



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

(21) **PI 1102867-0 A2**

(22) Data de Depósito: 09/06/2011
(43) Data da Publicação: 04/12/2012
(RPI 2187)



(51) *Int.Cl.*:
A61B 5/05
G01R 27/00

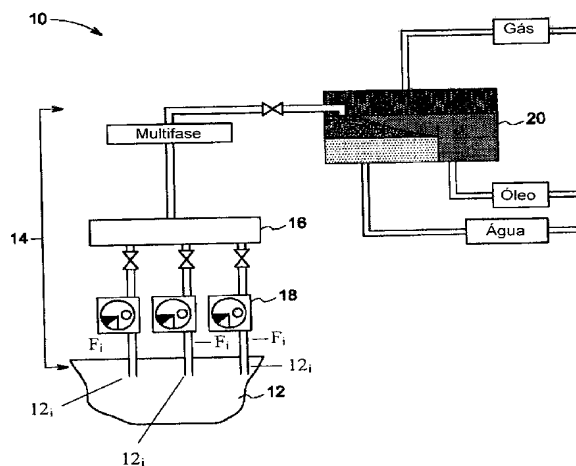
(54) **Título:** MÉTODO PARA FORNECER UMA IMAGEM DE UM INTERIOR DE UMA ESTRUTURA

(30) **Prioridade Unionista:** 10/06/2010 US 12/797,653

(73) **Titular(es):** GENERAL ELECTRIC COMPANY

(72) **Inventor(es):** DEBASISH MISHRA, MANOJ KUMAR KOYITHITTA MEETHAL, RAJESH VEERA VENKATA LAKSHMI LANGOJU, SAKETHRAMAN MAHALINGAM

(57) **Resumo:** MÉTODO PARA FORNECER UMA IMAGEM DE UM INTERIOR DE UMA ESTRUTURA. Trata-se de um método para fornecer uma imagem de um interior de uma estrutura (46) que contém regiões com diferentes condutividades ou admissividades. Em uma realização uma série de conjuntos de sinal elétrico (V1) é aplicada a uma série de eletrodos, cada conjunto de sinal gera um campo elétrico giratório. Um conjunto de sinais elétricos medidos obtido a partir dos eletrodos (44) é usado para calcular uma distribuição de condutividade ou admissividade representativa do interior da estrutura em uma região sobre a qual os eletrodos (44) estão posicionados. O processo de cálculo da distribuição inclui definir uma função de custo, por exemplo, a função de energia com base na distribuição, e um modelo avançado que expressa o conjunto de sinais elétricos medidos como uma função da alteração em valores de voltagem em relação à condutividade ou admissividade e exigir que a derivada parcial da diferença entre a função de energia e uma função com base no modelo avançado seja igual a zero.



“MÉTODO PARA FORNECER UMA IMAGEM DE UM INTERIOR DE UMA ESTRUTURA”

ANTECEDENTES

Esta invenção refere-se geralmente à reconstrução de imagem e, especificamente, a métodos para gerar dados de imagem baseados em Tomografia de Impedância Elétrica.

Os princípios de tomografia de impedância elétrica (EIT) são baseados no conhecimento de que meios submetidos a exame possuem variações em propriedades elétricas, por exemplo, condutividades e permissividades, que estão altamente correlacionadas às características de material tal como densidade ou composição química. Por exemplo, no corpo humano existem variações significativas em condutividade elétrica dentre tecidos corporais.

Em atividades industriais e outras aplicações não clínicas, é desejável executar monitoramento não invasivo e, algumas vezes, imageamento para determinar a composição de um volume corporal, ou para caracterizar o tamanho e o formato de uma característica, ou outra condição no interior de um objeto de interesse. Em geral, a EIT é útil para o imageamento de características no interior de um volume que são caracterizadas por propriedades elétricas distinguíveis. Frequentemente, as características no interior de volumes com diferentes densidades podem ser resolvidas com base nisso. Por exemplo, em misturas de fluido multifásicas sabe-se que as condutividades irão variar com base na fase (por exemplo, líquido ou gás) ou composição química. A princípio, as medições elétricas executadas com instrumentação relativamente simples podem fornecer dados indicativos de onde no volume um material particular está localizado, e as proporções relativas de diferentes constituintes. Os exemplos de misturas para a qual as concentrações de fase podem ser determinadas são composições sólido-

líquido tais como pastas aquosas, composições gás-líquido tais como as presentes em dutos de óleo, e, em geral, misturas líquido-líquido e sólido-gás-líquido. As misturas podem ser estacionárias ou fluentes. No caso de fluidos que fluem através de um cano, as determinações de condutividade dentre nos

5 materiais de diferentes fases, ou entre materiais com diferentes propriedades químicas (por exemplo, água e óleo), podem levar às determinações de volumes relativos presentes. No passado, as frações de volume de fases líquidas e gasosas em um cano foram inferidas com base nas medições de impedância elétrica. Em relação ao imageamento de EIT, é convencional

10 adquirir dados através da colocação de uma série de eletrodos ao longo da periferia de um corpo sob estudo, por exemplo, em um círculo ao longo de uma superfície interior de um cano. Consulte as patentes U.S. nºs 4.486.835, 4.539.640, 4.920.490 e 5.381.333, todas estas estão incorporadas no presente documento a título de referência. Nos sistemas de medição descritos pela

15 literatura supracitada, os sinais de voltagem ou corrente medidos são usados para reconstruir características espaciais no interior do volume sob estudo de modo que uma imagem representativa das características possa ser gerada. A esse respeito, ocorre o que frequentemente se chama de problema inverso sendo que pode não haver uma solução exclusiva, isto é, imagem,

20 correspondente aos dados adquiridos. Para superar isto, é necessário conferir um número relativamente grande de conjuntos de padrões de excitação aos eletrodos. Com estes dados, algoritmos são aplicados para descobrir uma distribuição de condutividade.

Quando os eletrodos são posicionados ao longo de um plano que

25 atravessa o corpo sob estudo, os algoritmos podem fornecer uma distribuição de condutividade ao longo do mesmo plano. Em geral, uma ampla gama de métodos matemáticos e técnicas numéricas tem sido aplicada para determinar uma distribuição de condutividade que se assemelha a do corpo sob exame.

Computações extensivas têm sido exigidas com a finalidade de gerar resoluções de imagem úteis. É desejado descobrir técnicas através das quais a geração de imagem satisfatória pode ser obtida com menos computações executadas em períodos de tempo mais curtos para inserir a reconstrução de
5 imagem à base de EIT em uma matriz maior de aplicações comerciais.

BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

De acordo com uma realização da invenção, um método fornece uma imagem de um interior de uma estrutura que contém múltiplas regiões com diferentes condutividades. Em uma realização, uma série de conjuntos de
10 sinal elétrico é sequencialmente aplicada a uma série de eletrodos, cada conjunto de sinal gera um campo elétrico giratório no interior da estrutura. Um conjunto de sinais elétricos medidos é obtido a partir dos eletrodos cujos conjuntos são usados para calcular uma distribuição de condutividade representativa do interior da estrutura em uma região da estrutura sobre a qual
15 os eletrodos são posicionados. O processo de cálculo da distribuição de condutividade inclui definir uma função de custo (por exemplo, uma função de energia) com base na distribuição de condutividade e um modelo avançado que expressa o conjunto de sinais elétricos medidos como uma função da alteração em valores de voltagem em relação à condutividade e exigir que a
20 derivada parcial da diferença entre a função de energia e uma função com base no modelo avançado seja igual a zero. Vide Equações 6 a 12, abaixo.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Estas e outras características, aspectos e vantagens da presente invenção se tornarão mais bem compreendidas mediante a leitura da descrição
25 detalhada a seguir em referência aos desenhos em anexo, nos quais caracteres similares representam partes similares em todos os desenhos, sendo que:

A Figura 1 é um diagrama de bloco de uma instalação de

produção de óleo de acordo com uma realização exemplificativa;

A Figura 2 é uma vista esquemática de um medidor de fluxo multifásico baseado em tomografia de impedância elétrica (EIT) para ser usado de acordo com uma realização da presente invenção;

5 A Figura 3 é um diagrama de bloco de um sistema de EIT de voltagem aplicada de acordo com uma realização da presente invenção; e

Figura 4 é uma vista esquemática de eletrodos ao longo de um cano e uma forma de senoide de referência de acordo com uma realização da presente invenção.

10

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

A invenção é descrita no presente contexto em uma aplicação onde o imageamento pode ser usado para determinar proporções de componentes em um fluxo multifásico onde mais de um material flui no interior de um cano ou um conduto. As realizações da presente invenção têm a função de fornecer um sistema e um método para medir as características de sistemas de múltiplos materiais, tais como aqueles usados na indústria de óleo, para estimar frações e taxas de fluxo de óleo, água, e gases de hidrocarboneto que fluem através dos canos. Embora a invenção seja descrita em referência a um uso em medições de óleo/gás/água, esta não é, de forma alguma, limitada a tais aplicações. De preferência, a invenção também é aplicável a uma ampla variedade de processos industriais, de saúde e químicos tais como, por exemplo, imageamento médico, diagnostico de câncer e processos de tratamento de água.

25 O material que flui através do cano pode estar em múltiplos estados dentre os estados físicos de sólido, líquido e gás. A caracterização precisa de processos multifásicos de fluxo viabiliza o projeto aprimorado e eficiências operacionais aumentadas de sistemas e equipamentos de processamento usados nas indústrias de petróleo, farmacêuticas, alimentícias

e químicas. As características de fluxo relevantes usadas para prever desempenho de processos multifásicos podem incluir, por exemplo, distribuição espacial das fases (frações de fase volumétricas espaciais), regime de fluxo, área interfacial, e velocidades relativas e absolutas entre as fases ou materiais.

- 5 Com uma determinação da distribuição espacial não uniforme de materiais em um fluxo multifásico, se torna possível gerenciar e controlar o processo para um resultado mais desejável. Por exemplo, em um duto que transporta produtos de petróleo, a proporção de gás relativa ao constituinte líquido pode ser minimizada. Em transporte de pasta aquosa de carvão, a proporção
- 10 volumétrica de água para carvão pode ser otimizada para garantir o conteúdo de energia máximo alcançável por volume de unidade. Como outro exemplo aplicável à otimização de processo de fabricação, é importante monitorar e reduzir distribuições não uniformes de materiais que são submetidos à reação ou conversão química. Tais processos podem ter área interfacial reduzida
- 15 entre materiais devido a, por exemplo, fluxos recirculantes que criam zonas ou concentrações de reação espacialmente não uniformes.

Dessa forma, o conhecimento em tempo real de frações de fase volumétricas e componentes associados permite o controle eficaz e pontual de fluxos multifásicos. Entretanto, requisitos computacionais para gerar tais

20 caracterizações podem adicionar complexidade indevida e podem atrasar o tempo de resposta necessário para implantar o controle pontual do processo a ser monitorado. Por esta razão, muitos dos sistemas anteriores dependiam de aproximações para determinar as proporções de material e para caracterizar a separação de materiais em um sistema multifásico.

- 25 No passado, a reconstrução de imagem com o uso de EIT era baseada no fornecimento sequencial de sinais de entrada para os pares de eletrodos e da captação de sinais em um ou mais outros eletrodos. Por exemplo, as correntes podem fluir entre pares de eletrodos, um par por vez,

com voltagens sendo medidos nos eletrodos remanescentes. Alternativamente, as voltagens podem ser aplicadas ao longo dos pares de eletrodos, um par por vez, com corrente medida em um ou mais dos outros eletrodos. As realizações exemplificativas são configuradas para produzir quantidades relativamente grandes de dados elétricos rapidamente através da aplicação simultânea de correntes ou voltagens em todos os eletrodos. As correntes ou voltagens aplicadas podem ter deslocamentos de fase ou frequência predefinidos ou podem ser eletricamente em fase umas com as outras e podem ter variações de amplitude. No passado, tempo de processamento mais longo era necessário para executar a reconstrução com base no grande número de padrões de corrente ou voltagem aplicados aos eletrodos. Por outro lado, com a geração da quantidade aumentada de dados elétricos, é possível concretizar uma razão de sinal para ruído mais e uma resolução mais alta. Isto é especialmente relevante quando o corpo sob exame compreende componentes com pequenas variações em permissividades ou condutividades relativas, tendo em vista que um número relativamente grande de medições é necessário para fornecer a resolução necessária.

Em referência à vista esquemática simplificada ilustrada na Figura 1, uma realização exemplificativa da invenção é descrita para uma instalação de produção de óleo típica 10 que tem múltiplos poços de óleo 12_i conectados a um sistema de tubulação 14. O sistema de tubulação 14 inclui uma tubulação de produção 16 acoplada para receber o fluxo F_i a partir de cada poço 12_i e output a total fluxo F . O fluxo F_i de cada poço atravessa um medidor de fluxo multifásico (MPFM) 18 antes de entrar na tubulação 16 e pode ser controlado através de um sistema de válvula para regular a proporção total de, por exemplo, fases líquidas e gasosas.

