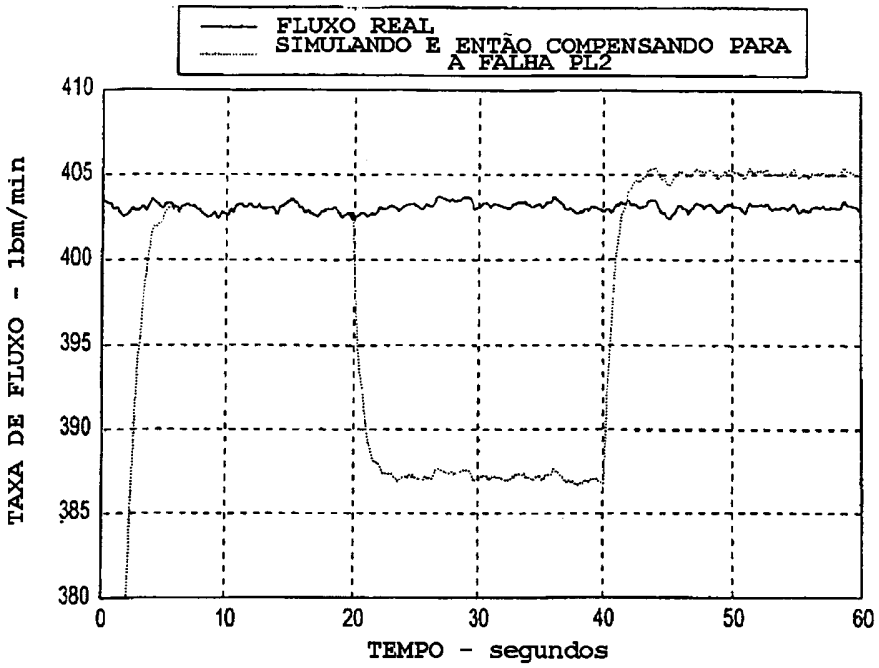


FIG. 20A

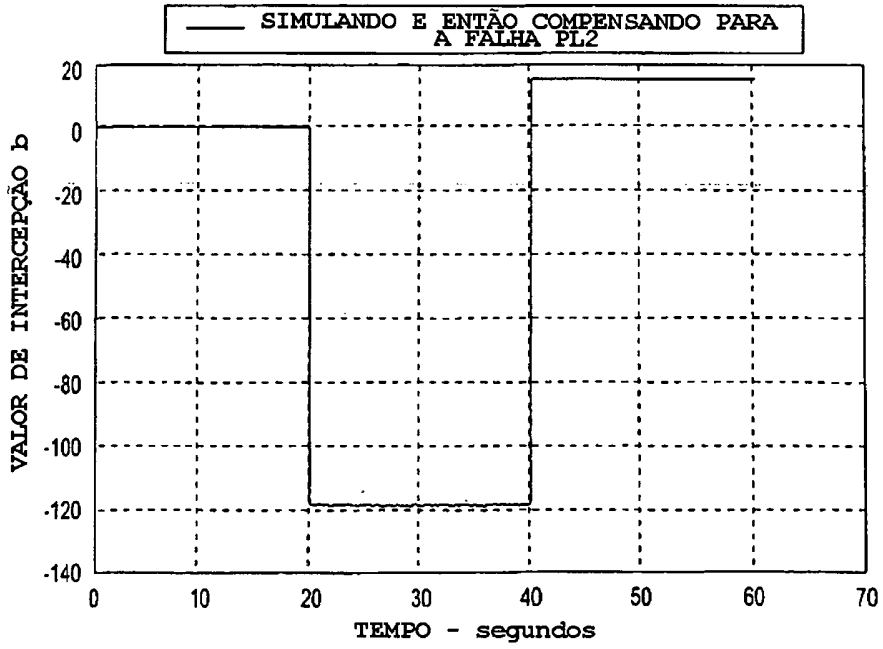


FIG. 20B

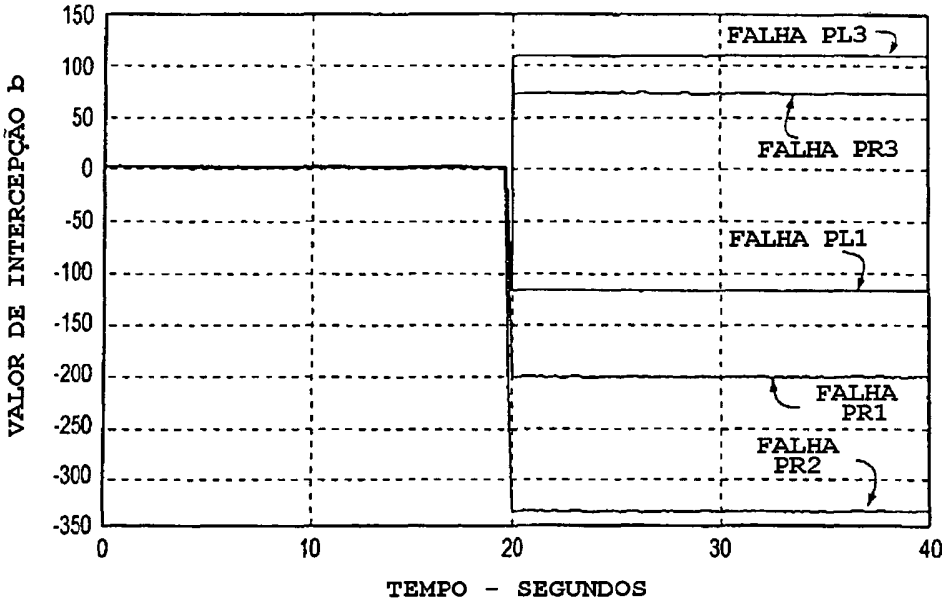

150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
0
10
20
30
40
VALOR DE INTERCEPÇÃO b
TEMPO - SEGUNDOS
