



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

(21) PI 0917064-2 A2



(22) Data do Depósito: 27/11/2009

(43) Data da Publicação Nacional: 11/08/2020

(54) **Título:** CONFIGURAÇÃO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, MÉTODO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO E PROGRAMA DE COMPUTADOR

(51) **Int. Cl.:** A61B 5/05; G01R 33/28; G01R 33/483.

(30) **Prioridade Unionista:** 08/12/2008 EP 08170919.8.

(71) **Depositante(es):** KONINKLIJKE PHILIPS ELECTRONICS N.V..

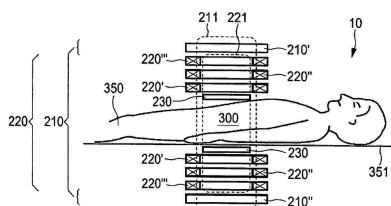
(72) **Inventor(es):** JUERGEN E. RAHMER; JUERGEN WEIZENECKER; BERNHARD GLEICH.

(86) **Pedido PCT:** PCT IB2009055385 de 27/11/2009

(87) **Publicação PCT:** WO 2010/067248 de 17/06/2010

(85) **Data da Fase Nacional:** 03/06/2011

(57) **Resumo:** CONFIGURAÇÃO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, MÉTODO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO E PROGRAMA DE COMPUTADOR Na geração de imagem de partícula magnética (MPI), a reconstrução exige o conhecimento de uma assim chamada função de sistema. Esta função descreve a relação entre a posição espacial e a resposta de frequência. Para resoluções e campos de vista razoáveis, a função de sistema se torna relativamente grande, resultando em longos tempos de aquisição para a função de sistema e alta demanda de memória durante a reconstrução. A presente invenção propõe a redução do tamanho da matriz de função de sistema utilizando-se as propriedades estruturais, da matriz. Essas propriedades são, por exemplo, simetrias espaciais que reduzem o número de colunas e respostas idênticas em diferentes frequências, reduzindo o número de fileiras. Em outras configurações a matriz pode ser transformada em uma representação esparsa utilizando funções de base apropriadas.



CONFIGURAÇÃO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, MÉTODO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO E PROGRAMA DE COMPUTADOR

5 CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a uma configuração para detectar e/ou localizar um material magnético em uma região de ação. A presente invenção refere-se ainda a um método correspondente e a um programa de computador para
10 controle da configuração.

HISTÓRICO DA INVENÇÃO

Uma configuração deste tipo é conhecida pelo pedido de patente alemã DE 101 51 778 A1. Na realização descrita na dita publicação, primeiramente é gerado um campo magnético
15 tendo uma distribuição espacial da força de campo magnético, de modo que uma primeira sub-zona, tendo uma força de campo magnético relativamente baixa, e uma segunda sub-zona, tendo uma força de campo magnético relativamente alta, sejam
formadas na zona de avaliação. A posição no espaço das sub-
20 zonas na zona de avaliação é então alterada, de modo que a magnetização das partículas na zona de avaliação mude localmente. São registrados sinais que dependem da magnetização na zona de avaliação, magnetização esta que foi influenciada pela alteração na posição no espaço das sub-
25 zonas, e informações referentes à distribuição espacial das partículas magnéticas na zona de avaliação são extraídas desses sinais, de modo que uma imagem da zona de avaliação possa ser formada. Essa configuração tem

Uma configuração e método similares são conhecidos em Gleich, B. and Weizenecker, J. (2005), "Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles" em Nature, vol. 435, 30 de junho de 2005, pp. 1214-1217. A configuração e método para geração de imagem de partícula magnética (MPI) descrito na dita publicação se aproveita da curva de magnetização não linear de pequenas partículas magnéticas.

MPI é um método para distribuições de imagens de nano-partículas magnéticas que combinam alta sensibilidade com a capacidade de rápida geração de imagem dinâmica, tornando-a uma candidata promissora para aplicações de imagens clínicas. A MPI aplica um novo método de codificação de sinal com base no deslocamento dinâmico de um processo de excitação localizado e permite a rápida geração de imagem volumétrica. No entanto, ao contrário das modalidades estabelecidas de geração de imagem como ressonância magnética e tomografia computadorizada (TC), nenhuma transformada matemática simples já foi identificada para a reconstrução de imagens a partir dos dados adquiridos. Portanto, a reconstrução de imagem MPI exige o conhecimento de uma "função de sistema" que descreve uma resposta do sistema a uma determinada distribuição espacial de partículas, ou seja, o mapeamento da posição de partícula para resposta de frequência. Para solucionar o problema de reconstrução, a função de sistema deve ser invertida, geralmente exigindo algum esquema de regularização.

A função de sistema pode ser determinada experimentalmente medindo-se a resposta de magnetização de uma amostra do tipo de ponto em um grande número de posições espaciais correspondentes ao número de pixels ou voxels de imagem. Esse procedimento de calibração exige longuíssimos tempos de aquisição e, além disso, provê uma função de

sistema que é contaminada com ruído. Devido ao grande tamanho da matriz de função de sistema, a resolução do problema de reconstrução inversa também consome um tempo razoável e requer grandes quantidades de memória de computador.

5 SUMÁRIO DA INVENÇÃO

É um objetivo da presente invenção prover uma configuração e um método para detectar e/ou localizar um material magnético em uma região de ação por meio do qual é necessário menos tempo para aquisição dos dados de função de sistema da função de sistema e/ou para reconstrução de imagem e/ou por meio do qual é necessário menos espaço de armazenamento dos dados de função de sistema da função de sistema.

Em um primeiro aspecto da presente invenção, é apresentado uma configuração conforme definida na reivindicação 1, compreendendo:

- meios de seleção para gerar um campo de seleção magnética tendo um padrão no espaço de sua força de campo magnético, de modo que uma primeira sub-zona, tendo uma baixa força de campo magnético, e uma segunda sub-zona, tendo uma maior força de campo magnético, sejam formadas na região de ação,

- meios de acionamento para alterar a posição no espaço das duas sub-zonas na região de ação por meio de um campo de acionamento magnético, de modo que a magnetização do material magnético mude localmente,

- meios de recepção para captar sinais de detecção, sendo que os sinais de detecção dependem da magnetização na região de ação, sendo a magnetização influenciada pela alteração na posição no espaço da primeira e segunda sub-zonas,

- meios de armazenamento para armazenar um subconjunto de dados de função de sistema da função de

sistema da configuração, a dita função de sistema compreendendo um conjunto de dados de função de sistema que descreve a relação entre a posição espacial do material magnético e a resposta do sistema para a referida
 5 configuração e a trajetória ao longo da qual a dita primeira sub-zona é movimentada para a aquisição dos ditos dados de função de sistema, e

- meios de reconstrução para reconstruir a distribuição espacial do material magnético na região de ação
 10 a partir dos sinais de detecção e do subconjunto armazenado dos dados de função de sistema, utilizando conhecimento adicional sobre a estrutura da função de sistema, onde os ditos meios de reconstrução são adaptados para gerar a representação reduzida da função de sistema por meio da
 15 aplicação transformada do tipo Chebyshev ou cosseno ao longo da dimensão espacial e da resolução do problema de reconstrução muito mais esparsa que surge após a transformada.

Em um outro aspecto da presente invenção, um método
 20 correspondente é apresentado conforme definido nas reivindicações 11.

Ainda em outro aspecto da presente invenção, é apresentado um programa de computador compreendendo meios de código de programa para fazer um computador controlar uma
 25 configuração de acordo com a reivindicação 1 para realizar as etapas do método de acordo com a reivindicação 11 quando o dito programa de computador é executado no computador.

Configurações preferidas da invenção são definidas nas reivindicações dependentes. Deve ficar entendido que o
 30 método reivindicado tem configurações preferidas similares e/ou idênticas que o dispositivo reivindicado e conforme definido nas reivindicações dependentes.