Cada medidor de fluxo multifásico é parte de um sistema que permite a medição de fluxos de poço não processado muito próximos ao poço

e pode, dessa forma, fornecer monitoramento contínuo do desempenho do poço. As informações processadas por cada sistema de medidor de fluxo multifásico podem ser usadas para um melhor gerenciamento de reservatório e controle de fluxo. Os fluidos bombeados dos poços de óleo 12, são enviados para um separador de produção 20 através da tubulação de produção 16. Um separador de teste (não mostrado) pode ser incorporado aos sistemas de medidor de fluxo multifásico. Uma vantagem de um sistema de medidor de fluxo multifásico em comparação a um separador de teste é o tempo necessário reduzido para caracterizar a composição do fluxo.

O separador de produção 20 separa óleo, gás, e água bombeados dos poços. O separador de produção 20 pode incluir adicionalmente um ou mais dispositivos de medição. Os dispositivos de medição podem incluir, por exemplo, um medidor de água para medir uma quantidade ou taxa de água extraída de um poço e um medidor de emulsão para medir uma quantidade de óleo extraído do poço. Dispositivos de medição adicionais podem ser incluídos para monitorar o desempenho do poço, incluindo um sensor de pressão de cabeça de poço e um termômetro.

A seguir, é feita referência ao diagrama esquemático simplificado da Figura 2, é mostrado um sistema de reconstrução de imagem 40 que incluir um MPFM 18 com base na tomografia de impedância elétrica (EIT) e, de acordo com uma realização exemplificativa da invenção, com base na reconstrução de condutividade. Entretanto, também deve ser entendido que, a princípio, a reconstrução de imagem por EIT pode ser baseada condutividade e/ou permissividade (algumas vezes chamada de admissividade). Com o sistema 40, as condutividades e/ou permissividades de materiais observados são inferidas com base nas medições elétricas limítrofes tomadas a partir de eletrodos próximos à periferia do volume sob estudo conforme conjuntos de corrente ou sinais de voltagem são aplicados aos eletrodos. De acordo com

realizações exemplificativas, grandes quantidades de dados são adquiridas através da obtenção sequencial de medições de todos os eletrodos para cada conjunto de sinais. Ou seja, as medições são repetidas para diversas configurações ou padrões diferentes de correntes e/ou voltagens aplicadas.

5 O MPFM 18 do MPFM sistema 40 da Figura 2 inclui um arranjo de eletrodo 42 que compreende um número arbitrário, L, de eletrodos 44 e fiação distribuída em torno de um conduto 46 que, nesta aplicação, tem geralmente um formato cilíndrico. Embora não expressamente mostrado, o conduto é posicionado em linha entre um dos poços de óleo 12_i e a tubulação 16 de modo
10 que os componentes multifásicos atravessam o conduto. Para propósitos de ilustração da invenção, o número, L, de eletrodos mostrado na figura é doze, mas menos ou mais de 12 eletrodos podem ser colocados em torno do conduto para medição, dependendo em parte do tamanho do cano e da resolução de imagem desejadas. Em uma realização, cada um dos eletrodos pode ser
15 montado ao longo da parede interna do conduto com uma conexão elétrica de uma fonte de sinal externa que passa para o interior da parede externa para se conectar ao eletrodo. Um revestimento pode ser aplicado a cada eletrodo para reduzir a resistência de contato entre o eletrodo e os meios que fluem através do conduto 46. O arranjo de eletrodos 44 é configurado em um plano, P,
20 ortogonal a um eixo de simetria central do conduto de formato cilíndrico 46.

Os eletrodos no arranjo 42 são conectados através da fiação ao conjunto de circuitos eletrônicos 48 que inclui, por exemplo, para cada eletrodo: uma fonte de corrente ou voltagem, um conversor de C para A, um conversor de A para C, um amplificador de diferencial e um ou mais filtros. O conjunto de
25 circuitos 48 inclui adicionalmente multiplexadores analógicos, conjunto de circuitos de clock e/ou uma unidade E/S digital acoplada a um computador 50 com a finalidade de fornecer conjuntos de sinais de entrada para os eletrodos. Disposições específicas para o conjunto de circuitos 48 são conhecidas na

técnica e não são descritas adicionalmente no presente documento devido ao fato de a ilustração da invenção não exigir ilustração adicional de projetos de circuito.

O computador 50 pode compreender processadores com alta
5 capacidade e alta velocidade que incluem um processador de sinal digital convencional do tipo usado para a reconstrução de imagem, e um visor adequado 52 para visualizar as imagens geradas de acordo com a invenção. Outros conjuntos de circuitos de processamento tais como arranjos de porta programáveis em campo (FPGA) e dispositivos lógicos programáveis
10 complexos (CPLD) podem ser incorporados no computador 50 ou em outras porções do sistema 40.

Quando cada conjunto de sinais elétricos é aplicado aos eletrodos 44, um campo elétrico giratório é produzido no interior do conduto. A seguinte discussão considera que os sinais de voltagem são aplicados aos eletrodos e
15 que os sinais de corrente são adquiridos em resposta a isto com a finalidade de gerar dados necessários para reconstrução de imagem. As fontes de voltagem são usadas para aplicar cada um dos conjuntos de padrão aos eletrodos 44, e os conjuntos de sinal de corrente correspondentes em cada um dos eletrodos são medidos.

20 A Figura 3 é um diagrama esquemático simplificado de um sistema de EIT de voltagem aplicada 60 que tem L eletrodos. Cada eletrodo 44 é conectado a um circuito 62 que inclui uma fonte de voltagem para gerar a voltagem aplicada bem como um amperímetro para medir a corrente, e um voltímetro para medir diretamente a voltagem aplicada. Uma rede de
25 comutação 63 permite que um único circuito de calibragem 64 seja conectado a qualquer um dos circuitos de fonte de voltagem/amperímetro/voltímetro para permitir que todo o sistema seja calibrado para uma única fonte de referência. Um controlador digital (não mostrado) faz interface com os componentes

supracitados para operar funções de comutação que incluem calibragem, geração de sinal e aquisição de dados de medição. Os dados de medição são processados de acordo com a invenção pelo computador 50 para determinar a distribuição de condutividade elétrica no plano P ao longo do qual os eletrodos
5 são posicionados.

A distribuição de condutividade e permissividade elétrica é adicionalmente processada para determinar características de material do fluxo multifásico, que incluem distribuição de diferentes fases ou distribuição de diferentes materiais na fase líquida, por exemplo, óleo e água. A análise da
10 distribuição da condutividade elétrica pode determinar regimes de fluxo, frações de fase e velocidade de componentes individuais do sistema de múltiplos materiais. Os regimes de fluxo podem, por exemplo, incluir fluxo espumante, fluxo agitado, fluxo lento ou fluxo anular.

