



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

(11) PI 0419040-8 B1



* B R P I 0 4 1 9 0 4 0 B 1 *

(22) Data do Depósito: 27/09/2004

(45) Data de Concessão: 28/06/2016

(54) Título: MÉTODO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO PARA UM CONDUTO E APARELHO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO E UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR DIREITO PARA UM CONDUTO

(51) Int.Cl.: G01F 1/84; G01F 25/00

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

(72) Inventor(es): THOMAS DEAN SHARP, DAVID FREDERICK NORMEN, STUART J. SHELLY

"MÉTODO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO PARA UM CONDUTO e APARELHO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO E UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR DIREITO PARA UM CONDUTO"

5 1. CAMPO DA INVENÇÃO

A invenção está relacionada com o campo de medidores de fluxo e em particular, com medidores de fluxo do tipo Coriolis.

2. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA ANTERIOR

10 A taxa do fluxo de massa é medida em um medidor de fluxo Coriolis por se vibrar um tubo(s) transportando fluido em um movimento sinusoidal e medir o retardo de tempo (ou ângulo de fase) entre a resposta da vibração em duas ou mais localizações no tubo(s). Para situações práticas, o retardo 15 de tempo varia linearmente com a taxa de fluxo de massa, entretanto, o retardo de tempo geralmente não é zero no fluxo de massa zero. Normalmente existe um retardo ou deslocamento de fluxo zero causado por uma série de fatores tal como amortecimento não proporcional, resposta de flexibilidade 20 residual, interferência eletromagnética, ou retardo de fase nos componentes eletrônicos do instrumento.

Este deslocamento de fluxo zero tipicamente é corrigido por se medir o deslocamento de fluxo zero na condição de fluxo zero e por se subtrair o deslocamento medido das 25 medições subsequentes feitas durante o fluxo. Isto seria suficiente para corrigir o problema de deslocamento de fluxo zero se o deslocamento de fluxo zero permanecesse constante. Infelizmente, o deslocamento de fluxo zero pode ser afetado

por pequenas alterações no meio ambiente (tal como temperatura) ou por alterações no sistema de tubulação através do qual o material está fluindo. As alterações no deslocamento de fluxo zero irão causar erros nas taxas de fluxo medidas.

5 Durante as operações normais, podem existir longos períodos de tempo entre as condições que não são de fluxo. O medidor de fluxo do tipo Coriolis pode ser calibrado por se zerar o medidor somente durante estas condições que não são de fluxo. As alterações no deslocamento zero com o tempo podem 10 causar erros significativos no fluxo medido.

Portanto, existe uma necessidade por um sistema e método para calibrar o deslocamento de fluxo zero durante o fluxo.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

15 São revelados um método e um aparelho que permitem o cálculo periódico da fase relativa do autovetor esquerdo para um conduto que vibra. Durante a operação normal, dois acionadores são utilizados em conjunto para excitar o modo de curvatura principal do conduto. Periodicamente, o primeiro e depois o segundo, dentre os dois acionadores, são desativados, permitindo medições que capacitam a determinação da 20 fase relativa do autovetor esquerdo para o conduto que vibra.

ASPECTOS

25 Um aspecto da invenção inclui um método, compreendendo:

fluir um material através de um conduto enquanto excitando um modo de vibração do conduto;

medir o movimento relativo do conduto que vibra;
periodicamente determinar uma fase relativa de um
autovetor esquerdo para o conduto.

De preferência, o método adicionalmente compreende:
5 determinar uma fase relativa de um autovetor di-
reito para o conduto;

determinar um fluxo real do material através do
conduto utilizando a fase relativa do autovetor esquerdo e a
fase relativa do autovetor direito.

10 De preferência, o método adicionalmente compreende:
determinar um fluxo não corrigido do material
através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor
direito;

15 determinar um deslocamento zero para o fluxo do
material através do conduto por comparar o fluxo não corri-
gido com o fluxo real.

De preferência, o método adicionalmente compreende:
20 determinar um fluxo de material através do conduto
utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida
pelo deslocamento zero.

De preferência, o método adicionalmente compreende:
determinar a fase relativa de um autovetor direito;
determinar um deslocamento zero para o fluxo do
material através do conduto por calcular a média da fase re-
lativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor
esquerdo.

De preferência, o método adicionalmente compreende:
determinar um fluxo de material através do conduto

utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida pelo deslocamento zero.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde a fase relativa do autovetor esquerdo é corrigida em 5 relação a uma resposta de flexibilidade residual e a uma interferência eletromagnética.

De preferência, o método adicionalmente compreende:
medir uma primeira fase relativa entre duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando o 10 modo de vibração do conduto utilizando tanto um primeiro acionador como um segundo acionador, onde o primeiro acionador é separado do segundo acionador;

medir uma segunda fase relativa entre as duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando 15 o modo de vibração do conduto utilizando somente o segundo acionador;

calcular a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética associadas com o primeiro acionador por subtrair a segunda fase relativa da primeira fase 20 relativa;

medir uma terceira fase relativa entre as duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando somente o segundo acionador;

25 calcular a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética associadas com o segundo acionador por subtrair a terceira fase relativa da primeira fase relativa.

Outro aspecto da invenção compreender:

fluir um material através de um conduto enquanto excitando um modo de vibração do conduto utilizando pelo menos dois acionadores em uma configuração de separados;

5 medir o movimento do conduto que vibra;

determinar uma primeira relação de posição entre uma primeira localização no conduto e um primeiro dentre os acionadores enquanto acionando o modo de vibração do conduto utilizando somente o primeiro dos acionadores;

10 determinar uma segunda relação de posição entre a primeira localização no conduto e um segundo dos acionadores enquanto acionando o modo de vibração do conduto utilizando somente o segundo dos acionadores;

determinar um autovetor esquerdo utilizando a primeira relação de posição e a segunda relação de posição.

15 De preferência, o método adicionalmente compreende onde o movimento do conduto é medido com um primeiro sensor que está localizado junto ao primeiro acionador e com um segundo sensor que está localizado junto ao segundo acionador.

20 De preferência, o método adicionalmente compreende:

determinar uma fase relativa de um autovetor direito para o conduto enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando tanto o primeiro como o segundo acionador;

25 determinar um fluxo real do material através do conduto por subtrair a fase relativa do autovetor esquerdo da fase relativa do autovetor direito.

De preferência, o método adicionalmente compreende:

determinar um fluxo não corrigido do material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito;

5 determinar um deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto por comparar o fluxo não corrigido com o fluxo real;

determinar um fluxo de material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigido pelo deslocamento zero.