A presente invenção tem com base a idéia de que não

é necessário obter e armazenar a função de sistema completo. A partir do conhecimento teórico do processo de codificação de sinal, passa-se a conhecer a estrutura da função de sistema, a qual foi utilizada para acelerar a aquisição de
5 função de sistema e/ou mesmo simular partes ou toda a função de sistema. Informações sobre a estrutura de matriz também foram utilizadas para encontrar representações de função de sistema mais compactas, ajudando a reduzir as exigências de memória e acelerar a reconstrução. Por fim, a identificação
10 de uma transformada matemática que leva dos dados até a imagem pode ser utilizada para acelerar o processo de reconstrução.

De acordo com o primeiro aspecto da presente invenção, essa idéia geral é explorada para reduzir o espaço
15 de armazenamento de dados de função de sistema. Em particular, somente um subconjunto dos dados de função de sistema é armazenado e somente este subconjunto dos dados de função de sistema armazenados é utilizado na reconstrução da distribuição espacial do material magnético na região de
20 ação, ou seja, na reconstrução de uma imagem a partir dos sinais de detecção obtidos pelos meios de recepção. Além disso, o conhecimento sobre a estrutura da função de sistema é utilizado na reconstrução. Este conhecimento pode compreender, conforme definido nas configurações preferidas,
25 simples simetrias espaciais que ocorrem nas componentes de frequência da função de sistema, representações das dependências espaciais das componentes de frequência por funções analíticas, ou informações sobre redundâncias espectrais nas componentes espaciais. Este conhecimento pode
30 ser derivado de uma avaliação analítica do esquema de codificação de MPI ou uma simulação do processo de codificação, tanto para uma determinada combinação da configuração, por exemplo, configuração do escaneamento,

trajetória de movimento da primeira sub-zona, tendo uma baixa força de campo magnético (também denominada "ponto livre de campo", FFP), e material magnético.

O uso do conhecimento sobre propriedades espaciais da função de sistema permite a aquisição de somente uma função de sistema espacialmente reduzida, cujo conhecimento é explorado de acordo com o segundo aspecto da presente invenção. Dessa forma, também o procedimento de calibração pode ser acelerado.

De modo geral, o uso do conhecimento sobre as propriedades espectrais da função de sistema permite reduzir o tamanho da matriz de função de sistema, acelerando assim a aquisição, a manipulação e o processo de reconstrução de dados.

De acordo com uma realização preferida, os meios de recepção são adaptados para captar somente o dito subconjunto dos dados de função de sistema da função de sistema da configuração por meio da detecção de sinais, enquanto uma sonda do dito material magnético é subsequentemente colocada nas diversas posições diferentes na dita região de ação. Este tipo de aquisição não é muito diferente, em particular com relação ao movimento do FFP através da região de ação, ou seja, com relação à trajetória utilizada, desde a aquisição de sinais de um objeto de avaliação (real), por exemplo, um paciente, além do fato de que, de acordo com a presente invenção, a sonda não é movimentada para todas as posições de uma grade que abrange a região de ação, porém somente um conjunto reduzido de seus pontos.

Existem diversas opções diferentes para as posições nas quais a sonda está posicionada para a aquisição dos sinais para aquisição do dito subconjunto dos dados de função de sistema. De acordo com configurações vantajosas, as diversas posições estão localizadas em um quadrante ou em um

octante da dita região de ação ou estão distribuídas de forma intercalada na região de ação.

Preferencialmente, os meios de reconstrução são adaptados para primeiro reconstruir a função de sistema completo a partir do subconjunto armazenado do conjunto de dados de função de sistema e para então reconstruir a distribuição espacial do material magnético a partir dos sinais de detecção utilizando o conjunto reconstruído de dados de função de sistema completo. A função de sistema completo também pode, após sua reconstrução, ser armazenada nos meios de armazenamento para uso em reconstruções posteriores.

Alternativamente, os meios de reconstrução são adaptados para reconstruir dados de função de sistema que são exigidos para a reconstrução da distribuição espacial do material magnético, porém não estão contidos no subconjunto armazenado do conjunto de dados de função de sistema, ocorrendo durante a reconstrução da distribuição espacial do material magnético.

Embora a primeira realização dessas duas alternativas tenha a vantagem de que a real reconstrução é mais rápida, o que se mantém particularmente para reconstruções subsequentes, a última realização tem a vantagem de que menos espaço de armazenamento é definitivamente necessário.

Conforme explicado acima, conhecimento adicional é utilizado para a reconstrução dos dados de função de sistema completo (ou pelo menos os dados de função de sistema necessários para a reconstrução da distribuição espacial do material magnético). Em uma realização preferida, são exploradas simetrias espaciais, em particular simetrias especulares espaciais existentes nas componentes de frequência da função de sistema. Essas simetrias especulares

não podem ser somente obtidas por medições práticas, porém também a partir de considerações teóricas utilizando o conhecimento da trajetória (e sua simetria), a curva de magnetização de partícula e a configuração da combinação (e sua simetria), em particular de seus meios de seleção, meios de acionamento e meios de recepção. Por exemplo, para uma trajetória de Lissajous com partículas de Langevin, é observada simetria especular espacial que possui uma paridade dependente da frequência bem definida. Para o caso de imagens em 2D, isso significa que somente um quarto de toda a função de sistema precisa ser medido e armazenado.

De acordo com outra realização, os meios de reconstrução são adaptados para reconstruir a distribuição espacial do material magnético na região de ação utilizando a função de sistema com um número reduzido de componentes espectrais, obtidos a partir da soma das componentes de frequência do subconjunto armazenado de dados de função de sistema com informações espaciais similares. Uma vez que várias frequências de campo de acionamento estão envolvidas no movimento de ponto livre de campo, o sinal gerado pela resposta de partícula não linear contém somas e diferenças dessas frequências. As respectivas componentes de frequência compartilham o mesmo padrão espacial e, portanto, podem ser combinadas sem perda de informações. Isto resulta em um número reduzido de fileiras na matriz de função de sistema, o que significa que somente um subconjunto dos dados de função de sistema completo é exigido e inicialmente armazenado.

De acordo com a presente invenção, os meios de reconstrução são adaptados para gerar uma representação reduzida da função de sistema por meio da aplicação de uma transformada matemática ao longo da dimensão espacial e da resolução do problema de reconstrução muito mais esparsa que surge após a transformada. O tipo de operação de transformada

tem com base o conhecimento da forma funcional do padrão espacial das componentes espectrais na função de sistema. Para uma trajetória de Lissajous do FFP, as componentes espectrais estão intimamente relacionadas às funções de Chebyshev do 2º tipo. Portanto, uma transformada de Chebyshev é adequada para chegar a uma representação esparsa da matriz de função de sistema e do problema de reconstrução que economiza memória e acelera a reconstrução. Em outras palavras, devido a essa íntima relação, cada componente de frequência pode ser aproximado por apenas alguns coeficientes da respectiva expansão. Alternativamente, uma transformada do tipo cosseno pode ser utilizada.

Preferencialmente, a dita representação reduzida da função de sistema é gerada por meio de uma transformação da função de sistema completo. De acordo com uma implementação prática desta realização, os dados de função de sistema completo são obtidos primeiro e, a partir deles, são determinados os coeficientes da representação reduzida, ou seja, uma descrição funcional pelo uso de polinomiais. Isto economiza espaço de armazenamento e poupa esforços para a reconstrução. De acordo com outra implementação prática desta realização, somente o subconjunto dos dados de função é obtido primeiro, a partir do qual os dados de função de sistema completo são reproduzidos para determinar a descrição funcional. Alternativamente, a descrição funcional, ou seja, os polinomiais, pode ser adaptada aos subconjunto obtido conforme descrito abaixo.