FALHA PL3
FALHA PR3
FALHA PL1
FALHA PR1
FALHA PR2

FIG. 21

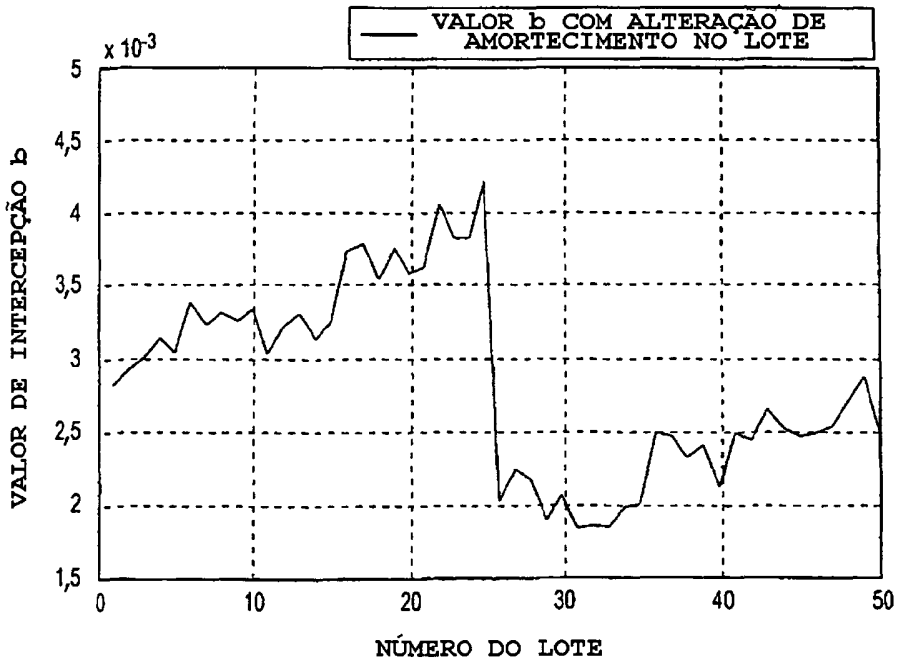

VALOR b COM ALTERAÇÃO DE AMORTECIMENTO NO LOTE
x 10-3
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
0
10
20
30
40
50
VALOR DE INTERCEPÇÃO b
NÚMERO DO LOTE