Em realizações de fonte de voltagem, o fluxo de corrente entre os
15 eletrodos é uma função de voltagens relativas aplicadas em todos os eletrodos, a distribuição de condutividade e permissividade ao longo do plano P sobre a qual os eletrodos são configurados. Por exemplo, o material pode ser somente óleo ou pode ser uma mistura líquida de óleo-água bem como uma fase gasosa separada. Dependendo da distribuição de constituintes do material, a
20 condutividade e a permissividade entre os eletrodos irão variar e consequentemente o nível de corrente entre os eletrodos também irá variar. Dessa forma, com a aplicação de um ou mais conjuntos de voltagem sets e os dados de corrente medidos correspondentes, uma matriz de valores de condutividade correspondentes à condutividade variada ao longo do plano P
25 pode ser calculada. Devido ao fato de estes valores de condutividade corresponderem às condutividades e permissividades dos materiais que atravessam o plano P, através da análise das condutividades, a composição do material ou a distribuição de fluxo de pode ser determinada.

Cada conjunto de padrões de voltagem é uma função que varia com o tempo que produz um campo elétrico giratório no interior do conduto 44, isto é, o campo elétrico altera a direção em uma velocidade angular que é uma função da frequência de sinal aplicada, ω ou múltiplos inteiros da mesma. Para
5 uma frequência constante ω , a velocidade angular com a qual o campo gira será constante.

Quando o campo elétrico giratório é produzido pela aplicação sequencial de um conjunto de padrões de voltagem aos L eletrodos, os padrões de voltagem que serão aplicados nos eletrodos podem ser
10 representados como:

$$V_k^\lambda = \hat{V} \sin(\omega t \pm \frac{2\pi\lambda}{L}(k-1)) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$V_k^\lambda = \hat{V} \sin \omega t \cos(\frac{2\pi\lambda}{L}(k-1)) + \hat{V} \cos \omega t \sin(\frac{2\pi\lambda}{L}(k-1)) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$V_k^\lambda = \hat{V} \sin \omega t \cos(\frac{2\pi\lambda}{L}(k-1)) - \hat{V} \cos \omega t \sin(\frac{2\pi\lambda}{L}(k-1)) \quad (\text{Eq. 3})$$

onde V_k^λ é a voltagem aplicada ao k ésimo eletrodo no λ^{th} conjunto de padrões de excitação, $\hat{V}$ é uma voltagem pico de uma senoide de referência, t é o tempo e ω é a frequência da senoide. As Equações (2) e (3) são formas alternativas da equação (1) com cada uma correspondente das
15 duas + e - alternativas da Equação (1) sendo que o a opção do sinal de mais fornece um padrão de voltagem avançado e a opção de sinal negativo fornece um padrão de voltagem inverso. Um conjunto de sinal de acordo com a Equação (2) gera um padrão de voltagem avançado para rotação no sentido horário do campo elétrico no interior do conduto 46, enquanto que um conjunto
20 de sinal de acordo com a Equação (3) gera um padrão de voltagem inverso para rotação no sentido anti-horário do campo elétrico no interior do conduto. Um conjunto de padrões de excitação pode compreender um conjunto de padrões de voltagem avançados de acordo com a Equação (2) ou um conjunto de padrões de voltagem inversos de acordo com a Equação (3). Em tais
25 realizações, λ pode se situar na faixa de 1 a $L/2$, ou mais, resultando na

aplicação de um total de λ conjuntos de padrões de voltagem avançados ou inversos que são aplicados aos eletrodos 44. Em outra realização, os conjuntos de sinais aplicados aos eletrodos 44 podem compreender tanto padrões avançados como inversos, resultando em informações mais completas sobre o sistema de múltiplos materiais. Padrões de voltagem avançados e padrões de voltagem inversos fornecem juntos informações sobre componentes reais e imaginários de elementos elétricos do sistema.

A Figura 4 é uma ilustração esquemática 80 dos eletrodos 44, mostrando para $L = 8$, oito eletrodos 44_i , para $i = 1 - 8$. A ilustração de $L = 8$ eletrodos é exemplificativa. Os eletrodos 44_i são uniformemente separados em posições ao longo de um círculo cortado pelo plano P no conduto de formato cilíndrico 46. A Figura 4 ilustra adicionalmente um conjunto de valores de forma de onda V_i , para $i = 1 - 8$ posicionados em uma forma de onda sinusoidal. Para um determinado valor de i , cada valor V_i ilustrado corresponde a uma entrada de sinal em um eletrodo correspondente 44_i . Ou seja, cada valor de forma de onda V_i é um valor temporal que ocorre ao mesmo tempo em um diferente dentre os oitos sinais de entrada de voltagem dependente do tempo gerados de acordo com Equação (2) ou Equação (3), sendo que $\hat{V} = 10V$ e para o conjunto de padrões aplicados que tem $\lambda = 1$. As diferenças entre amplitudes de voltagem V_k^λ aplicadas a eletrodos adjacentes na sequência de oito eletrodos 44_i estão baseadas nos deslocamentos de fase impostos por $2\pi\lambda(k-1)/L$ com $k = i$ e $\lambda = 1$. Dessa forma, os valores de forma de onda V1 a V8 são sinais de voltagem de fase deslocada simultaneamente aplicados aos eletrodos em um determinado momento.

Neste exemplo, o conduto 46 inclui uma emulsão óleo-água 86 e gás 88 segregado da emulsão, com o gás que flui na região central do conduto 46 e a emulsão 86 que circunda o fluxo de gás. Outros conjuntos de padrões de voltagem podem ser aplicados aos eletrodos que incluem, por exemplo,

segundo e/ou terceiro padrões de voltagem harmônica como na Equação (2) ou Equação (3) com λ igual a 2 e/ou 3, respectivamente.

Pelo sistema 60 da Figura 3, os circuitos 62 dedicados a cada eletrodo, todos operam sob um sinal de clock comum, cada um gera uma forma de onda que tem uma fase distinta em relação à fase da forma de onda gerada para o eletrodo adjacente. A esse respeito, o eixo horizontal sobre a qual os conjuntos de valores de forma de onda V_i são plotados corresponde a uma posição angular, no plano P, sobre o conduto de formato cilíndrico 46, de tal modo que em um determinado tempo (por exemplo, tempo $t = 0$), cada um dos oito pontos rotulados como V1 a V8 na senoide corresponda à magnitude do sinal aplicado em cada eletrodo. Dessa forma, com um deslocamento de fase de $2\pi/L$ (para $\lambda = 1$) que ocorre entre eletrodos adjacentes, as múltiplas formas de senoide de fase deslocada são simultaneamente aplicadas a eletrodos diferentes dos eletrodos igualmente separados e os valores V1 a V8 mostrados na forma de onda se referem às voltagens instantâneas aplicadas a oito eletrodos em um tempo, t . Coletivamente, os oito sinais de entrada geram um padrão de campo elétrico variante com o tempo que gira no plano P.