Ainda em outra realização, os meios de recepção são adaptados para medir diretamente a dita representação reduzida da função de sistema em pontos selecionados da região de ação, e os meios de reconstrução são adaptados para determinar os coeficientes das ditas funções analíticas que são utilizadas para descrever a dependência espacial da dita

representação reduzida medida da função de sistema. Os pontos do subconjunto são selecionados, de modo que os coeficientes da descrição funcional possam ser determinados da forma mais fácil possível.

5 Deve ser observado que a invenção não é somente configurada nas combinações, métodos e programas de computador reivindicados, mas também em um meio de processamento que pode ser configurado em hardware, software ou em uma combinação destes, que atuam como os meios de
10 reconstrução na configuração de acordo com a presente invenção. Assim, a invenção também se refere a um meio de processamento para reconstruir a distribuição espacial do material magnético na região de ação a partir dos sinais de detecção e do subconjunto armazenado dos dados de função de
15 sistema, utilizando conhecimento adicional sobre a estrutura da função de sistema. Além disso, a presente invenção também se refere a um método de processamento correspondente e um
respectivo programa de computador para realizar o dito método.

20 BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Estes e outros aspectos da invenção ficarão evidentes e esclarecidos com referência à(s) realização(ções) descrita(s) a seguir. Nos desenhos a seguir:

A Figura 1 mostra uma configuração de acordo com a
25 presente invenção,

A Figura 2 mostra um exemplo do padrão de linha de campo produzido por uma configuração de acordo com a presente invenção,

A Figura 3 mostra uma vista ampliada de uma
30 partícula magnética presente na região de ação,

As Figuras 4a e 4b mostram as características de magnetização destas partículas,

A Figura 5 mostra um diagrama de blocos do

equipamento de acordo com a presente invenção,

A Figura 6 mostra um sinal de detecção dependente do tempo $s(t)$ e seu espectro S_n ,

A Figura 7 mostra a resposta de partícula de magnetização $M(t)$, o sinal de tempo adquirido $s(t)$, e as componentes espectrais de magnitude S_n para diferentes campos de acionamento e curva de magnetização de partículas,

A Figura 8 mostra diagramas que ilustram a relação entre resposta de partícula ideal e compensação de campo de seleção,

A Figura 9 mostra diagramas que ilustram a dependência espacial de componentes de sinal espectral para um campo de acionamento harmônico em combinação com um campo de seleção de gradiente constante,

A Figura 10 mostra diagramas que ilustram a derivada de magnetização de partícula ideal com relação à componente de campo H_z ,

A Figura 11 mostra diagramas que ilustram a função de sistema de partícula ideal em diferentes harmônicos para movimento de FFP em 1D ao longo da linha central na direção z ,

A Figura 12 mostra diagramas que ilustram componentes de frequência sucessivos da função de sistema de partícula ideal para movimento de FFP em 2D de Lissajous com uma razão de frequência x/z de 24/25,

A Figura 13 mostra uma tabela de ilustrações das funções 2D de Chebyshev,

A Figura 14 mostra gráficos de ortogonalidade para os primeiros 256 componentes de realização de base,

A Figura 15 ilustra uma amostra de imagem e reconstrução de 64×64 a partir da expansão em componentes de Chebyshev e de função de sistema, e

As Figuras 16 - 19 ilustram o uso da matriz de

função de sistema ou partes desta para reconstrução de acordo com o método conhecido e de acordo com configurações da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

5 A Figura 1 mostra um objeto arbitrário a ser examinado por meio de uma configuração 10 de acordo com a presente invenção. O número de referência 350 na Figura 1 denota um objeto, neste caso um paciente humano ou animal, que está disposto em uma mesa adequada, sendo mostrada
10 somente parte da sua porção superior. Antes da aplicação do método de acordo com a presente invenção, partículas magnéticas 100 (não mostradas na Figura 1) são dispostas em uma região de ação 300 da configuração 10 da invenção. Especialmente antes de um tratamento terapêutico e/ou
15 diagnóstico de, por exemplo, um tumor, as partículas magnéticas 100 são posicionadas na região de ação 300, por exemplo, por meio de um líquido (não mostrado) compreendendo as partículas magnéticas 100 que são injetadas no organismo do paciente 350.

20 Como um exemplo de uma configuração da presente invenção, uma configuração 10 é mostrada na Figura 2 compreendendo diversas bobinas que formam meios de seleção 210 cuja variação define a região de ação 300 que também é denominada região de tratamento 300. Por exemplo, os meios de
25 seleção 210 são dispostos acima e abaixo do paciente 350 ou acima e abaixo da superfície da mesa. Por exemplo, os meios de seleção 210 compreendem um primeiro par de bobinas 210', 210'', cada uma compreendendo dois enrolamentos construídos identicamente 210' e 210'' que são dispostos coaxialmente
30 acima e abaixo do paciente 350 e que são atravessados por correntes iguais, especialmente em direções opostas. O primeiro par de bobinas 210', 210'' juntas é denominado meios de seleção 210 a seguir. Preferencialmente, correntes diretas

são utilizadas neste caso. Os meios de seleção 210 geram um campo de seleção magnética 211 que é, de modo geral, um campo magnético gradiente representado na Figura 2 pelas linhas de campo. Este possui um gradiente substancialmente constante na

5 direção do eixo (ou seja, vertical) do par de bobinas dos meios de seleção 210 e atinge o valor zero em um ponto neste eixo. Começando deste ponto livre de campo (não mostrado individualmente na Figura 2), a força de campo do campo de seleção magnética 211 aumenta nas três direções espaciais

10 conforme a distância aumenta a partir do ponto livre de campo. Em uma primeira sub-zona 301 ou região 301 que é denotada por uma linha tracejada em torno do ponto livre de campo, a força de campo é tão pequena que a magnetização das partículas 100 presentes nesta primeira sub-zona 301 não é

15 saturada, ao passo que a magnetização de partículas -100 presentes em uma segunda sub-zona 302 (fora da região 301) está em um estado de saturação. O ponto livre de campo ou primeira sub-zona 301 da região de ação 300 é preferencialmente uma área espacialmente coerente; pode ser

20 também uma área puntiforme ou ainda uma linha ou uma área plana. Na segunda sub-zona 302 (ou seja, na parte residual da região de ação 300 fora da primeira sub-zona 301), a força de campo magnético é suficientemente forte para manter as partículas 100 em um estado de saturação. Ao alterar a

25 posição das duas sub-zonas 301, 302 em uma região de ação 300, a magnetização (total) na região de ação 300 se altera. Medindo-se a magnetização na região de ação 300 ou um parâmetro físico influenciado pela magnetização, podem ser obtidas informações sobre a distribuição espacial das

30 partículas magnéticas na região de ação. Para alterar a posição espacial relativa das duas sub-zonas 301, 302 na região de ação 300, um outro campo magnético, o assim chamado campo de acionamento magnético 221, é sobreposto ao campo de

seleção 211 na região de ação 300 ou pelo menos em uma parte da região de ação 300.

A Figura 3 mostra um exemplo de uma partícula magnética 100 do tipo utilizado com uma configuração 10 da presente invenção. Esta compreende, por exemplo, um substrato esférico 101, por exemplo, de vidro, que é provido de uma camada magnética flexível 102 que tem uma espessura de, por exemplo, 5 nm e consiste, por exemplo, em uma liga de ferro-níquel (por exemplo, Permalloy). Esta camada pode ser coberta, por exemplo, por uma camada de revestimento 103 que protege a partícula 100 contra ambientes quimicamente e/ou fisicamente agressivos, por exemplo, ácidos. A força de campo magnético do campo de seleção magnética 211 necessário para a saturação da magnetização dessas partículas 100 depende de vários parâmetros, por exemplo, o diâmetro das partículas 100, o material magnético utilizado para a camada magnética 102 e outros parâmetros.