FIG. 22

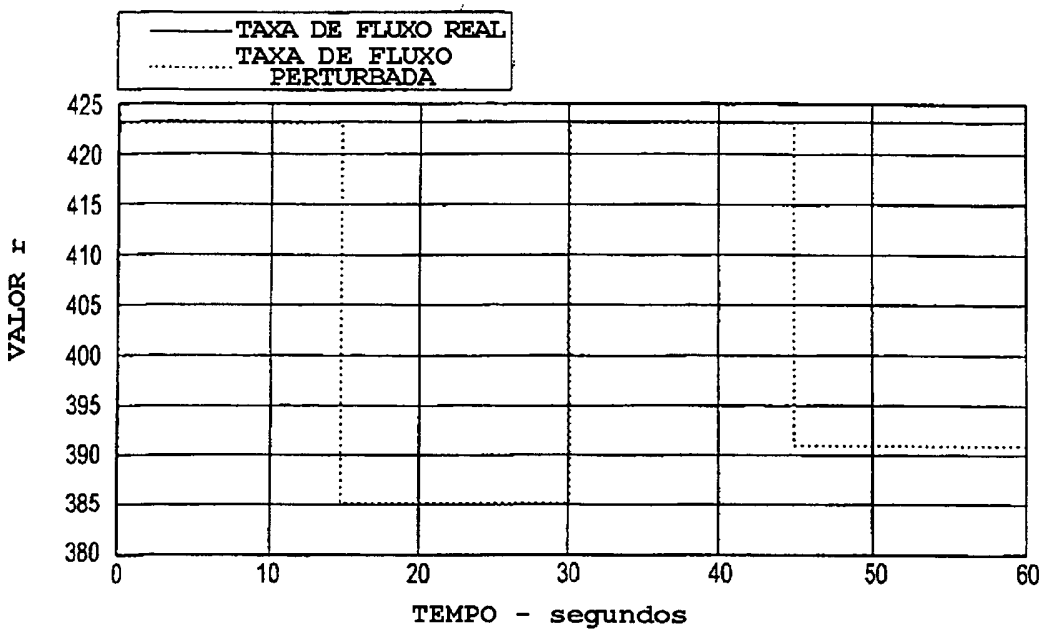

TAXA DE FLUXO REAL
TAXA DE FLUXO PERTURBADA
VALOR r
425
420
415
410
405
400
395
390
385
380
0
10
20
30
40
50
60
TEMPO - segundos

FIG. 23

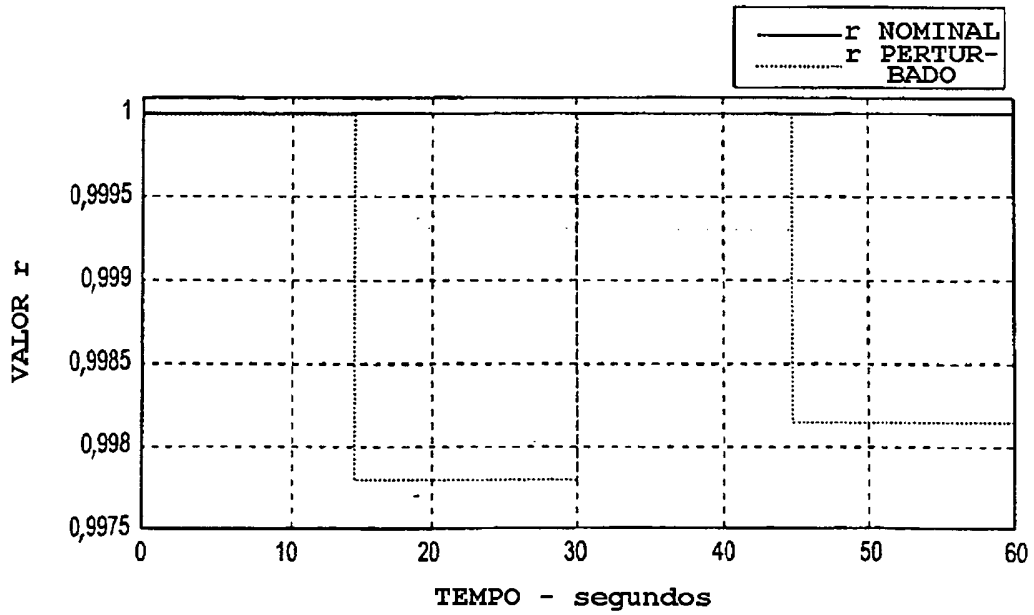

r NOMINAL
r PERTURBADO
VALOR r
1
0,9995
0,999
0,9985
0,998
0,9975
0
10
20
30
40
50
60
TEMPO - segundos