Em uma realização, quando somente a distribuição de condutividade é para ser determinada, o número total de conjuntos de padrões de voltagem aplicados aos eletrodos para adquirir informações completas sobre a distribuição de fase pode ser simplesmente $\lambda = L/2$. Os $L/2$ padrões podem ser padrões avançados, que produzem campo elétrico giratório no sentido horário, ou padrões inversos, que produzem campo elétrico giratório no sentido anti-horário.

Um processo de aquisição de dados de acordo com uma realização da invenção aplica sequencialmente λ conjuntos de padrões de voltagem aos eletrodos 44. Em outras realizações, os conjuntos de sinais elétricos aplicados podem compreender um ou mais conjuntos de valores de

corrente e um ou mais conjuntos de valores de voltagem. Para a propósito de melhor compreensão, o primeiro conjunto de sinal elétrico é considerado um conjunto de valores de voltagem.

Para cada conjunto de padrões de voltagem aplicados, um
5 conjunto de padrão de sinais elétricos é medido, por exemplo, de acordo com o sistema 60 da Figura 3. Um número exemplificativo de elementos de dados adquiridos para cada conjunto de padrões de voltagem aplicada é o produto do número de eletrodos e do número de medições tomadas por ciclo de sinal aplicado para um determinado valor de λ . Com o conjunto de circuitos 48 do
10 sistema 40 que inclui conversores A/C, para cada padrão de excitação de voltagem, uma série de tempo de dados de corrente é registrada para cada um dos L eletrodos. Estes dados de série de tempo são processados para extrair amplitudes e fases de correntes em todos os L eletrodos. Os dados de série de tempo em cada eletrodo fornecem um valor de amplitude e um valor de fase
15 para corrente naquele eletrodo. Portanto, para L eletrodos existem L medições. O processo é repetido para todos os λ conjuntos de padrões de voltagem para fornecer λL elementos de dados de série de tempo medidos.

Com base em λL elementos de dados de série de tempo medidos, uma matriz de condutividade é determinada, a qual é representativa da
20 distribuição de material no conduto 46. A reconstrução de imagem é executada com base na matriz de condutividade e/ou admissividade. Para discussão adicional sobre determinações exemplificativas de valores de matriz indicativos de distribuição de material, consulte o pedido sob o número de série US12/652.116 incorporado no presente documento a título de referência.

25 De acordo com a invenção, a determinação da matriz de condutividade ou admissividade destoa das abordagens convencionais que descobrem a distribuição através da minimização da divergência de modelo avançado. Em vez disso, um problema de maximização é resolvido, que a

energia da distribuição de condutividade é a função objetiva sujeita à restrição da divergência de modelo avançado. Um exemplo a seguir, com voltagem U_{el} em cada eletrodo e o modelo avançado é definido como

$$U_{el} = J(\sigma) * \sigma \quad (\text{Eq. 4})$$

- 5 com J , a jacobiana, sendo a derivada parcial de U_{el} em relação à condutividade σ , embora σ possa, alternativamente, representar admissividade.

Na forma de matriz, o modelo avançado é expresso da seguinte forma:

$$U_i = \sum_{j=1}^N J_{ij} \sigma_j \quad (\text{Eq. 5})$$

- 10 onde U_i é um vetor que compreende um número total de elementos de dados, M , por exemplo, dados de corrente medidos, com $i = 1, 2, 3, \dots, M$.

A matriz de condutividade σ_j compreende j elementos que definem coletivamente uma distribuição de condutividade a ser determinada para uma região no interior do conduto 46 e ao longo do plano, P .

- 15 A função objetiva pode ser selecionada a partir de uma variedade de funções de energia possíveis relacionadas ao campo. No presente contexto, foi escolhido como exemplo,

$$P = \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

- 20 Ou seja, a energia da distribuição de condutividade é maximizada, com a divergência de modelo avançado que é a restrição. Especificamente, a maximização pode ser alcançada com o uso da Técnica de Multiplicador de Lagrange sendo que λ_i denota os termos do Multiplicador de Lagrange:

$$F(\sigma) = \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 - \sum_{i=1}^M \lambda_i [J_{i,j} \sigma_j - U_i] \quad (\text{Eq. 7})$$

Consequentemente $F(\sigma)$ é submetido à condição

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_j} = 0 \quad (\text{Eq. 8})$$

Então,

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_j} = 2\sigma_j - \sum_{i=1}^M \lambda_i J_{ij} = 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

e

$$\sigma_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \lambda_i J_{ij} \quad (\text{Eq. 10})$$

de modo que a expressão do modelo avançado se torne

$$\mathbf{U}_i = \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{ij} \sigma_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{ij} \sum_{k=1}^M \lambda_k \mathbf{J}_{kj} \quad (\text{Eq. 11})$$

e

$$g_i = 2\mathbf{U}_i = \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{ij} \sum_{k=1}^M \lambda_k \mathbf{J}_{kj} \quad (\text{Eq. 12})$$

(onde $\mathbf{U}_i$ é o dado de voltagem medido experimentalmente) que pode ser resolvido para encontrar os valores dos Multiplicadores de Lagrange,

5 λ_k , por iterações Gauss-Seidel

$$\lambda^{p+1} = \lambda^p + (\mathbf{D}^T \mathbf{D} + \alpha \mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{D}^T (\mathbf{g}_{exp} - \mathbf{g}_{comp}) \quad (\text{Eq. 13})$$

para $\lambda^{p+1} - \lambda^p = 0$ para cada λ_k

onde:

$\mathbf{R}$ é o parâmetro de regularização,

cada elemento de $\mathbf{D}$ é definido como

$$\mathbf{D}_{ik} = \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial \lambda_k} \right\} = \sum_{j=1}^N J_{ij} J_{kj} \quad (\text{Eq. 14})$$

α é um parâmetro de regularização

10

$$\mathbf{g}_{exp} = \mathbf{g}_i,$$

$$\mathbf{g}_{comp} = 2\mathbf{U}_{comp}, \text{ onde } \mathbf{U}_{comp} \text{ é o dado de voltagem computado com}$$

o uso de modelo avançado $\mathbf{U}_{el} = \mathbf{J}(\sigma)\sigma$

e os termos $\mathbf{D}^T$ e $\mathbf{R}^T$ são transposições de $\mathbf{D}$ e $\mathbf{R}$, respectivamente.