Por exemplo, no caso um diâmetro de 10 μm , um campo magnético de aproximadamente 800 A/m (correspondente aproximadamente a uma densidade de fluxo de 1 mT) é então necessário, ao passo que, no caso de um diâmetro de 100 μm , um campo magnético de 80 A/m é suficiente. Mesmo valores menores são obtidos quando um revestimento 102 de um material tendo uma menor magnetização de saturação é escolhido ou quando a espessura da camada 102 é reduzida.

Para mais detalhes sobre as partículas magnéticas 100 preferidas, as partes correspondentes da DE 10151778 são aqui incorporadas por referência, especialmente os parágrafos 16 a 20 e os parágrafos 57 a 61 da EP 1304542 A2 que reivindica a prioridade de DE 10151778.

O tamanho da primeira sub-zona 301 depende, por um lado, da resistência do gradiente do campo de seleção magnética 211 e, por outro lado, da força de campo do campo

magnético necessário para a saturação. Para uma saturação suficiente das partículas magnéticas 100 em uma força de campo magnético de 80 A/m e um gradiente (em uma determinada direção no espaço) da força de campo do campo de seleção magnética 211 totalizando $160 \cdot 10^3$ A/m², a primeira sub-zona 301 na qual a magnetização das partículas 100 não é saturada tem dimensões de aproximadamente 1 mm (na determinada direção no espaço).

Quando um outro campo magnético - a seguir denominado um campo de acionamento magnético 221 - é sobreposto ao campo de seleção magnética 210 (ou campo magnético gradiente 210) na região de ação 300, a primeira sub-zona 301 é alterada em relação à segunda sub-zona 302 na direção deste campo de acionamento magnético 221; a extensão dessa alteração aumenta conforme a força do campo de acionamento magnético 221 aumenta. Quando o campo de acionamento magnético sobreposto 221 é variável no tempo, a posição da primeira sub-zona 301 varia proporcionalmente no tempo e no espaço. É vantajoso receber ou detectar sinais das partículas magnéticas 100 localizadas na primeira sub-zona 301 em outra banda de frequência (alterada para frequências mais elevadas) que não as variações da banda de frequência do campo de acionamento magnético 221. Isto é possível uma vez que as componentes de frequência de harmônicos mais elevados do campo de acionamento magnético 221 frequência ocorrem devido a uma alteração na magnetização das partículas magnéticas 100 na região de ação 300 como resultado da não linearidade das características de magnetização.

Para gerar esses campos de acionamento magnético 221 para qualquer determinada direção no espaço, são providos três outros pares de bobinas, a saber, um segundo par de bobinas 220', um terceiro par de bobinas 220'' e um quarto par de bobinas 220''' que juntos são denominados meios de

acionamento 220 a seguir. Por exemplo, o segundo par de bobinas 220' gera um componente do campo de acionamento magnético 221 que se estende na direção do eixo da bobina do primeiro par de bobinas 210', 210'' ou os meios de seleção 5 210, ou seja, por exemplo, verticalmente. Para tanto, os enrolamentos do segundo par de bobinas 220' são atravessados por correntes iguais na mesma direção. O efeito que pode ser alcançado por meio do segundo par de bobinas 220' também pode, a princípio, ser alcançado pela sobreposição de 10 correntes na mesma direção das correntes opostas iguais no primeiro par de bobinas 210', 210'', de modo que a corrente diminui em uma bobina e aumenta na outra bobina. No entanto, e especialmente com a finalidade de uma interpretação de sinal com uma maior razão entre sinal e ruído, isto pode ser 15 vantajoso quando o campo de seleção temporalmente constante (ou quase constante) 211 (também denominado campo magnético gradiente) e o campo vertical temporalmente variável de acionamento magnético são gerados por pares separados de bobinas dos meios de seleção 210 e dos meios de acionamento 20 220.

Os outros dois pares de bobinas 220'', 220''' são providos para gerar componentes do campo de acionamento magnético 221 que se estendem em uma direção diferente no espaço, por exemplo, horizontalmente, na direção longitudinal 25 da região de ação 300 (ou do paciente 350) e em uma direção perpendicular a ela. Se o terceiro e quarto pares de bobinas 220'', 220''' do tipo Helmholtz (como os pares de bobinas para os meios de seleção 210 e para os meios de acionamento 220) foram utilizados para este fim, esses pares de bobinas 30 precisariam ser dispostos à esquerda e à direita da região de tratamento ou na frente e atrás desta região, respectivamente. Isto afetaria a acessibilidade da região de ação 300 ou da região de tratamento 300. Portanto, o terceiro

e/ou quarto pares de bobinas magnéticas ou bobinas 220'', 220''' também são dispostos acima e abaixo da região de ação 300 e, portanto, sua configuração de enrolamento deve ser diferente daquela do segundo par de bobinas 220'. As bobinas 5 deste tipo, no entanto, são conhecidas na área de equipamentos de ressonância magnética com ímãs abertos (ressonância magnética aberta) nos quais um par de bobinas de frequência de rádio (RF) está localizado acima e abaixo da região de tratamento, sendo o dito par de bobinas de RF capaz 10 de gerar um campo magnético horizontal temporalmente variável. Portanto, a construção dessas bobinas não precisa ser melhor detalhada aqui.

A configuração 10 de acordo com a presente invenção compreende ainda meios de recepção 230 que são somente 15 mostrados esquematicamente na Figura 1. Os meios de recepção 230 geralmente compreendem bobinas que são capazes de detectar os sinais induzidos pelo padrão de magnetização das partículas magnéticas 100 na região de ação 300. As bobinas 20 deste tipo, no entanto, são conhecidas na área de equipamentos de ressonância magnética nos quais, por exemplo, um par de bobinas de frequência de rádio (RF) está localizado em torno da região de ação 300 para ter uma razão entre sinal e ruído mais alta possível. Portanto, a construção dessas bobinas não precisa ser melhor detalhada aqui.

25 Em uma realização alternativa dos meios de seleção 210 mostrados na Figura 1, ímãs permanentes (não mostrados) podem ser utilizados para gerar o campo de seleção magnética gradiente 211. No espaço entre dois pólos desses ímãs permanentes (opostos) (não mostrados), é formado um campo 30 magnético similar àquele da Figura 2, ou seja, quando os pólos opostos têm a mesma polaridade. Em outra realização alternativa da configuração de acordo com a presente invenção, os meios de seleção 210 compreendem pelo menos um

ímã permanente ou pelo menos uma bobina 210', 210'' conforme ilustrado na Figura 2.

As faixas de frequência geralmente utilizadas para ou nos diferentes componentes dos meios de seleção 210, dos
5 meios de acionamento 220 e dos meios de recepção 230 são basicamente as seguintes: o campo magnético gerado pelos meios de seleção 210 não varia no tempo ou a variação é comparavelmente lenta, preferencialmente entre aproximadamente 1 Hz e aproximadamente 100 Hz. O campo
10 magnético gerado pelos meios de acionamento 220 varia preferencialmente entre aproximadamente 25 kHz e aproximadamente 100 kHz. As faixas de campo magnético às quais os meios de recepção devem ser supostamente sensíveis estão preferencialmente em uma faixa de frequência de
15 ~~aproximadamente 50-kHz até aproximadamente 10 MHz.~~

As Figuras 4a e 4b mostram a característica de magnetização, ou seja, a variação da magnetização M de uma
~~partícula 100 (não-mostrada nas Figuras-4a e 4b) em função-da-~~
força de campo H no local daquela partícula 100, em uma
20 dispersão com essas partículas. Parece que a magnetização M não se altera mais além da força de campo $+H_c$ e abaixo de uma força de campo $-H_c$, o que significa que uma magnetização saturada é atingida. A magnetização M não é saturada entre os valores $+H_c$ e $-H_c$.