FIG. 24

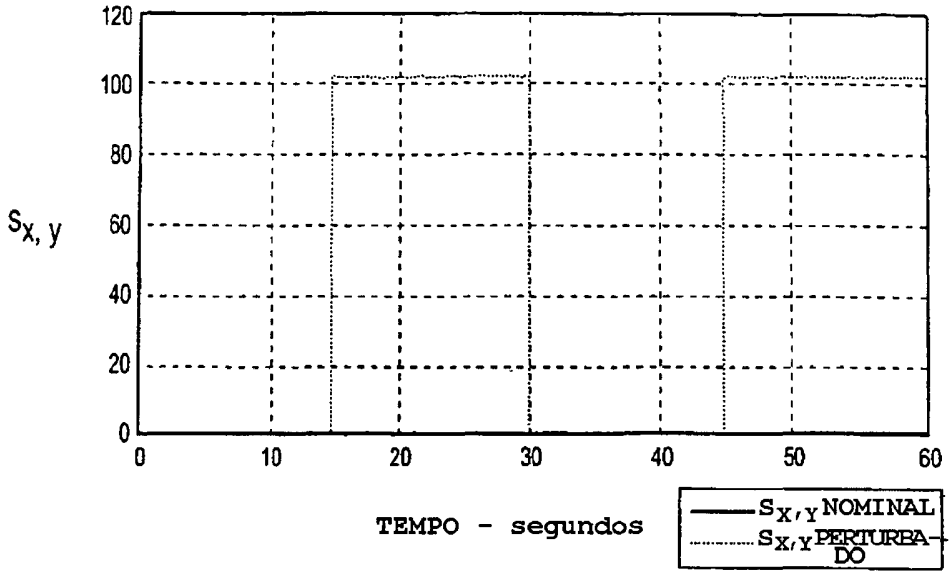

120
100
80
60
40
20
0
$S_{X, Y}$
0
10
20
30
40
50
60
TEMPO - segundos
$S_{X,Y}$ NOMINAL
$S_{X,Y}$ PERTURBADO

FIG. 25

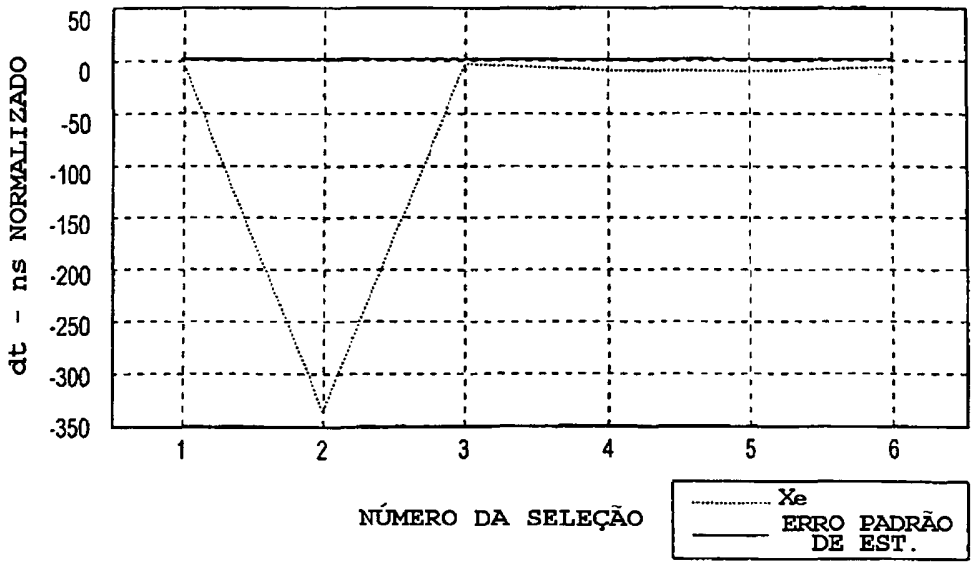

50
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
-350
dt - ns NORMALIZADO
1
2
3
4
5
6
NÚMERO DA SELEÇÃO
Xe
ERRO PADRÃO DE EST.