15

Foi descrito um método para exibir uma imagem de um interior de uma estrutura que pode ser uma imagem medica de órgãos ou outras partes de um corpo humano, mas, mais genericamente, uma imagem de características no interior de um volume caracterizadas por diferentes

propriedades elétricas tais como fluidos multifásicos (por exemplo, os materiais incluem óleo e um gás de hidrocarboneto) que fluem através de um conduto, ou um volume que contém múltiplas regiões com diferentes condutividades que influenciam na transmissão de sinais elétricos através do volume. A informação de imagem determinada pode ser usada para estimar proporções relativas de material gasoso e líquido que flui através do conduto.

Uma característica de realizações da invenção é provisão de uma série de conjuntos de sinal elétrico para inserir nos eletrodos posicionados ao longo de um plano, com cada conjunto de sinal compreendendo um padrão de sinal elétrico para entrada em cada um dos eletrodos. Com a estrutura que inclui duas ou mais regiões com diferentes condutividades a invenção determina uma imagem representativa do interior da estrutura de uma maneira com uma abordagem mais computacionalmente eficiente para geração de imagem com tomografia de impedância elétrica.

Por meio de comparação, com o uso da técnica de Recontrutor de Erro de Uma Etapa de Newton, o solucionador inverso iterativo requer solução computacional intensa para todos os N elementos da distribuição de condutividade enquanto o processo supracitado resolve por M Multiplicadores de Lagrange λ_k . Ou seja, com o número de elementos, N , na matriz de condutividade que é muito maior que o número de medições adquiridas, M , a abordagem de reconstrução convencional, de solução iterativa com base na diferença entre o modelo avançado e os dados medidos, requer N soluções com técnicas iterativas.

Em realizações reveladas da invenção, a série de conjuntos de sinal elétrico aplicada compreende padrões de entrada de voltagem e os conjuntos de sinal elétrico medido compreendem níveis de corrente medidos. Em outras realizações, a série de conjuntos de sinal elétrico aplicada compreende padrões de entrada de corrente e os conjuntos de sinal elétrico

medido compreendem níveis de voltagem medidos. Ainda em outras realizações, alguns na série de conjuntos de sinal elétrico aplicados compreendem padrões de entrada de voltagem enquanto outros na série de conjuntos de sinal elétrico aplicados compreendem padrões de entrada de corrente, e alguns dos conjuntos de sinal elétrico medido compreendem níveis de corrente medidos enquanto outros dos conjuntos de sinal elétrico medido compreendem níveis de voltagem medidos.

O método inventivo foi descrito para um conduto que define um volume que é geralmente cilíndrico em formato, mas a invenção é aplicável a estruturas de formatos variados que incluem cavidades corporais e massas corporais de tamanhos e formatos variados. Ademais, um único arranjo de eletrodos foi descrito, enquanto contempla-se que os conjuntos de sinais podem ser simultânea ou sequencialmente aplicados a múltiplos arranjos de eletrodos separados (por exemplo, ao longo de planos que cortam a estrutura a ser examina, e as disposições também são contempladas sendo que os eletrodos e a estrutura podem ser deslocados entre si para gerar informação de imagem associada a diferentes porções do volume sob investigação.

Embora somente certas características da invenção tenham sido ilustradas e descritas no presente documento, muitas modificações e alterações irão ocorrer para aqueles elementos versados na técnica. Deve ser, portanto, compreendido que as reivindicações em anexo se destinam a abranger todas as tais modificações e alterações que se enquadrem no verdadeiro espírito da invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. MÉTODO PARA FORNECER UMA IMAGEM DE UM INTERIOR DE UMA ESTRUTURA (46), que contém múltiplas regiões com diferentes condutividades ou admissividades que influenciam na transmissão de sinais elétricos através da estrutura, que compreende:

fornecer uma série de eletrodos (44) ao longo de um plano que atravessa a estrutura (46), com os eletrodos (44) posicionados ao longo de uma superfície externa da estrutura (46);

fornecer uma série de conjuntos de sinal elétrico para entrada nos eletrodos (44), cada conjunto de sinal compreende um padrão de sinal elétrico para entrada em cada um dos eletrodos (44);

aplicar sequencialmente cada um dos conjuntos de sinal elétrico (V_i) aos eletrodos (44), a aplicação de cada conjunto de sinal gera um campo elétrico giratório no interior da estrutura (46);

obter, em resposta à aplicação de cada conjunto de sinal, um conjunto de sinais elétricos medidos a partir dos eletrodos (44);

calcular, com o conjunto de sinais elétricos medidos, uma distribuição de condutividade ou admissividade representativa do interior da estrutura 46 em uma região da estrutura (46) sobre a qual os eletrodos (44) estão posicionados; e

determinar os dados de imagem representativos do interior da estrutura (46) incluindo duas ou mais regiões com diferentes condutividades ou admissividades, sendo que o processo de cálculo da distribuição de condutividade ou admissividade inclui definir uma função de energia com base na distribuição de condutividade e um modelo avançado que expressa o conjunto de sinais elétricos medidos como uma função da alteração em valores de voltagem em relação à condutividade e exigir que a derivada parcial da diferença entre a função de energia e uma função com base no modelo

avanzado seja igual a zero.

2. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a série de conjuntos de sinal elétrico aplicados (V_i) compreende padrões de entrada de voltagem e os conjuntos de sinal elétrico medido compreendem
5 níveis de corrente medidos.

3. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a série de conjuntos de sinal elétrico aplicados (V_i) compreende padrões de entrada de voltagem e os conjuntos de sinal elétrico medido compreendem
níveis de corrente medidos.

10 4. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a estrutura (46) é um conduto através do qual os materiais com diferentes condutividades fluem.

5. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a estrutura (46) é um conduto através do qual os materiais com diferentes fases
15 fluem.

6. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 4, sendo que os materiais incluem óleo (86) e um gás de hidrocarboneto (88).

7. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 4, sendo que a informação de imagem é usada para determinar proporções relativas de
20 material gasoso e líquido que fluem através do conduto (46).

8. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que os conjuntos de sinal aplicados compreendem λ conjuntos de padrões de excitação de voltagem, cada padrão aplicado a um dos L eletrodos (44), ($L = 1$ - k), e os padrões de voltagem são gerados de acordo com

$$V_k^\lambda = \hat{V} \sin(\omega t \pm \frac{2\pi\lambda}{L}(k-1))$$

25 onde V_k^λ é uma senoide de voltagem variante com tempo (82) aplicada ao k ésimo eletrodo (44) no λ^{th} conjunto de padrões de excitação, $\hat{V}$ é uma voltagem pico de uma senoide de referência, t é o tempo e ω é a

frequência da senoide.

9. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 8, sendo que o conjunto de sinais elétricos medidos compreende pelo menos λL elementos de dados medidos usados para determinar a distribuição de condutividade.