25 A Figura 4a ilustra o efeito de um campo magnético senoidal $H(t)$ no local da partícula 100 onde os valores absolutos do campo magnético senoidal $H(t)$ resultante (ou seja, "visto pela partícula 100") são menores que a força de campo magnético necessária para saturar magneticamente a
30 partícula 100, ou seja, no caso em que nenhum outro campo magnético está ativo. A magnetização da partícula 100 ou das partículas 100 para esta condição comutam entre seus valores de saturação no ritmo da frequência do campo magnético $H(t)$.

A variação resultante no tempo da magnetização é denotada pela referência $M(t)$ no lado direito da Figura 4a. Parece que a magnetização também muda periodicamente e que a magnetização dessa partícula é periodicamente invertida.

5 A parte pontilhada da linha no centro da curva denota a variação média aproximada da magnetização $M(t)$ em função da força de campo do campo magnético senoidal $H(t)$. Como um desvio desta linha central, a magnetização se estende discretamente para a direita quando o campo magnético H aumenta de $-H_c$ para $+H_c$ e discretamente para a esquerda quando o campo magnético H diminuiu de $+H_c$ para $-H_c$. Esse efeito conhecido é denominado efeito de histerese que é a base de um mecanismo para a geração de calor. A área de superfície de histerese que é formada entre os caminhos da
10 curva e cujo formato e tamanho dependem do material, é uma medida para a geração de calor mediante a variação da magnetização.

— — — A Figura 4b mostra o efeito de um campo magnético senoidal $H(t)$ sobre o qual um campo magnético estático H_1 é
20 sobreposto. Uma vez que a magnetização está no estado saturado, esta é praticamente não influenciada pelo campo magnético senoidal $H(t)$. A magnetização $M(t)$ permanece constante no tempo nesta área. Consequentemente, o campo magnético $H(t)$ não provoca uma alteração do estado da
25 magnetização.

A Figura 5 mostra um diagrama de blocos do equipamento 10 mostrado na Figura 1. O par de bobinas 210', 210'' é mostrado esquematicamente na Figura 5 e tem a referência 210 para fins de clareza. O par de bobinas
30 (primeiros meios magnéticos) 210 é alimentando com uma corrente DC a partir de uma fonte de corrente controlável 32, sendo a dita fonte de corrente controlada por uma unidade de controle 76. A unidade de controle 76 é conectada a um

computador 12 que está acoplado a um monitor 13 para exibir a distribuição de partículas magnéticas na área de avaliação e uma unidade de entrada 14, por exemplo, um teclado 14.

Os pares de bobinas (segundos meios magnéticos) 220', 220'', 220''' são conectados para amplificadores de corrente 41, 51, 61, a partir dos quais eles recebem suas correntes. Os amplificadores de corrente 41, 51, 61 são, por sua vez, em cada caso conectados a uma fonte de corrente AC 42, 52, 62 que define o curso temporal das correntes I_x , I_y , I_z a serem amplificadas. As fontes de corrente AC 42, 52, 62 são controladas pela unidade de controle 76.

A bobina receptora (meios de recepção) 230 também é mostrada esquematicamente na Figura 5. Os sinais induzidos na bobina receptora 230 são alimentados a uma unidade de filtro 71, por meio do qual os sinais são filtrados. O objetivo desta filtração é separar valores medidos, que são gerados pela magnetização na área de avaliação que é influenciada pela alteração na posição das duas regiões parciais (301, 302) a partir de outros sinais interferentes. Para tanto, a unidade de filtro 71 pode ser projetada, por exemplo, de modo que os sinais que possuem frequências temporais menores que as frequências temporais com as quais os pares de bobinas 220', 220'', 220''' são operados, ou menores que duas vezes essas frequências temporais, não passem na unidade de filtro 71. Os sinais são então transmitidos por uma unidade amplificadora 72 para um conversor analógico/digital 73 (ADC). Os sinais digitalizados produzidos pelo conversor analógico/digital 73 são alimentados a uma unidade de processamento de imagem (também denominada meio de reconstrução) 74, que reconstrói a distribuição espacial das partículas magnéticas a partir desses sinais e da respectiva posição que a primeira região parcial 301 do primeiro campo magnético na área de avaliação assumida durante o recebimento

do respectivo sinal e que a unidade de processamento de imagem 74 obtém a partir da unidade de controle 76. A distribuição espacial reconstruída das partículas magnéticas é finalmente transmitida por meio da unidade de controle 76 do computador 12, que a exibe no monitor 13.

O equipamento compreende também meios de armazenamento 75, por exemplo, um disco rígido ou uma memória semicondutora, acoplado à unidade de processamento de imagem 74 para armazenar os sinais de detecção adquiridos e os dados de função de sistema do equipamento 10. Os meios de armazenamento 75 são providos para armazenar um subconjunto de dados de função de sistema da função de sistema da configuração. Os meios de reconstrução 74 (unidade de processamento de imagem 74) são providos para reconstruir a distribuição espacial do material magnético 100 na região de ação 300 a partir dos sinais de detecção e do subconjunto armazenado dos dados de função de sistema, utilizando conhecimento adicional sobre a estrutura da função de sistema.

Conforme explicado acima, a MPI aplica um novo método de codificação de sinal com base no deslocamento dinâmico de um processo de excitação localizado e permite a rápida geração de imagem volumétrica. No entanto, ao contrário das modalidades consagradas de geração de imagem como a ressonância magnética (RM) e a tomografia computadorizada (TC), nenhuma transformada matemática simples ainda foi identificada para reconstruir imagens a partir dos dados adquiridos. Portanto, reconstrução de imagem MPI exige o conhecimento de uma "função de sistema" que descreve uma resposta do sistema a uma determinada distribuição espacial de partículas, ou seja, o mapeamento da posição de partícula para resposta de frequência. Para solucionar o problema de reconstrução, a função de sistema deve ser invertida,

geralmente exigindo algum esquema de regularização.

Até o momento, a função de sistema é determinada experimentalmente medindo-se a resposta de magnetização de uma amostra do tipo de ponto em um número maior de posições
5 espaciais correspondentes ao número de pixels ou voxels da imagem. Esse procedimento de calibração exige longuíssimos tempos de aquisição e, além disso, provê uma função de sistema que é contaminada com ruído. Devido ao grande tamanho da matriz de função de sistema, a resolução do problema de
10 reconstrução inversa também consome um tempo razoável e requer grandes quantidades de memória de computador.

A partir da compreensão teórica do processo de codificação de sinal, espera-se conhecer a estrutura da função de sistema. Esse conhecimento pode ser utilizado para
15 acelerar a aquisição de função de sistema ou mesmo simular partes ou toda a função de sistema. Informações sobre a estrutura de matriz podem ainda ajudar a descobrir representações de função de sistema mais compactas, ajudando a reduzir as exigências de memória e acelerar a reconstrução.
20 Por fim, a identificação de uma transformada matemática que leva dos dados para a imagem simplificaria muito o processo de reconstrução.

A seguir, será descrita a geração de sinal. O princípio básico da geração de sinal em MPI se fundamenta na
25 resposta de magnetização $M(H)$ não linear de partículas ferromagnéticas a um campo magnético H aplicado. Um campo de acionamento $H_D(t)$ oscilante de amplitude suficiente leva a uma resposta de magnetização $M(t)$ das partículas, que possui um espectro diferente harmônicos mais elevados que o campo de
30 acionamento. Se, por exemplo, um campo de acionamento harmônico for utilizado, o espectro do campo de acionamento somente contém a frequência de base, ao passo que a resposta de partícula também contém múltiplos da frequência de base.