10 De preferência, o método adicionalmente compreende:

determinar a fase relativa de um autovetor direito para o conduto enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando tanto o primeiro como o segundo acionadores;

15 determinar um deslocamento zero para o fluxo de material através do conduto por calcular a média da fase relativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor esquerdo;

determinar um fluxo de material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida 20 pelo deslocamento zero.

De preferência, o método adicionalmente compreende:

medir um primeiro delta tempo entre a primeira localização e uma segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando os pelo menos dois acionadores;

25 medir um segundo delta tempo entre a primeira localização e a segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando todos menos o primeiro dos acionadores;

medir um terceiro delta tempo entre a primeira lo-

calização e a segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando todos menos o segundo dos acionadores;

calcular um primeiro valor de correção utilizando o primeiro delta tempo e o segundo delta tempo;

5 calcular um segundo valor de correção utilizando o primeiro delta tempo e o terceiro delta tempo;

ajustar a primeira relação de posição utilizando o primeiro valor de correção, antes de calcular o autovetor esquerdo; e

10 ajustar a segunda relação de posição utilizando o segundo valor de correção, antes de calcular o autovetor esquerdo.

De preferência, o método adicionalmente compreende:

fluir um material através de um conduto enquanto 15 excitando um modo de vibração do conduto;

medir o movimento relativo do conduto que vibra;

medir uma fase relativa de um autovetor direito enquanto excitando o modo de vibração do conduto;

determinar o fluxo de material através do conduto 20 utilizando a fase relativa de um autovetor direito corrigido por um deslocamento zero;

determinar um novo deslocamento zero sem parar o fluxo de material através do conduto;

determinar o fluxo de material através do conduto 25 utilizando a fase relativa de um autovetor direito corrigido pelo novo deslocamento zero.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde o novo deslocamento zero é determinado utilizando uma

fase relativa de um autovetor esquerdo para o conduto.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde o novo deslocamento zero é determinado periodicamente.

De preferência, o método adicionalmente compreende 5 onde a periodicidade é em função de precisão requerida na medição do fluxo.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde o novo deslocamento zero é determinado quando ocorre uma alteração em um parâmetro ambiental medido.

10 Outro aspecto da invenção compreende:

um conduto configurado para conter um material fluindo através do conduto;

pelo menos dois acionadores configurados para exercitar uma pluralidade de modos de vibração do conduto;

15 um aparelho sensor configurado para medir o movimento relativo do conduto que vibra;

um dispositivo configurado para periodicamente determinar uma fase relativa de um autovetor esquerdo para o conduto utilizando o movimento relativo do conduto que vibra; 20

o dispositivo também configurado para determinar uma fase relativa de um autovetor direito para o conduto utilizando o movimento relativo do conduto que vibra.

De preferência, o método adicionalmente compreende 25 onde um fluxo real do material através do conduto é determinado por se utilizar a diferença na fase relativa do autovetor esquerdo comparada com a fase relativa do autovetor direito.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde um fluxo do material através do conduto é determinado utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida com um deslocamento zero.

5 De preferência, o método adicionalmente compreende: Determinar o deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto por calcular a média da fase relativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor esquerdo.

10 De preferência, o método adicionalmente compreende onde um fluxo real do material através do conduto é determinado por subtrair a fase relativa do autovetor esquerdo da fase relativa do autovetor direito; e
o deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto é determinado por se comparar o fluxo determinado utilizando a fase relativa do autovetor direito com o fluxo real.

15 De preferência, o método adicionalmente compreende onde a fase relativa do autovetor esquerdo é corrigida para uma resposta de flexibilidade residual e para a interferência eletromagnética.

20 De preferência, o método adicionalmente compreende onde uma primeira fase relativa entre uma primeira localização no conduto que vibra e uma segunda localização no conduto que vibra é determinada enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando os pelo menos dois acionadores; uma segunda fase relativa entre a primeira localização no conduto que vibra e a segunda localização no conduto

to que vibra é determinada enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando todos menos um primeiro dos pelo menos dois acionadores;

uma terceira fase relativa entre a primeira localização no conduto que vibra e a segunda localização no conduto que vibra é determinada enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando todos menos um segundo dos pelo menos dois acionadores; e

10 a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética para o primeiro dos pelo menos dois acionadores são determinadas por se subtrair a segunda fase relativa da primeira fase relativa;

15 a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética para o segundo dos pelo menos dois acionadores são determinadas por se subtrair a terceira fase relativa da primeira fase relativa.

De preferência, o método adicionalmente compreende onde o aparelho sensor compreende pelo menos dois sensores em uma relação separada.

20 De preferência, o método adicionalmente compreende onde o dispositivo é um processador executando código que causa a determinação da fase relativa do autovetor esquerdo e direito.

25 De preferência, o método adicionalmente compreende onde o dispositivo é um circuito que causa a determinação da fase relativa do autovetor esquerdo e direito.

De preferência, o método adicionalmente compreende: um conduto configurado para conter um material

fluindo através do conduto;

um dispositivo para excitar um modo de vibração do conduto;

5 um dispositivo para perceber o movimento relativo do conduto que vibra;

um dispositivo para periodicamente determinar uma fase relativa de um autovetor esquerdo para o conduto;

um dispositivo para determinar uma fase relativa de um autovetor direito para o conduto;

10 um dispositivo para determinar um deslocamento zero para o material fluindo através do conduto por calcular a média da fase relativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor esquerdo;

15 um dispositivo para determinar um fluxo real de material por utilizar a fase relativa do autovetor direito corrigida pelo deslocamento zero.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A FIG. 1A é uma vista de cima de um conduto em uma posição não deflectida em uma modalidade ilustrativa da invenção.

A FIG 1B é uma vista de cima de um conduto em uma posição deflectida correspondendo ao modo de curvatura principal em uma modalidade ilustrativa da invenção.

25 A FIG. 1C é uma vista de cima de um conduto em uma posição deflectida correspondendo a um modo de curvatura induzido por forças Coriolis em uma modalidade ilustrativa da invenção.

A FIG. 2 é um fluxograma para determinar o autove-

tor esquerdo em uma modalidade ilustrativa da invenção.

A FIG. 3 é um fluxograma para determinar a flexibilidade residual e a interferência eletromagnética em uma modalidade ilustrativa da invenção.

5 A FIG. 4 é um gráfico apresentando os ΔT_s relativos medidos utilizando um medidor de fluxo de tubo único não equilibrado enquanto trocando entre os acionadores em uma modalidade ilustrativa da invenção.