FIG. 26

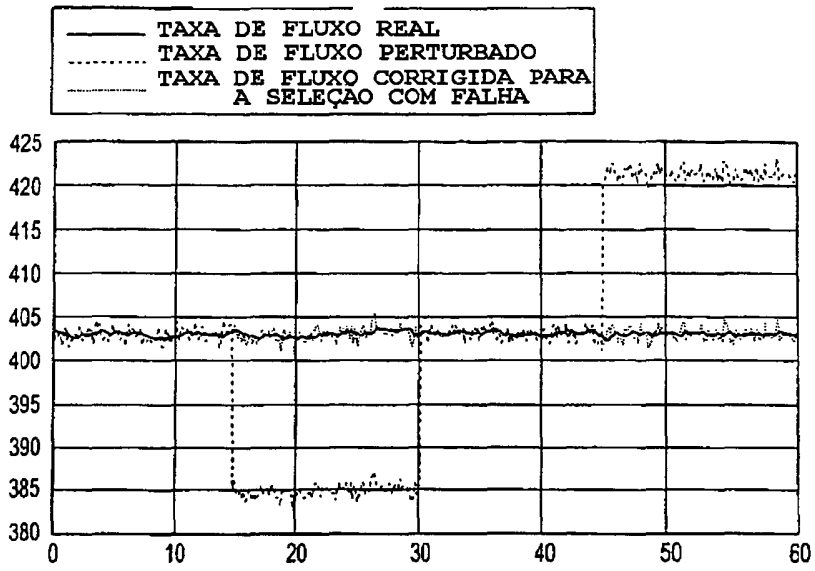

TAXA DE FLUXO REAL
TAXA DE FLUXO PERTURBADO
TAXA DE FLUXO CORRIGIDA PARA A SELEÇÃO COM FALHA
425
420
415
410
405
400
395
390
385
380
0
10
20
30
40
50
60

FIG. 27

FIG. 28

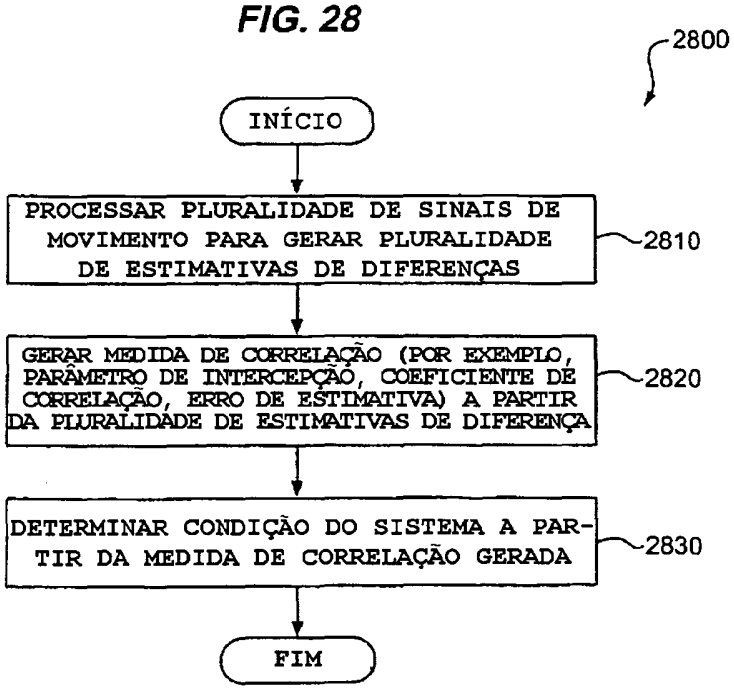

2800
INÍCIO
PROCESSAR PLURALIDADE DE SINAIS DE MOVIMENTO PARA GERAR PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇAS
2810
GERAR MEDIDA DE CORRELAÇÃO (POR EXEMPLO, PARÂMETRO DE INTERCEPÇÃO, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO, ERRO DE ESTIMATIVA) A PARTIR DA PLURALIDADE DE ESTIMATIVAS DE DIFERENÇA
2820
DETERMINAR CONDIÇÃO DO SISTEMA A PARTIR DA MEDIDA DE CORRELAÇÃO GERADA
2830
FIM