As informações contidas nesses harmônicos mais elevados é utilizada para a MPI. Experimentalmente, a alteração dependente do tempo na magnetização de partícula é medida por meio da tensão induzida na bobinas de recepção. Assumindo uma
 5 única bobina de recepção com sensibilidade $S_r(r)$; a alteração da magnetização induz uma tensão

$$V(t) = -\mu_0 \frac{d}{dt} \int_{\text{object}} S_r(r) \cdot M(r, t) d^3r \quad (1)$$

de acordo com a lei de Faraday. μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo. A sensibilidade da bobina
 10 de recepção $S_r(r) = H_r(r)/I_0$ deriva do campo $H_r(r)$ que a bobina produziria se acionada com uma corrente unitária I_0 . A seguir, a sensibilidade da bobina de recepção é aproximada para ser homogênea na região de interesse, ou seja, $S_r(r)$ é constante.- Se $M_x(r, t)$ for a componente de magnetização
 15 capturada pela bobina de recepção na direção x, o sinal detectado pode ser escrito como

$$V(t) \propto -\frac{d}{dt} \int_{\text{object}} M_x(r, t) d^3r. \quad (2)$$

Agora, considere o sinal $s(r, t)$ gerado por uma distribuição de partículas do tipo de ponto. A integração de
 20 volume pode ser removida e a magnetização de partícula $M_x(r, t)$ é determinada pelo campo local $H(r, t)$. Para o momento, assume-se que o campo tem somente uma componente espacial $H_x(r, t)$, que está apontando na direção da bobina de recepção. O sinal (mostrado na Figura 6a) pode ser então
 25 escrito como

$$\begin{aligned} s(r, t) &= -\frac{d}{dt} M(r, t) = -\frac{d}{dt} M(H(r, t)) \\ &= -\frac{\partial M}{\partial H} \frac{dH(r, t)}{dt} = -M'(H) \frac{dH(r, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

Uma vez que esta equação é válida para todas as

orientações onde o campo está alinhado com a direção da componente de magnetização adquirida, o subscrito x foi omitido. A equação 3 demonstra que altos sinais resultam da combinação de uma curva de magnetização acentuada com rápidas variações de campo. A expansão de Fourier do sinal periódico $s(t)$ gerado por meio da aplicação de um campo de acionamento homogêneo $H(r,t) = H_D(t)$ resulta no espectro de sinal S_n , conforme mostrado na Figura 6b. A intensidade e o peso dos harmônicos mais elevados no espectro estão relacionados ao formato da curva de magnetização $M(H)$ e ao formato de onda e amplitude do campo de acionamento $H_D(t)$. Para ilustrar sua influência sobre o espectro, diversos casos representativos são mostrados na Figura 7.

A função de etapa se refere a uma resposta de partícula imediata e cria um espectro que é rico em harmônicos elevados. As componentes espectrais têm magnitude constante em múltiplos ímpares da frequência de acionamento. Até mesmo harmônicos estão faltando devido ao padrão do tipo seno do sinal de tempo $s(t)$. A função de etapa corresponde a uma resposta de partícula ideal e representa o caso limitante para o peso alcançável de harmônicos mais elevados. Para esta curva de magnetização, campos de acionamento em triângulo e seno proporcionam o mesmo resultado.

Se a resposta de partícula ao campo de acionamento for desacelerada pela introdução de uma faixa linear na curva de magnetização, o peso relativo de harmônicos mais elevados é reduzido. Assim, o campo de acionamento harmônico se desempenha melhor que a excitação triangular, uma vez que ele realiza o escaneamento mais rápido na faixa linear.

A última fileira na Figura 7 mostra uma magnetização de partícula mais realística conforme determinada pela função de Langevin

$$M(\xi) = M_0 (\coth \xi - 1/\xi), \quad (4)$$

onde ξ é a razão entre energia magnética de uma partícula com momento magnético m em um campo externo H , e energia térmica:

$$\xi = \frac{mH}{kT}. \quad (5)$$

5

Um maior momento magnético resulta em uma curva de magnetização mais acentuada e cria mais harmônicos mais elevados para uma determinada amplitude de campo de acionamento. Alternativamente, harmônicos elevados podem ser gerados a partir de uma curva rasa utilizando variações de campo mais rápidas, por exemplo, induzidas pela maior amplitude de campo de acionamento. Deve ser observado que a MPI utiliza partículas ferromagnéticas para obter uma curva de magnetização suficientemente acentuada. Para baixas concentrações, no entanto, suas interações mútuas podem ser desprezadas e elas podem ser tratadas como um gás de partículas paramagnéticas com momento magnético extremamene grande, um fenômeno também conhecido como "superparamagnetismo".

20

A seguir, será descrita a codificação espacial 1D. Para codificar informações espaciais no sinal, um campo de gradiente magnético estático $H_s(r)$, também denominado campo de seleção, é introduzido. Para a codificação 1D, o campo de seleção possui um gradiente diferente de zero somente na direção x , $G_x = dH_s/dx$. Se o gradiente for diferente de zero em todo o FOV, o campo de seleção pode ser somente zero em um único ponto, o "ponto livre de campo". Em regiões distantes do FFP, a magnetização de partícula é acionada em saturação pelo campo de seleção.

30

A aplicação de um campo de acionamento $H_p(t)$ espacialmente homogêneo e temporalmente periódico além do

campo de seleção $H_s(r)$ corresponde a um deslocamento periódico do FFP ao longo da direção do gradiente. As partículas experimentam um campo local

$$H(x, t) = H_s(x) - H_D(t). \quad (6)$$

O sinal de menos foi escolhido para fazer cálculos posteriores mais convenientes. Uma vez que o FFP realiza o escaneamento sobre cada posição espacial x em um diferente ponto no tempo, cada posição pode ser identificada por sua resposta espectral característica.

A seguir, serão descritos detalhes do campo de acionamento harmônico e de partículas ideais. A Figura 8 mostra espectros em três diferentes posições espaciais gerados por partículas ideais expostas a um campo de seleção H_s de força de gradiente constante G e um campo de acionamento harmônico H_D de frequência ω_0 e amplitude A . Para o enésimo harmônico, correspondente à enésima componente de uma expansão de série de Fourier, descobre-se a seguinte dependência da posição da partícula x :

$$\begin{aligned} S_n^{\text{ideal}}(x) &= -\frac{4M_0}{T} i \sin\left(n \arccos \frac{Gx}{A}\right) \\ &= -\frac{4M_0}{T} i U_{n-1}(Gx/A) \sqrt{1 - (Gx/A)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

onde $U_n(x)$ representa polinomiais de Chebyshev do segundo tipo. As funções são definidas na faixa $-A/G < x < A/G$. Um campo de acionamento cosseno tem sido utilizado em vez do campo de acionamento seno para chegar a uma expressão mais simples. A dependência espacial para os primeiros harmônicos é ilustrada na parte esquerda da Figura 9. Descobre-se um número crescente de oscilações com o aumento das componentes de frequência n . Isto se refere ao fato de que os polinomiais de Chebyshev formam uma configuração de base ortogonal completa, de modo que qualquer distribuição de

partícula $C(x)$ pode ser expandida nessas funções. As componentes de frequência sucessivas possuem paridade espacial alternante com relação ao centro do FOV (par/ímpar).

A $S_n(x)$ pode ser vista como um mapa de sensibilidade, que descreve o perfil de sensibilidade espacial de cada componente de frequência n . Em um experimento de MPI, a distribuição de partícula $C(x)$ gera componentes de sinal espectral

$$V_n = \int_{\text{FOV}} S_n(x) C(x) dx, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Assim, a $S_n(x)$ representa a função de sistema. A função de sistema não somente descreve a dependência de sinal espacial, mas também contém informações sobre a curva de magnetização das partículas e dos parâmetros do sistema (por exemplo, amplitude de campo de acionamento A e frequência $\omega_0 = 2\pi/T$, gradiente de campo de seleção G).