10 A FIG. 5 é um fluxograma para recalibrar o deslocamento zero de um medidor de fluxo durante o fluxo em uma modalidade ilustrativa da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA MODALIDADE PREFERIDA

As FIGS. 1 à 5 e a descrição seguinte descrevem exemplos específicos para ensinar os versados na técnica como construir e utilizar o melhor modo da invenção. Para propósito de ensinar os princípios da invenção, alguns aspectos convencionais foram simplificados ou omitidos. Os versados da técnica irão apreciar variações a partir destes exemplos que se situam dentro do escopo da invenção. Os versados na técnica irão apreciar que os aspectos descritos abaixo podem ser combinados de vários modos para formar muitas variações da invenção. Como resultado, a invenção não está limitada aos exemplos específicos descritos abaixo, mas somente pelas reivindicações e por seus equivalentes.

25 Fundamento Teórico

A operação dos medidores de fluxo Coriolis pode ser descrita utilizando fórmulas matemáticas. O sistema geral das equações diferenciais de primeira ordem descrevendo

o movimento de um sistema linear é:

$$\begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na Equação (1), M e K são as matrizes de massa e de rigidez do sistema e C é uma matriz geral de amortecimento que pode

5 ter um componente simétrico devido ao amortecimento e um componente simétrico de distorção devida à força Coriolis.

$$Aq + Bq = u \quad (2)$$

A equação (1) pode ser reescrita como a equação 2, onde A é igual à matriz $\begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix}$ e B é igual à matriz

$$10 \quad \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \quad \text{e } u \text{ é igual a } \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix}.$$

A percepção da equação de movimento pode ser obtida por se observar as equações 1 e 2. O problema de autovalor generalizado associado com a Equação (2) pode ser solucionado para os autovetores direitos, $\Phi^{(r)}$, de modo que:

$$15 \quad B\Phi^{(r)} = -A\Phi^{(r)}\lambda \quad (3)$$

Para matrizes simétricas A e B , o autovetor pode ser utilizado para diagonalizar, ou separar as equações de movimento.

As equações separadas são prontamente resolvidas. Para um sistema não-simétrico, por exemplo, onde C inclui a matriz

20 Coriolis, os autovetores direitos não diagonalizam as equações de movimento, resultando em equações acopladas. As equações acopladas são mais difíceis de resolver e atrasam a percepção da solução. Os autovetores esquerdos são requeridos para diagonalizar matrizes A e B não-simétricas. As derivações seguintes apresentam o processo. Os autovetores es-

querdos são obtidos por se resolver o seguinte problema de autovalor generalizado:

$$\phi^{(l)^T} B = -\phi^{(l)^T} A \lambda \quad (4)$$

$$B^T \phi^{(l)} = -A^T \phi^{(l)} \lambda$$

5 M e K geralmente seriam simétricos para um medidor de fluxo Coriolis. Para a ausência de fluxo, C também seria simétrico, portanto, as matrizes do sistema, A e B seriam simétricas. Neste caso, a Equações (3) e (4) são idênticas e os autovetores, esquerdo e direito, são os mesmos. Quando existe 10 fluxo, a não simetria associada da matriz C causa que os autovetores, esquerdo e direito, sejam diferentes.

Considere o j-ésimo autovetor direito:

$$B \phi_j^{(r)} = -A \phi_j^{(r)} \lambda_j \quad (5)$$

E o i-ésimo autovetor esquerdo:

$$\phi_i^{(l)^T} B = -\phi_i^{(l)^T} A \lambda_i \quad (6)$$

Pré-multiplicando a Equação (5) por $\phi_i^{(l)^T}$ e multiplicando posteriormente a Equação (6) por $\phi_j^{(r)}$ e subtraindo os dois campos:

$$0 = -\phi_i^{(l)^T} A \phi_j^{(r)} (\lambda_j - \lambda_i) \quad (7)$$

$$20 \Rightarrow \phi_i^{(l)^T} A \phi_j^{(r)} = 0 \text{ para } i \neq j$$

Por se multiplicar a Equação (5) por $\frac{1}{\lambda_j}$ e a Equação (6) por

$\frac{1}{\lambda_j}$ e seguindo o mesmo procedimento, podemos apresentar:

$$\Rightarrow \phi_i^{(l)^T} B \phi_j^{(r)} = 0 \text{ para } i \neq j \quad (8)$$

As equações (7) e (8) apresentam que por pré-multiplicar e 25 multiplicar posteriormente qualquer uma das matrizes do sistema, A ou B, pela matriz dos autovetores esquerdos, $\Phi^{(L)^T}$, e pela matriz dos autovetores direitos, $\Phi^{(R)}$, respectivamente,

as matrizes do sistema são diagonalizadas.

$$\Phi^{(L)^T} A \Phi^{(R)} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & M_A & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Phi^{(L)^T} B \Phi^{(R)} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & M_B & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

O fato de que as matrizes de autovetores esquerdos e direitos diagonaliza as matrizes do sistema significa que tanto o conjunto de autovetores direitos como o conjunto de autovetores esquerdos são linearmente independentes. Qualquer conjunto pode ser utilizado como uma base de um sistema de coordenadas para a resposta. Reconhecer que a diferença entre os autovetores esquerdos e direitos é devido à matriz Coriolis não simétrica forma a base desta invenção.

Em termos de um modelo matemático do medidor, as matrizes de massa, de rigidez e de amortecimento que modelam efeitos não Coriolis são simétricas. Para um sistema que não é de fluxo, os autovetores esquerdos e direitos são idênticos (dentro de um fator de escala arbitrário). A força Coriolis associada com o fluxo, entretanto, se manifesta no modelo matemático como uma matriz de amortecimento simétrica distorcida. A matriz Coriolis simétrica distorcida causa que os autovetores esquerdos e direitos do sistema sejam diferentes. Para um sistema que flui sem amortecimento não proporcional, a fase relativa entre coeficientes diferentes dos autovetores esquerdos é igual e oposta à fase relativa entre os mesmos coeficientes nos autovetores direitos. Para um sistema sem amortecimento proporcional, estes valores de fase são deslocados igualmente para ambos autovetores esquerdos e direitos, entretanto, a diferença permanece a mesma.

Assim, se as características da fase dos autovetores esquerdos e direitos puderem ser medidas precisamente, estas características permitem a fase podendo ser atribuída para o deslocamento zero a partir do amortecimento não proporcional 5 e a fase que pode ser atribuída para o fluxo de material ser distinguida, eliminado os erros de deslocamento zero associados.

As características de flexibilidade residual, de interferência eletromagnética e do sistema de medição eletrônica também contribuem para o deslocamento zero. Uma interpretação destes efeitos é que eles introduzem erro na medição da fase do autovetor direito. Se o modo de acionamento (autovetor direito) pudesse ser medido exatamente, o amortecimento não proporcional seria o único efeito causando deslocamento zero e este erro seria facilmente distinguido dos efeitos do fluxo utilizando a informação dT do autovetor esquerdo e direito.