5 10. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que: o processo de cálculo da distribuição de condutividade ou admissividade inclui definir a função de energia como

$$P = \sum_{j=1}^N \sigma_j^2$$

para um conjunto de valores de condutividade ou admissividade σ_j para $j = 1$ a N , com N igual ao número total de valores σ_j usados para definir a
10 distribuição de condutividade ou admissividade;

o modelo avançado que expressa o conjunto de sinais elétricos medidos como uma função da alteração em valores de voltagem em relação à condutividade ou à admissividade é expresso como

$$U_i = \sum_{j=1}^N J_{ij} \sigma_j$$

onde U_i é um vetor que compreende um número total de
15 elementos de dados, M , no conjunto de sinais elétricos medidos nos eletrodos (44), com $i = 1, 2, 3, \dots, M$; e

avaliar uma função $F(\sigma_j)$ para a qual

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_j} = 0$$

$$\text{onde } F(\sigma) = \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 - \sum_{i=1}^M \lambda_i [J_{i,j} \sigma_j - U_i]$$

de tal modo que a derivada parcial da diferença entre a função de energia e uma função com base no modelo avançado seja igual a zero,
20 determinando assim uma distribuição de condutividade ou admissividade representativa de uma porção do interior da estrutura.

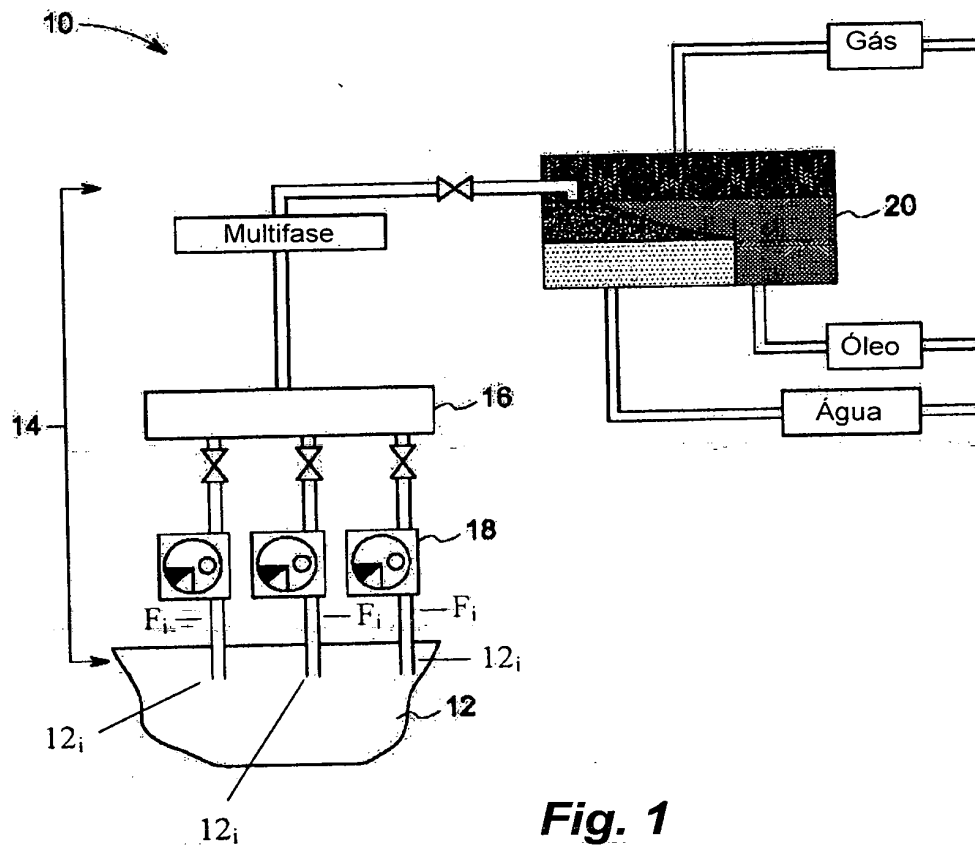


Fig. 1

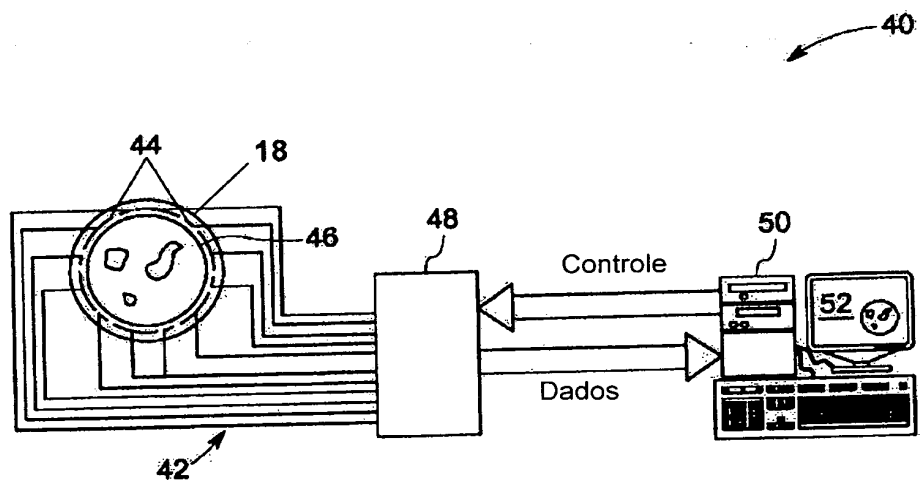
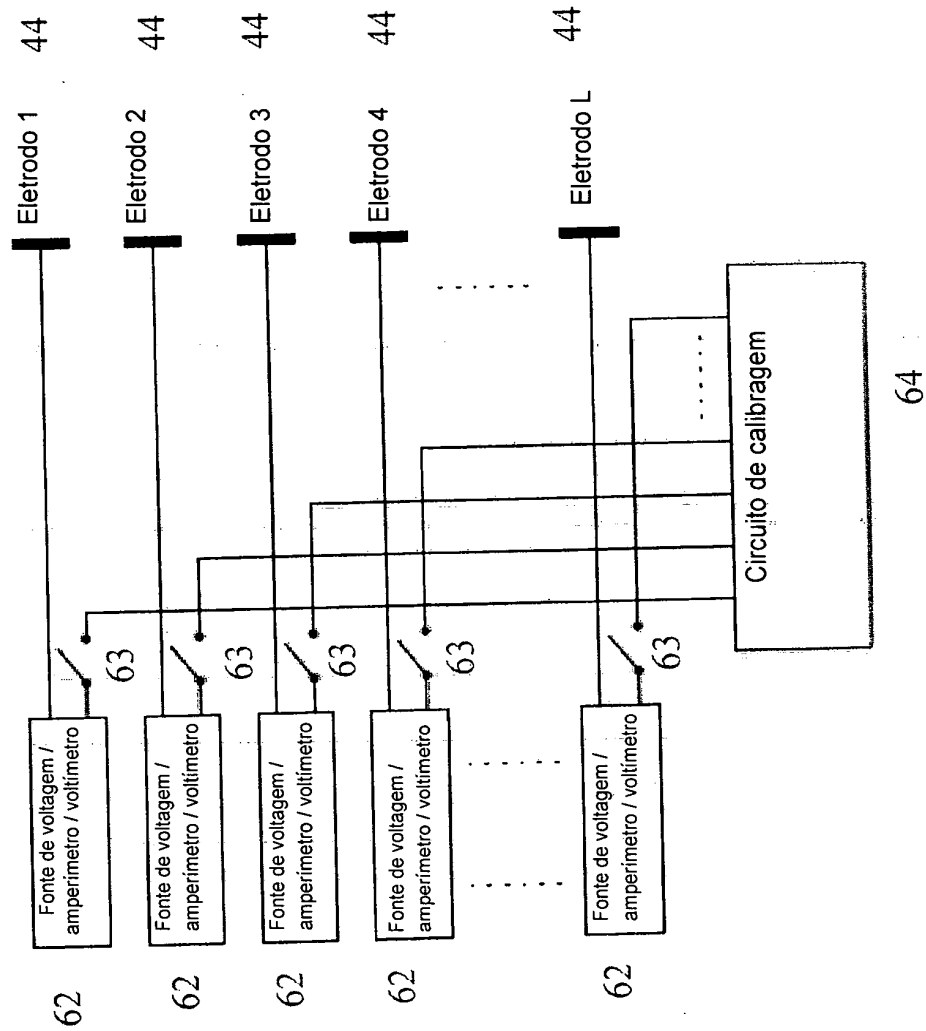