Utilizando a equação (7), as componentes de sinal espectral (equação (8)) para partículas ideais podem ser escritas como

$$V_n = -\frac{4M_0}{T} i \int_{-A/G}^{A/G} C(x) U_{n-1}(Gx/A) \sqrt{1 - (Gx/A)^2} dx. \quad (9)$$

Nesta notação, V_n corresponde aos coeficientes de uma série de Chebyshev. Portanto, a concentração de partícula pode ser reconstruída realizando-se a transformada de Chebyshev do V_n medido, ou seja, avaliando-se a série de Chebyshev

$$C(x) = \frac{2}{\pi} \frac{G}{A} \frac{T_1}{4M_0} \sum_{n=1}^{\infty} U_{n-1}(Gx/A) V_n. \quad (10)$$

Portanto, para partículas ideais sob a influência de um campo de acionamento harmônico e um gradiente constante de campo de seleção, a reconstrução da distribuição espacial

de partícula simplesmente corresponde ao cálculo da soma sobre os harmônicos medidos V_n ponderados com polinomiais de Chebyshev do segundo tipo. Em termos da função de sistema $S_n^{\text{ideal}}(x)$, a concentração de partícula pode ser escrita como

$$C(x) = -\frac{2G}{\pi A} \left(\frac{T}{4M_0} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{1 - (Gx/A)^2}} \sum_{n=1}^{\infty} S_n^{\text{ideal}}(x) V_n. \quad (11)$$

A seguir, serão descritos os detalhes do campo de acionamento harmônico e de partículas de Langevin. Para partículas mais realísticas, a função de sistema é determinada por uma convolução espacial entre a derivada da curva de magnetização, $M'(H_s)$, e as componentes de Chebyshev:

$$S_n(x) = \frac{1}{2M_0} M'(Gx) * S_n^{\text{ideal}}(x). \quad (12)$$

Dependendo do grau de acentuação da $M(H)$, a $S_n(x)$ será uma versão desfocada da $S_n^{\text{ideal}}(x)$, estendendo-se discretamente além do intervalo que é abrangido pelo movimento FFP e aos quais as $S_n^{\text{ideal}}(x)$ estão confinadas. Assim, as partículas que estão localizadas discretamente fora da faixa acessada pelo FFP também geram sinal. A parte direita da Figura 9 mostra componentes da função de sistema para partículas que seguem a curva de magnetização de Langevin em um gradiente constante de campo de seleção.

No processo de medição de acordo com a equação (8), o FOV refere-se agora à faixa onde as $S_n(x)$ são diferentes de zero. Uma curva de magnetização suficientemente acentuada pode prover confinamento a uma região não muito maior que a faixa coberta pelo FFP, ou seja, $-A/G < x < A/G$.

Uma vez que as componentes de função de sistema não podem ser mais nítidas que o núcleo de convolução, um experimento MPI com partículas de Langevin será realizado em um limite de resolução correlacionado com a largura de $M'(x)$.

No entanto, se a curva de magnetização for conhecida, a deconvolução do núcleo $M'(x)$ a partir da imagem pode ser utilizada para recuperar a resolução total. Uma vez que a derivada da curva de magnetização é uma função simétrica

5 $M'(x) = M'(-x)$, pode-se utilizar a equação (12) para demonstrar que

$$\begin{aligned}
 V_n &= \int_{\text{FOV}} S_n(x) C(x) dx \\
 &= \frac{1}{2M_0} \int_{\text{FOV}} [M'(Gx) * S_n^{\text{ideal}}(x)] C(x) dx \\
 &= \frac{1}{2M_0} \int_{\text{FOV}} \left[\int_{-A/G}^{A/G} M'(G(x-\tilde{x})) S_n^{\text{ideal}}(\tilde{x}) d\tilde{x} \right] C(x) dx \\
 &= \frac{1}{2M_0} \int_{-A/G}^{A/G} S_n^{\text{ideal}}(\tilde{x}) \left[\int_{\text{FOV}} M'(G(\tilde{x}-x)) C(x) dx \right] d\tilde{x} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$= \int_{-A/G}^{A/G} S_n^{\text{ideal}}(x) \tilde{C}(x) dx, \quad (14)$$

onde $\tilde{C}(x)$ corresponde à expressão entre colchetes na equação (13). Uma vez que a equação (14) corresponde à

10 equação (9), a reconstrução do campo de acionamento harmônico é determinada pela equação (11), ou seja,

$$\tilde{C}(x) = -\frac{2G}{\pi A} \left(\frac{T}{4M_0} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{1-(Gx/A)^2}} \sum_{n=1}^{\infty} S_n^{\text{ideal}}(x) V_n. \quad (15)$$

Isso significa que, no intervalo onde a função de

15 sistema de partícula ideal $S_n^{\text{ideal}}(x)$ é definida, ou seja, $-A/G < x < A/G$, $\tilde{C}(x)$ pode ser diretamente reconstruído. Se a concentração de partícula $C(x)$ estiver confinada ao FOV, $\tilde{C}(x)$ é simplesmente a convolução de $C(x)$ com $M'(x)$:

$$\tilde{C}(x) = \frac{1}{2M_0} [M'(x) * C(x)].$$

Assim, a distribuição de concentração $C(x)$ exata pode ser então derivada pela deconvolução do núcleo $M'(x)$ a partir de $\tilde{C}(x)$. No entanto, conforme discutido acima, a reconstrução utilizando a equação (15) somente resulta em

5 $\tilde{C}(x)$ no intervalo $-A/G < x < A/G$ que é coberto pelo movimento de FFP. Se a concentração de partícula exceder essa faixa, a deconvolução exige o conhecimento adicional sobre a concentração além dos limites da faixa de FFP.

Por outro lado, a deconvolução não é obrigatória.

10 Contanto que a curva de magnetização de partícula $M(H)$ seja suficientemente acentuada, a distribuição de concentração modificada $\tilde{C}(x)$ já pode atender às exigências de resolução de muitas aplicações.

Serão explicados a seguir os detalhes de um campo

15 de acionamento triangular. Um caso ilustrativo é o uso de um campo de acionamento triangular em vez do campo harmônico. A função de sistema para partículas ideais tem então a forma

$$S_n^{\text{ideal}}(x) = -\frac{4M_0}{T} i \sin\left(n \frac{\pi G}{2A} x\right), \quad (17)$$

para um movimento de FFP que abrange a faixa $0 < x$

20 $< 2A/G$. Agora, em vez da série de Chebyshev, uma série de Fourier pode ser utilizada para reconstruir uma concentração de partícula:

$$C(x) = \frac{G}{A} \frac{T_i}{4M_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(n \frac{\pi G}{2A} x\right) V_n. \quad (18)$$

As componentes de frequência V_n medidos são

25 proporcionais às componentes $\tilde{C}(k)$ no espaço k , que estão relacionadas à distribuição espacial $C(x)$ por transformação de Fourier. Em termos da função de sistema, a equação (18) se torna

$$C(x) = -\frac{G}{A} \left(\frac{T}{4M_0} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} S_n^{\text{ideal}}(x) V_n. \quad (19)$$

Para partículas realísticas, a função de sistema deve ser convoluída com $M'(H_g)$. Uma vez que as equações (12-14) derivadas para a excitação do campo de acionamento harmônico também são válidas para a função de sistema triangular, uma concentração $\tilde{C}(x)$ modificada/convoluída pode ser reconstruída na faixa $0 < x < 2A/G$.

A seguir, será explicada uma formulação de matriz. Para a reconstrução de imagem MPI, a distribuição espacial contínua de partículas será mapeada até um grau, onde cada local de grau representa uma pequena região espacial. Além disso, somente um número n limitado de componentes de frequência é registrado. Se as posições espaciais forem indexadas com m , distcomp(computação distribuída) se torna

$$V_n = \sum_m S_{nm} C_m, \quad (20)$$

ou, em formulação de vetor/matriz,

$$v = Sc. \quad (21)$$

O cálculo do vetor de concentração então corresponde basicamente a uma inversão da matriz S :

$$c = S^{-1}v. \quad (22)$$

Essa notação também será utilizada para imagens em 2D ou 3D, o que exige o colapso de índices espaciais no índice único m . Assim, a concentração é sempre um vetor, independente da dimensão espacial.