Em Operação

A Figura 1 apresenta uma vista de cima de um conduto 102 configurado para conter um material fluindo através do conduto. D1 e D2 são dois acionadores (também chamados de atuadores) espaçados ao longo do conduto 102. No modo preferido, os dois acionadores são espaçados simetricamente ao redor do centro axial do conduto. Os acionadores são configurados para transmitir uma força para o conduto 102 para excitar uma pluralidade de modos de vibração no conduto 102. A força pode ser substancialmente coerente (por exemplo, confinada a uma frequência estreita) ou pode ser de banda

larga. Os acionadores podem ser dispositivos conhecidos, como um imã, ligado com o conduto, e uma bobina, ligada com uma referência, através da qual uma corrente oscilante é passada.

5 S1 e S2 descrevem dois sensores localizados juntos com os acionadores D1 e D2. Os sensores são configurados para produzir uma pluralidade de sinais representando a localização e o movimento do conduto 102. Os sensores podem incluir uma variedade de dispositivos, tal como transdutores de velocidade do tipo bobina, sensores ultra-sônicos de movimento, acelerômetros, sensores de taxa inercial e assim por diante. Nesta modalidade, existem dois sensores apresentados com cada sensor localizado junto com um dos acionadores. Em outras modalidades, pode existir somente um sensor 10 configurado para medir a posição e o movimento do conduto 102 ao longo do comprimento do conduto 102. Outras configurações possuindo mais do que 2 sensores também são possíveis.

15

A Figura 1A apresenta o conduto 102 em um estado 20 não defletido. Por acionar os atuadores com potência igual, o modo de curvatura principal do conduto pode excitado. A Patente US 6.092.429 concedida em 25 de julho de 2000 e denominada "Driver for oscillating a vibrating conduit", a qual é por meio deste documento incluída por referência, revela acionadores configurados para excitar diferentes modos 25 de vibração em um conduto. A Figura 1B apresenta o conduto 102 em um estado defletido correspondendo ao modo de curvatura principal do conduto. Este modo de vibração também cor-

responde a uma condição quando não existe fluxo de material através do conduto. A deflexão do conduto 102 na Figura 1B e 1C foi ampliada por clareza. As deflexões reais do conduto 102 seriam muito menores. Quando o material está fluindo 5 através do conduto que vibra 102, o material fluindo causa que forças Coriolis sejam geradas. As forças Coriolis defletem o conduto 102 e excitam modos de vibração adicionais. A Figura 1C apresenta o modo de vibração principal excitado pelas forças Coriolis. A diferença de fase relativa detectada 10 entre o sensor S1 e o sensor S2 pode ser utilizada para determinar o fluxo de material através do conduto 102. Na condição sem fluxo (como representado na figura 1B), não existe diferença de fase devido ao fluxo, detectado entre S1 e S2. Podem existir diferenças de fase devido às condições 15 de deslocamento zero. Uma vez que o material esteja fluindo através do conduto 102, existirá uma diferença de fase entre S1 e S2, devido ao fluxo. A diferença de fase medida detectada entre S1 e S2 é uma medida da fase relativa do autovetor direito do sistema e é proporcional ao fluxo de material 20 através do conduto. Deixe θ_R ser igual à fase relativa do autovetor direito, θ_{S1} ser a fase medida da vibração do conduto no sensor S1, e θ_{S2} ser a fase medida da vibração do conduto no sensor S2, então $\theta_R = \theta_{S1} - \theta_{S2}$. Uma diferença de tempo, delta T, pode ser calculada a partir da diferença de 25 fase pela divisão pela frequência de vibração ω . $\Delta T = (\theta_{S1} - \theta_{S2})/\omega$. A diferença de tempo ΔT também é proporcional ao fluxo de material através do conduto e é a medição tipicamente utilizada nos medidores de fluxo de massa. Uma deter-

minação mais precisa em relação ao fluxo de material através do conduto 102 pode ser calculada por se corrigir o fluxo de material medido com uma quantidade de deslocamento zero $\Delta T_c = \Delta T - \text{Deslocamento Zero}$.

5 Em uma modalidade ilustrativa da invenção, durante as operações normais, ambos acionadores são utilizados para excitar o modo de curvatura principal do conduto. O fluxo de material através do conduto é determinado por se medir a fase relativa do autovetor direito, convertendo para um domínio ΔT e corrigindo este valor com uma quantidade de correção de deslocamento zero. $\Delta T_{RC} = \Delta T_R - \text{DeslocamentoZero}$. Periodicamente, o conduto é excitado utilizando-se um, e então, o outro acionador. São feitas medições entre a fase do sinal de acionamento e uma posição no conduto. Estas medições são utilizadas para determinar a fase relativa do autovetor esquerdo do sistema.

A Figura 2 é um fluxograma para determinar o autovetor esquerdo em uma modalidade ilustrativa da invenção. Na etapa 202, durante as operações normais, ambos acionadores são utilizados para excitar a vibração do conduto. Na etapa 204, somente o acionador D1 é utilizado para excitar a vibração do conduto. Durante este tempo, a fase entre o sinal de acionamento utilizado pelo acionador D1 e o sensor S1 é medida. Chame esta diferença de fase medida de θ_1 . Na etapa 206, o acionador D1 é desativado e somente o acionador D2 é utilizado para excitar a vibração do conduto. Durante este tempo, a fase entre o sinal de acionamento utilizado pelo acionador D2 e o sensor S1 é medida. Chame esta diferença de

fase θ_2 . Na etapa 208, a fase relativa do autovetor esquerdo θ_L para o sistema pode ser calculada como $\theta_L = \theta_1 - \theta_2$. Convertendo-se para o domínio do tempo se produz o delta T relativo do autovetor esquerdo: $\Delta T_L = (\theta_1 - \theta_2) / \omega$. Na etapa 5 210, a operação normal reinicia e ambos acionadores são utilizados para excitar a vibração do conduto. A sequência na qual os acionadores são ligados e desligados não é importante.

Devido às fases relativas (θ_1 e θ_2) para o autovetor esquerdo serem determinadas quando excitando a vibração 10 do conduto com somente um acionador, a resposta de flexibilidade residual (RF) e a interferência eletromagnética (ERC) devem ser corrigidas. Cada acionador causa alguma resposta de flexibilidade residual e interferência eletromagnética. Este efeito declina para zero quase instantaneamente quando 15 o acionador é desligado. Por brevemente desligar um acionador, a alteração na fase medida em cada sensor, causada pela resposta de flexibilidade residual e pela interferência eletromagnética associadas com este acionador, pode ser determinada. A alteração na fase medida pode ser determinar por 20 se medir a mudança gradual na diferença de fase entre os sensores que ocorre quando cada acionador é desativado. A Figura 3 é um fluxograma apresentando uma modalidade para determinar a flexibilidade residual e a interferência eletromagnética.