Fig. 2

60**Fig. 3**

82

80

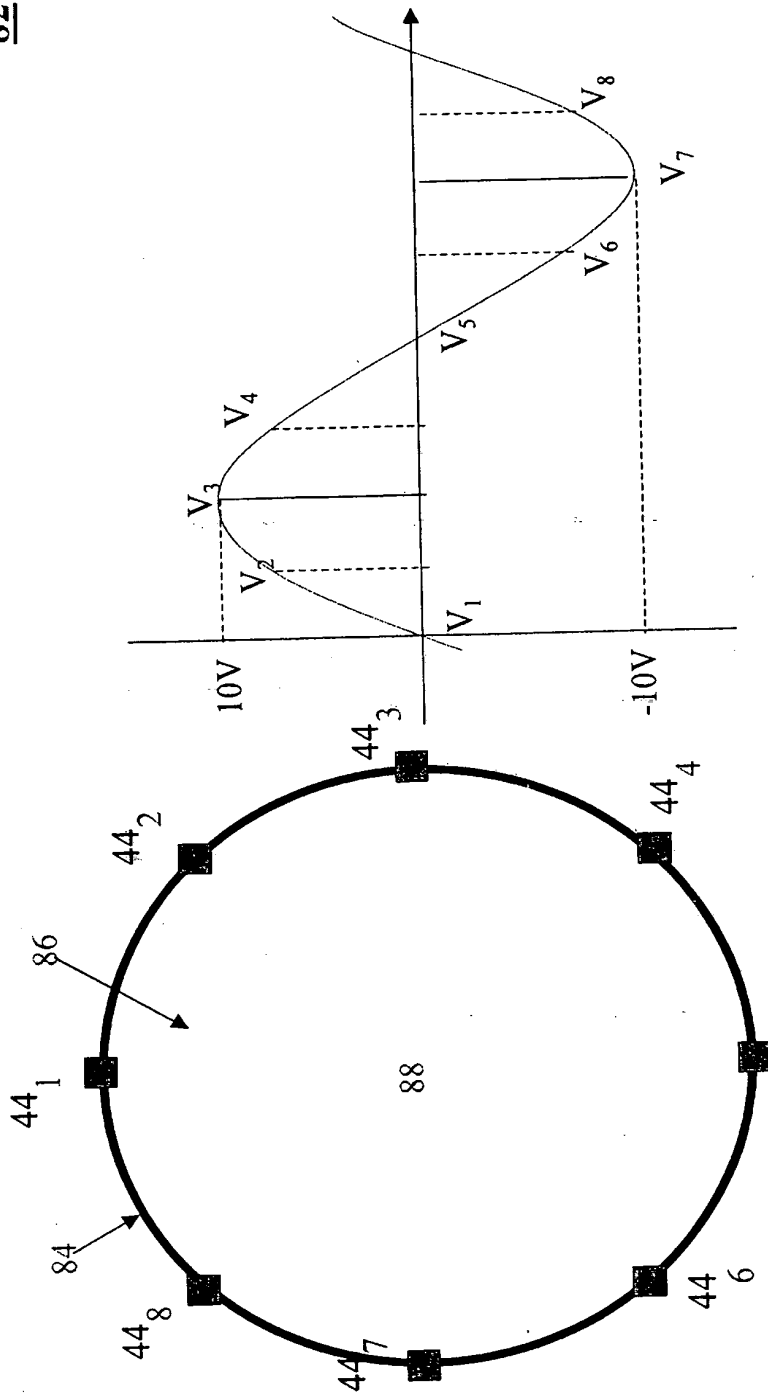


Fig. 4

RESUMO

“MÉTODO PARA FORNECER UMA IMAGEM DE UM INTERIOR DE UMA ESTRUTURA”

Trata-se de um método para fornecer uma imagem de um interior
5 de uma estrutura (46) que contém regiões com diferentes condutividades ou
admissividades. Em uma realização uma série de conjuntos de sinal elétrico
(V_i) é aplicada a uma série de eletrodos, cada conjunto de sinal gera um campo
elétrico giratório. Um conjunto de sinais elétricos medidos obtido a partir dos
eletrodos (44) é usado para calcular uma distribuição de condutividade ou
10 admissividade representativa do interior da estrutura em uma região sobre a
qual os eletrodos (44) estão posicionados. O processo de cálculo da
distribuição inclui definir uma função de custo, por exemplo, a função de
energia com base na distribuição, e um modelo avançado que expressa o
conjunto de sinais elétricos medidos como uma função da alteração em valores
15 de voltagem em relação à condutividade ou admissividade e exigir que a
derivada parcial da diferença entre a função de energia e uma função com
base no modelo avançado seja igual a zero.