FIG. 29

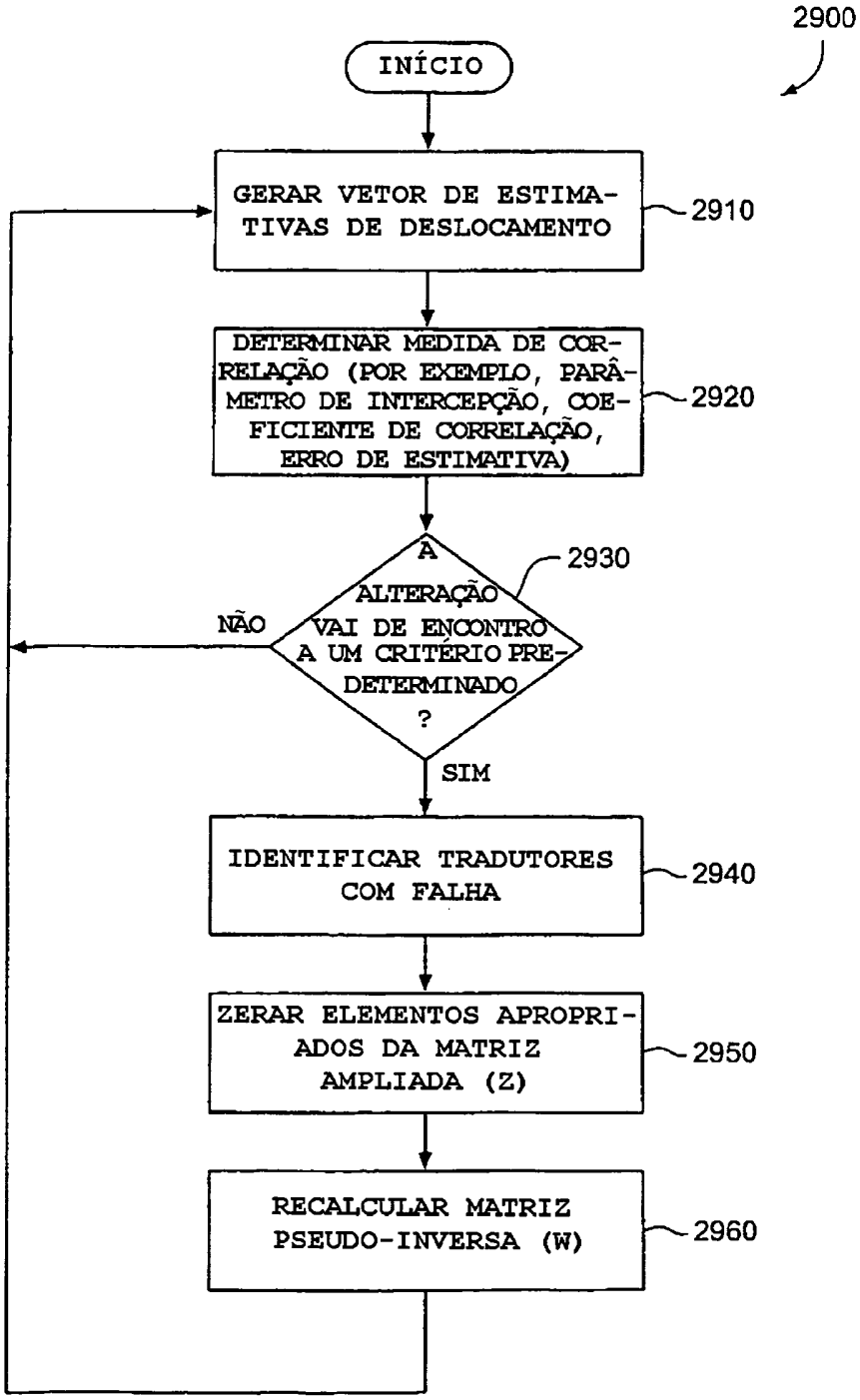
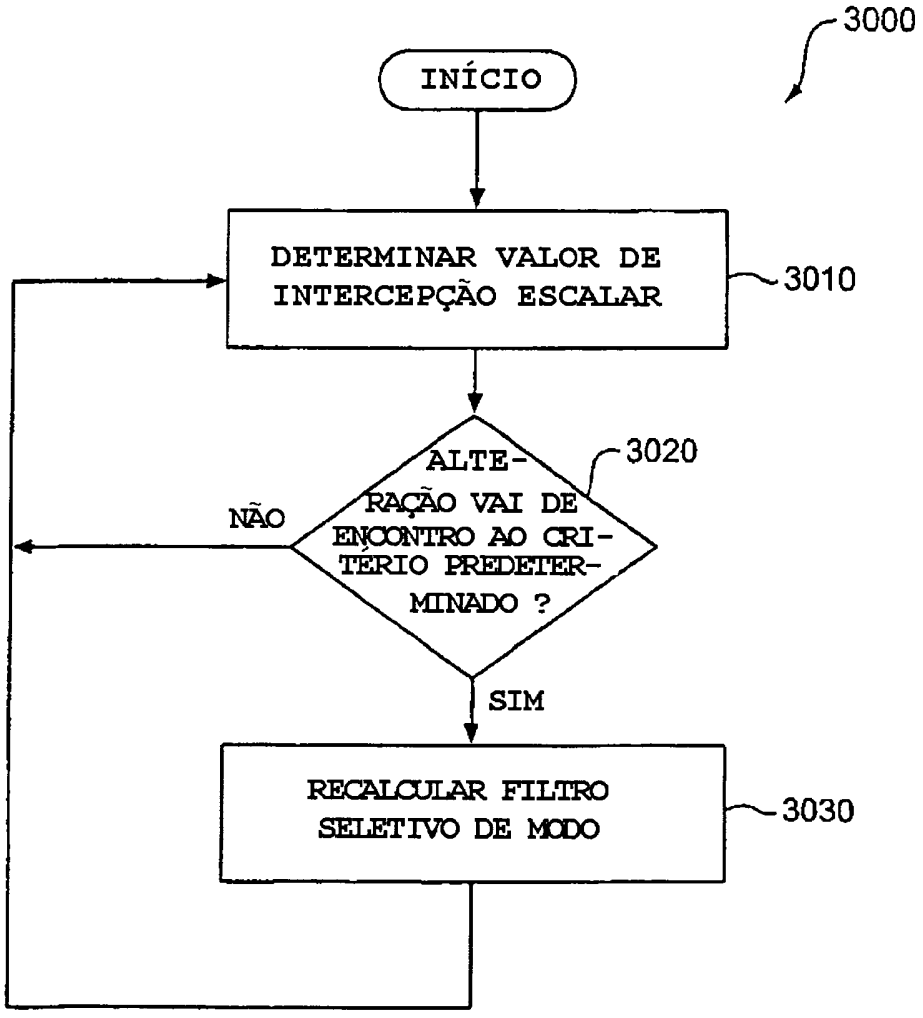