25 Na etapa 302, durante a operação normal, ambos acionadores são utilizados para excitar a vibração do conduto. O delta T com ambos acionadores operando, ΔT_{D1D2} , é medido entre o sensor S1 e o sensor S1. Na etapa 304, o aciona-

dor D2 é desligado e somente o acionador D1 é utilizado para excitar o conduto. Durante este tempo, o delta T com somente o acionador D1 operando, ΔT_{D1} , é medido entre o sensor S1 e o sensor S1. A diferença entre ΔT_{D1D2} e ΔT_{D1} é devido à flexibilidade residual e à interferência eletrônica a partir do acionador D2. Na etapa 306, o acionador D1 é desligado e somente o acionador D2 é utilizado para excitar o conduto. Durante este tempo, o delta T com somente o acionador D2 operando, ΔT_{D2} , é medido entre o sensor S1 e o sensor S1. A diferença entre ΔT_{D1D2} e ΔT_{D2} é devido à flexibilidade residual e à interferência eletrônica a partir do acionador D1. Para corrigir um ΔT medido para a flexibilidade residual e para a interferência eletrônica a partir de ambos acionadores, a diferença entre ΔT_{D1D2} e ΔT_{D1} e a diferença entre ΔT_{D1D2} e ΔT_{D2} é subtraída do ΔT medido. Portanto, o delta T corrigido é $\Delta T_c = \Delta T - (\Delta T_{D1D2} - \Delta T_{D1}) - (\Delta T_{D1D2} - \Delta T_{D2})$. Utilizando esta técnica, o delta T para a fase relativa do autovetor esquerdo ΔT_{LC} pode ser corrigido em relação à flexibilidade residual e à interferência eletrônica. $\Delta T_{LC} = \Delta T_L - (\Delta T_{D2} - \Delta T_{D1})$.

A Figura 4 é um gráfico apresentando os valores ΔT relativos medidos utilizando um medidor de fluxo de tubo único não equilibrado, enquanto trocando entre os acionadores em uma modalidade ilustrativa da invenção. Neste medidor, os acionadores DR1 e DR2 estão orientados em 45 graus a partir da vertical e estão localizados na mesma posição axial que os sensores PR3. Por acionar DR1 e DR2 com o mesmo sinal, um par de acionador / sensor pseudo localizados juntos é alcançado. O mesmo relacionamento foi utilizado para

obter um par de acionador / sensor pseudo localizados juntos utilizando os acionadores DL1 e DL2 e o sensor PL3. Os dois pares de sensor / acionador (DR1 / DR2 / PR3 e DL1 / DL2 / PL3) foram espaçados simetricamente ao redor do centro axial 5 do medido de fluxo. No tempo zero até o tempo 30, ambos pseudo-s pares acionadores foram utilizados para excitar a vibração do medidor de fluxo. A mudança gradual nos valores ΔT aproximadamente no ponto de 30 segundos ocorre quando o par de acionadores DL1 / DL2 é desligado. Esta alteração do 10 ΔT é esta causada pela resposta de flexibilidade residual e pela interferência eletromagnética dos pseudo acionadores DL1 / DL2. Aproximadamente no tempo 65, o par de acionadores DR1 / DR2 é desligado e o par de acionadores DL1 / DL2 é ligado. Aproximadamente na marca de 100 segundos, o par de 15 acionadores DR1 / DR2 é novamente ligado e ambos pseudo-s pares de acionadores são utilizados para excitar a vibração do medidor de fluxo. A alteração nos valores ΔT medidos entre os tempos 100 até 120 é esta causada pela resposta de flexibilidade residual e pela interferência eletromagnética 20 do pseudo acionador DR1 / DR2.

Para medidores onde os acionadores e os sensores estão simetricamente localizados ao redor do centro axial do medidor, a flexibilidade residual e a interferência eletrônica associadas com cada acionador são iguais e opostas. Durante a operação normal, quando ambos acionadores estão sendo utilizados para excitar a vibração do conduto, os efeitos 25 se cancelam e geralmente não têm que ser corrigidos para precisamente se medir o delta T do autovetor direito. As me-

dições para o autovetor esquerdo e para a flexibilidade residual e a interferência eletrônica podem ser feitas ao mesmo tempo quando cada acionador é brevemente desligado.

A compensação de fase não uniforme entre diferentes canais de medição eletrônica é bem conhecida na técnica. Por exemplo, um sinal conhecido pode ser aplicado junto à entrada e a corrupção de fase medida. Este procedimento pode ser executado durante o fluxo por se proporcionar um canal de medição sobressalente que assume a função de medição do canal sob teste, enquanto o teste está sendo conduzido.

Uma vez que o ΔT relativo para os autovetores, esquerdo e direito, é medido e corrigido em relação à flexibilidade residual, aos efeitos de interferência eletrônica e assim por diante, a contribuição a partir do fluxo e a partir do amortecimento não proporcional é calculada. O efeito do fluxo F é a diferença entre o ΔT relativo dos autovetores, esquerdo e direito, dividida por 2. $F = (\Delta T_R - \Delta T_L) / 2$. Um novo deslocamento zero pode ser calculado por se comparar o efeito do fluxo F com o fluxo determinado por se medir o ΔT_R durante as operações normais. $DeslocamentoZero = \Delta T_R - F$. O novo $DeslocamentoZero$ pode ser utilizado para corrigir o fluxo medido durante as operações normais até a próxima vez que o valor para o autovetor esquerdo for determinado.

O efeito de amortecimento não proporcional ND é a média do autovetores, esquerdo e direito, $ND = (\Delta T_R + \Delta T_L) / 2$. Este valor também poderia ser utilizado como o novo valor de $DeslocamentoZero$.

A Figura 5 é um fluxograma para recalibrar o deslocamento zero de um medidor de fluxo durante o fluxo em uma modalidade ilustrativa da presente invenção. Na etapa 502, durante as operações normais, ambos acionadores são utilizados para excitar a vibração do conduto. Um delta T relativo não corrigido para o autovetor direito é determinado. O delta T relativo não corrigido do autovetor direito é então corrigido por se utilizar um deslocamento zero. O fluxo através do medidor é determinado utilizando-se o delta T relativo corrigido do autovetor direito. Periodicamente, na etapa 504, os acionadores D1 e D2 são alternadamente desligados e o delta T relativo do autovetor esquerdo e a flexibilidade residual (RF) e a interferência eletrônica (EC) são determinados. O delta T relativo do autovetor esquerdo é corrigido em relação à flexibilidade residual e aos efeitos de interferência eletrônica. Na etapa 506, o delta T relativo corrigido do autovetor esquerdo e o delta T não corrigido do autovetor direito são utilizados para determinar um novo deslocamento zero. O novo deslocamento \zero é substituído pelo deslocamento zero antigo e o processo reinicia na etapa 502. Por calcular e substituir o novo deslocamento zero no medidor, o medidor foi recalibrado para a condição de fluxo zero durante o fluxo de material através do medidor.

Em uma modalidade ilustrativa, a determinação em relação a quando a recalibragem deve ocorrer pode ser feita por se utilizar um intervalo de tempo fixo entre as calibragens. Em outra modalidade ilustrativa, uma recalibragem pode ser feita quando alterações no ambiente ou no sistema de tu-

5 bulação são detectadas. Por exemplo, quando uma alteração na temperatura é maior do que uma quantidade limite, uma recalibragem pode ser executada. A determinação em relação a quando a recalibragem ocorre pode ser uma combinação de um temporizador periódico com detectar alterações no ambiente. O período de tempo entre as recalibragens pode ser mais curto para sistemas que exigem maior precisão do que para sistemas que possuem exigências de precisão menos rigorosas.

10 Trocar entre os acionadores D1 e D2 de modo a medir a fase relativa do autovetor esquerdo não implica que a operação normal do medidor de fluxo tem que ser interrompida (isto é, medir o fluxo utilizando ΔT do autovetor direito). Por exemplo, quando os acionadores são colocados simetricamente ao redor da linha central do conduto, cada acionador 15 excita o modo de acionamento pela mesma quantidade. Por exemplo, por dobrar a corrente para D2 quando D1 está inativo, a magnitude da força de acionamento pode ser mantida.

20 Na descrição acima, a invenção foi descrita utilizando um medidor de fluxo de conduto único. Como bem entendido na técnica, a presente invenção pode ser utilizada em medidores de fluxo com outras configurações, por exemplo, medidores de fluxo com conduto duplo. A invenção também foi descrita utilizando um conduto reto, mas outras configurações para a geometria do medidor de fluxo são possíveis, por 25 exemplo, um conduto curvo.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para determinar uma fase relativa de um autovetor esquerdo para um conduto, **CARACTERIZADO** por compreender:

5 fluir um material através de um conduto enquanto excitando um modo de vibração do conduto;
 medir o movimento relativo do conduto que vibra;

10 determinar uma primeira diferença de fase entre uma primeira localização no conduto e um primeiro dentre os acionadores enquanto acionando o modo de vibração do conduto utilizando somente o primeiro dos acionadores;

15 determinar uma segunda diferença de fase entre a primeira localização no conduto e um segundo dos acionadores enquanto acionando o modo de vibração do conduto utilizando somente o segundo dos acionadores; e

 determinar a fase relativa do autovetor esquerdo utilizando a primeira diferença de fase e a segunda diferença de fase.

20 2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

 determinar uma fase relativa de um autovetor direito para o conduto (302);

25 determinar um fluxo real do material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor esquerdo e a fase relativa do autovetor direito.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

determinar um fluxo não corrigido do material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito;

5 determinar um deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto por comparar o fluxo não corrigido com o fluxo real (506).

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

10 determinar um fluxo de material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida pelo deslocamento zero (502).

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

15 determinar a fase relativa de um autovetor direito; determinar um deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto por calcular a média da fase relativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor esquerdo.

20 6. Método, de acordo com a reivindicação 5, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

determinar um fluxo de material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida pelo deslocamento zero.

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

medir uma primeira fase relativa entre duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando o

modo de vibração do conduto utilizando tanto um primeiro dentre os acionadores (304) como um segundo dentre os acionadores, em que o primeiro dentre os acionadores é separado do segundo dentre os acionadores;

5 medir uma segunda fase relativa entre as duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando somente o segundo dentre os acionadores (304);

10 calcular a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética associadas com o primeiro dentre os acionadores por subtrair a segunda fase relativa da primeira fase relativa (308);

15 medir uma terceira fase relativa entre as duas localizações separadas no conduto que vibra enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando somente o primeiro dentre os acionadores (306);

20 calcular a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética associadas com o segundo acionador por subtrair a terceira fase relativa da primeira fase relativa (308).

8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o movimento do conduto é medido com um primeiro sensor que está localizado junto ao primeiro acionador e com um segundo sensor que está localizado junto ao segundo acionador.

9. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** adicionalmente por compreender:

determinar uma fase relativa de um autovetor di-

reito para o conduto enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando tanto o primeiro dentre os acionadores como um segundo dentre os acionadores;

5 determinar um fluxo real do material através do conduto por subtrair a fase relativa do autovetor esquerdo da fase relativa do autovetor direito.

10. Método, de acordo com a reivindicação 9,

CARACTERIZADO adicionalmente por compreender:

10 determinar um fluxo não corrigido do material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito;

determinar um deslocamento zero para o fluxo do material através do conduto por comparar o fluxo não corrigido com o fluxo real;

15 determinar um fluxo de material através do conduto utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigido pelo deslocamento zero.

11. Método, de acordo com a reivindicação 1,

CARACTERIZADO por adicionalmente compreender:

20 determinar a fase relativa de um autovetor direito para o conduto enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando tanto o primeiro dentre os acionadores como um segundo dentre os acionadores;

25 determinar um deslocamento zero para o fluxo de material através do conduto por calcular a média da fase relativa do autovetor direito com a fase relativa do autovetor esquerdo;

determinar um fluxo de material através do conduto

utilizando a fase relativa do autovetor direito corrigida pelo deslocamento zero.

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** por adicionalmente compreender:

5 medir um primeiro delta tempo entre a primeira localização e uma segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando os pelo menos dois acionadores (302);

10 medir um segundo delta tempo entre a primeira localização e a segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando todos menos o primeiro dos acionadores (304);

15 medir um terceiro delta tempo entre a primeira localização e a segunda localização quando acionando o modo de vibração utilizando todos menos o segundo dos acionadores (306);

calcular um primeiro valor de correção utilizando o primeiro delta tempo e o segundo delta tempo (308);

calcular um segundo valor de correção utilizando o primeiro delta tempo e o terceiro delta tempo (308);

20 ajustar a primeira diferença de fase utilizando o primeiro valor de correção, antes de calcular o autovetor esquerdo; e

25 ajustar a segunda diferença de fase utilizando o segundo valor de correção, antes de calcular o autovetor esquerdo.

13. Aparelho para determinar uma fase relativa de um autovetor esquerdo e uma fase relativa de um autovetor

direito para um conduto, **CARACTERIZADO** por compreender:

um conduto (102) configurado para conter um material fluindo através do conduto;

5 pelo menos dois acionadores (D1, D2) configurados para excitar uma pluralidade de modos de vibração do conduto;

um aparelho sensor configurado para medir o movimento relativo do conduto que vibra; e

10 um dispositivo configurado para periodicamente determinar uma fase relativa de um autovetor esquerdo para o conduto utilizando o movimento relativo do conduto que vibra pelo uso de:

uma primeira diferença de fase entre uma localização no conduto e o acionador D1 enquanto o acionador D1 vibra o conduto; e

15 uma segunda diferença de fase entre a localização no conduto e o acionador D2 enquanto o acionador D2 vibra o conduto;

20 o dispositivo também configurado para determinar uma fase relativa de um autovetor direito para o conduto utilizando o movimento relativo do conduto que vibra.

14. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que um fluxo real do material através do conduto é determinado por se utilizar a diferença na fase relativa do autovetor esquerdo comparada com a fase 25 relativa do autovetor direito.

15. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que um fluxo do material através do conduto é determinado utilizando a fase relativa do au-

tovetor direito corrigida com um deslocamento zero.

16. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15,
CARACTERIZADO adicionalmente por compreender:

5 determinar o deslocamento zero para o fluxo do ma-
terial através do conduto por calcular a média da fase rela-
tiva do autovetor direito com a fase relativa do autovetor
esquerdo.

17. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15,
CARACTERIZADO pelo fato de que um fluxo real do material
10 através do conduto é determinado por subtrair a fase relati-
va do autovetor esquerdo da fase relativa do autovetor di-
reito; e

15 o deslocamento zero para o fluxo do material atra-
vés do conduto é determinado por se comparar o fluxo deter-
minado utilizando a fase relativa do autovetor direito com o
fluxo real.

20 18. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13,
CARACTERIZADO pelo fato de que a fase relativa do autovetor
esquerdo é corrigida para uma resposta de flexibilidade re-
sidual e para a interferência eletromagnética.

25 19. Aparelho, de acordo com a reivindicação 18,
CARACTERIZADO pelo fato de que uma primeira fase relativa
entre uma primeira localização no conduto que vibra e uma
segunda localização no conduto que vibra é determinada en-
quanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando os
pelo menos dois acionadores;

uma segunda fase relativa entre a primeira locali-
zação no conduto que vibra e a segunda localização no condu-

to que vibra é determinada enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando todos menos um primeiro dos pelo menos dois acionadores;

uma terceira fase relativa entre a primeira localização no conduto que vibra e a segunda localização no conduto que vibra é determinada enquanto excitando o modo de vibração do conduto utilizando todos menos um segundo dos pelo menos dois acionadores; e

10 a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética para o primeiro dos pelo menos dois acionadores são determinadas por se subtrair a segunda fase relativa da primeira fase relativa;

15 a resposta de flexibilidade residual e a interferência eletromagnética para o segundo dos pelo menos dois acionadores são determinadas por se subtrair a terceira fase relativa da primeira fase relativa.

20. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13,
CARACTERIZADO pelo fato de que o aparelho sensor compreende pelo menos dois sensores em uma relação separada.

21. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13,
CARACTERIZADO pelo fato de que o dispositivo é um processador executando código que causa a determinação da fase relativa do autovetor esquerdo e direito.

22. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13,
25 **CARACTERIZADO** pelo fato de que o dispositivo é um circuito que causa a determinação da fase relativa do autovetor esquerdo e direito.