2900
INÍCIO
GERAR VETOR DE ESTIMATIVAS DE DESLOCAMENTO
2910
DETERMINAR MEDIDA DE CORRELAÇÃO (POR EXEMPLO, PARÂMETRO DE INTERCEPÇÃO, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO, ERRO DE ESTIMATIVA)
2920
A ALTERAÇÃO VAI DE ENCONTRO A UM CRITÉRIO PRÉ-DETERMINADO ?
2930
NÃO
SIM
IDENTIFICAR TRADUTORES COM FALHA
2940
ZERAR ELEMENTOS APROPRIADOS DA MATRIZ AMPLIADA (Z)
2950
RECALCULAR MATRIZ PSEUDO-INVERSA (W)
2960

FIG. 30


3000
INÍCIO
DETERMINAR VALOR DE INTERCEPÇÃO ESCALAR
3010
ALTE-RAÇÃO VAI DE ENCONTRO AO CRI-TÉRIO PREDETER-MINADO ?
3020
NÃO
SIM
RECALCULAR FILTRO SELETIVO DE MODO
3030

RESUMO

"MÉTODOS E APARELHO DE MEDIDA DE FLUXO DE MASSA UTILIZANDO FILTRAGEM SELETIVA DE MODO"

O fluxo de massa de um material em um conduto é estimado pela filtragem seletiva de modo de uma pluralidade de sinais de movimento (109) representando o movimento do conduto (100) para gerar uma pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo (315) de modo que os sinais de movimento filtrados com seleção de modo preferencialmente representem o movimento associado com um modo de vibração do contudo. Uma pluralidade de estimativas de fase (325) são geradas a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo. Uma estimativa de fluxo de massa (335) é gerada a partir da pluralidade de estimativas de fase. A pluralidade de estimativas de fase podem ser estimadas utilizando-se uma referência de fase (620) derivada a partir de um da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo. Em algumas modalidades, uma freqüência (710) de um sinal de movimento filtrado com seleção de modo da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo é estimada. O primeiro e o segundo sinais de referência de quadratura (720) são gerados baseado na freqüência estimada. A pluralidade de estimativas de fase (740) são geradas a partir da pluralidade de sinais de movimento filtrados com seleção de modo e do primeiro e do segundo sinais de referência. Uma pluralidade de estimativas de referência de tempo b podem ser geradas a partir da pluralidade de estimativas de fase e a estimativa de fluxo de massa