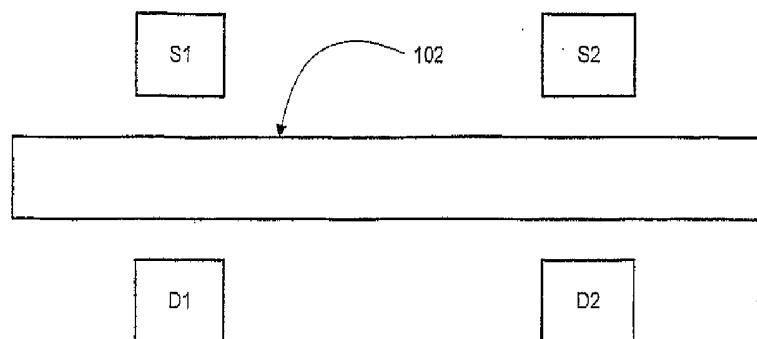


Figura 1A

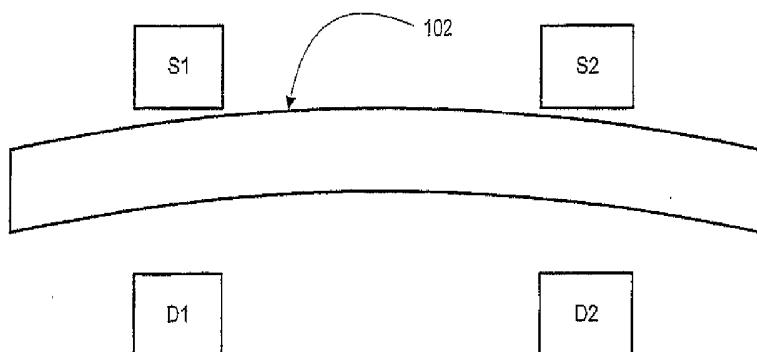


Figura 1B

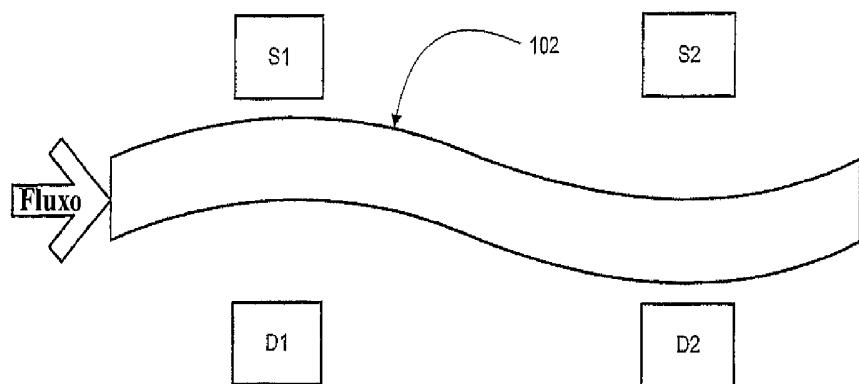


Figura 1C

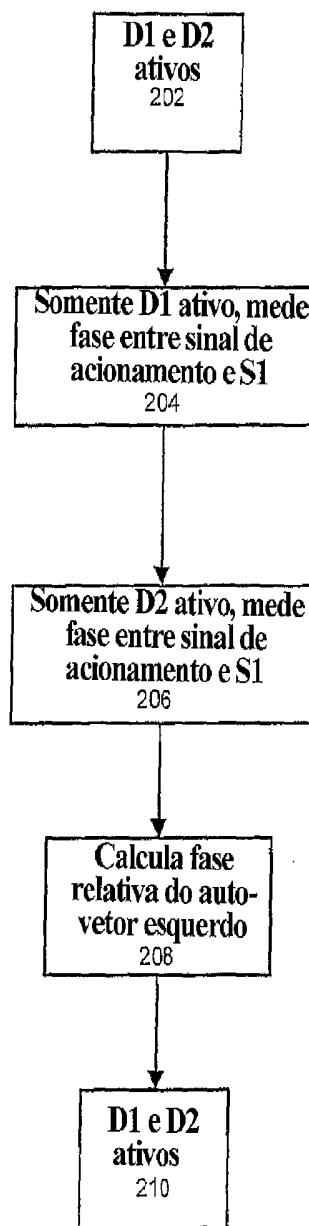


Figura 2

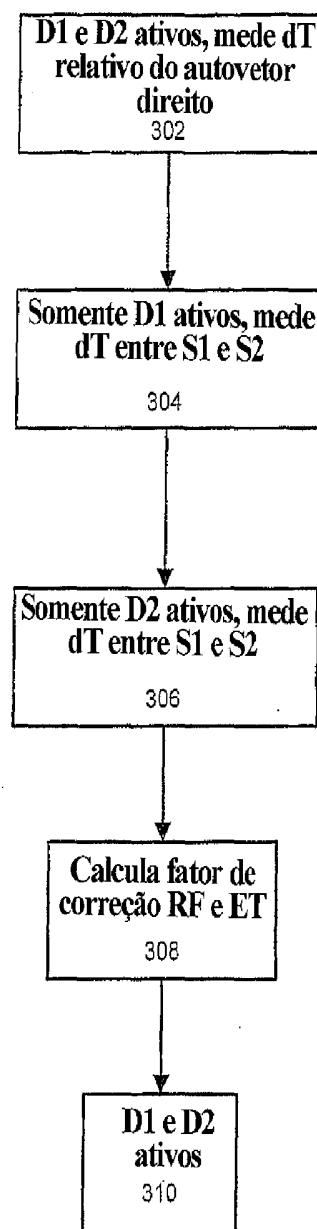
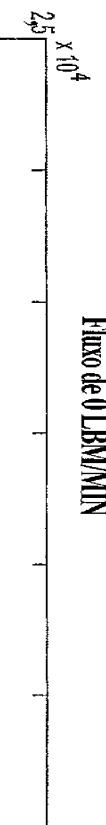
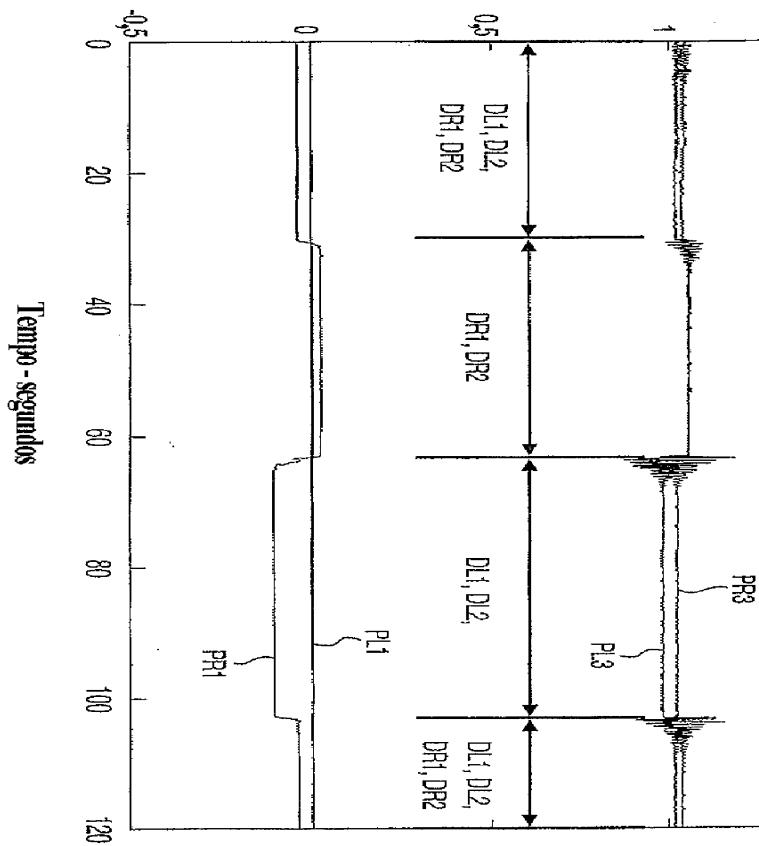


Figura 3

FIG. 4



Seleção dT - segundos



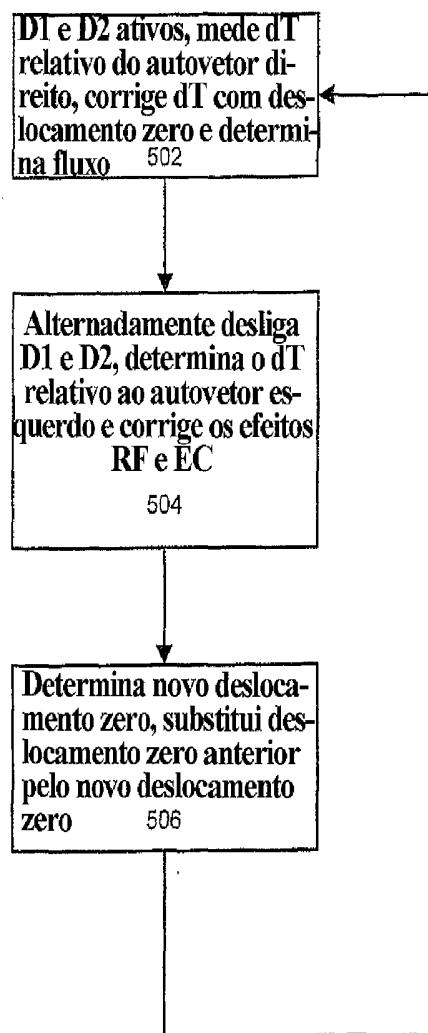


Figura 5

RESUMO

“MÉTODO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO PARA UM CONDUTO e APARELHO PARA DETERMINAR UMA FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR ESQUERDO E UMA 5 FASE RELATIVA DE UM AUTOVETOR DIREITO PARA UM CONDUTO”

São revelados um método e aparelho que permitem o cálculo periódico da fase relativa do autovetor esquerdo para conduto que vibra. Durante a operação normal, dois acionadores são utilizados em conjunto para excitar o modo de 10 curvatura principal do conduto (202). Periodicamente, o primeiro (204) e então o segundo (206), dos dois acionadores, é desativado, permitindo medições que permitem a determinação da fase relativa do autovetor esquerdo (208) para o conduto que vibra.