Voltando ao caso de 1D para um campo de acionamento harmônico, a introdução de um escalar

$$\alpha = -\frac{2G}{\pi A} \left(\frac{T}{4M_0} \right)^2 \quad (23)$$

e uma matriz diagonal

$$\beta_{mm} = \frac{1}{\sqrt{1 - (Gx_m/A)^2}}, \quad \beta_{nm} = 0 \text{ for } n \neq m, \quad (24)$$

permite a derivação da seguinte identidade
5 comparando-se a equação (22) com a equação (11):

$$S^{-1} = \alpha \beta S^T. \quad (25)$$

Assim, no caso de imagens em 1D de partículas
ideais, a matriz inversa pode ser simplesmente obtida pela
multiplicação da inversão por um escalar e uma matriz
10 diagonal.

O uso de somente um número limitado de componentes
de frequência corresponde ao trabalho com uma série truncada
de Chebyshev. O teorema de truncação de Chebyshev afirma
então que o erro na aproximação da distribuição real de
15 concentração é limitada pela soma dos valores absolutos dos
coeficientes desprezados. De forma mais importante, para
distribuições razoavelmente suaves, o erro está na ordem do
último coeficiente de Chebyshev retido.

A seguir, será descrita a codificação espacial 2D e
20 3D.

Primeiro, um campo de acionamento 1D é descrito.
Uma primeira etapa para a descrição de imagens em 2D e 3D é
observar a função 3D de sistema de partículas em um campo de
seleção 3D $H_s(r)$ combinadas com um campo de acionamento 1D
25 $H_p(t)$. Utilizando um campo de acionamento harmônico e
escolhendo uma configuração de bobina Maxwell para criar um
campo de seleção, o campo total pode ser aproximado por

$$H(r, t) = H_S(r) - H_D(t) = \begin{pmatrix} Gx \\ Gy \\ 2Gz \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A \cos \omega t \end{pmatrix}. \quad (26)$$

A função de sistema pode ser escrita como uma convolução sobre a componente z do campo de seleção

$$S_n = -\frac{2i}{T} \frac{\partial M(H_S)}{\partial H_z} * \left[U_{n-1}(H_{Sz}/A) \sqrt{1 - (H_{Sz}/A)^2} \right]. \quad (27)$$

Neste vetor, cada componente se refere ao sinal induzido pela respectiva componente de magnetização x/y/z. A detecção desses componentes requer três (conjuntos de) bobinas de recepção ortogonais.

Para partículas ideais, a dependência espacial explícita se torna

$$S_n(r) = -\frac{2i}{T} \frac{M_0}{G} \left[\frac{1}{(x^2 + y^2 + 4z^2)^{3/2}} \begin{pmatrix} -xz \\ -yz \\ x^2 + y^2 \end{pmatrix} \right] * \left[U_{n-1}(2Gz/A) \sqrt{1 - (2Gz/A)^2} \right], \quad (28)$$

onde o asterisco denota convolução sobre a componente z, ou seja, a direção do movimento de FFP resultantes do campo de acionamento. Assim, uma expressão que descreve a dependência espacial 3D da respectiva componente de magnetização é convoluída na direção do campo de acionamento com o conjunto de funções 1D de Chebyshev.

O formato do núcleo de convolução é determinado por $\partial M / \partial H_z$, que descreve como a magnetização responde à alteração do campo de acionamento. Para partículas ideais, este é singular na origem. A Figura 10 mostra o plane xz do núcleo 3D para as componentes de sinal detectadas em direção x e z, $S_{n,x}(r)$ e $S_{n,z}(r)$, respectivamente. Ao longo da linha central na direção do campo de acionamento, o núcleo para a magnetização M_z corresponde à distribuição delta, assim como na situação 1D. Aumentando-se a distância a partir da linha central, o núcleo se amplia e sua amplitude diminui rapidamente. Para M_x , e por motivos de simetria também para

M_y , o núcleo é zero nos eixos de simetria. Possui alta amplitude próxima da singularidade na origem.

Para formar a função de sistema de partícula ideal 3D, o núcleo 3D é convoluído ao longo da direção do campo de acionamento com os polinomiais 1D de Chebyshev `1ddrive3dsysfunc`.

A Figura 11 mostra fatias centrais 2D extraídas de harmônicos selecionados para o caso acima de movimento de campo de acionamento 1D na direção z . Diretamente na linha abrangida pela trajetória de FFP, a função de sistema é determinada por polinomiais de Chebyshev e, portanto, podem codificar uma distribuição de partícula arbitrária, conforme discutido para a situação 1D. Aumentando-se a distância até a linha central, o núcleo de convolução tem um crescente efeito de perda de definição, de modo que estruturas mais finas dos polinomiais de Chebyshev mais elevados passam a ter média zero. Portanto, o sinal em componentes mais elevados de função de sistema se condensa na linha da trajetória de FFP (de acordo com a Figura 11, harmônico 12 e 25), onde o efeito de perda de definição é baixo. Isto pode ser explicado pelo fato de que somente na vizinhança próxima do FFP, a alteração de campo é rápida o suficiente para estimular uma resposta de partícula que gera componentes de alta frequência.

Em um experimento MPI, isto pode ser útil para explorar simetrias na função de sistema para parcialmente sintetizar a função de sistema e, dessa forma, acelerar sua aquisição e reduzir as exigências de memória. A partir da resposta 3D até o movimento de FFP em 1D, duas regras básicas podem ser derivadas para a paridade da função de sistema na direção espacial indexada com $is\{x,y,z\}$.

1. A paridade de "base" é determinada pela paridade do núcleo de convolução mostrado na Figura 10. É par se a

direção de recepção $j\epsilon\{x,y,z\}$ estiver alinhada com a direção de acionamento $k\epsilon\{x,y,z\}$. Isto corresponde à componente de magnetização derivada $\partial M_j / \partial H_k$ para $j = k$. Caso contrário, a paridade do núcleo é ímpar:

$$p_{\text{kernel}} = \begin{cases} 1, & j = k \\ -1, & j \neq k. \end{cases} \quad (29)$$

2. Se a direção espacial de interesse estiver em uma direção do campo de acionamento, ou seja, $i = k$, então a paridade se alterna entre harmônicos h sucessivos daquela componente de campo de acionamento:

$$p_{\text{Cheb}} = \begin{cases} (-1)^{(h+1)}, & i = k \\ 1, & i \neq k. \end{cases} \quad (30)$$

O motivo é a paridade alternante dos polinomiais de Chebyshev na função 1D de sistema.

A paridade observada para harmônico h em uma direção espacial i é então $p_{i,j,k,h} = p_{\text{Cheb}} \cdot p_{\text{kernel}}$.

Agora, será descrito um campo de acionamento 2D-e 3D. A partir da Figura 11, fica claro que a codificação espacial em toda a extensão do FOV não pode ser realizada utilizando um movimento de FFP em 1D. Assim, para a codificação espacial 2D ou 3D, um campo de acionamento deve ser adicionado para cada direção espacial a ser codificada. Para uma implementação simples, pode-se escolher campos harmônicos de acionamento com discretas diferenças de frequência nas diferentes direções espaciais, realizando o movimento de FFP para seguir um padrão 2D ou 3D de Lissajous. Ainda, a Figura 11 demonstrou que a alta resolução é somente obtida na vizinhança próxima da linha de trajetória de FFP. Assim, o padrão de Lissajous deve ser suficientemente denso para atingir uma resolução homogênea.

A Figura 12 mostra um padrão 2D de Lissajous gerado pela sobreposição de dois campos de acionamento harmônicos

ortogonais com razão de frequência $\omega_x/\omega_z = 24/25$:

$$H_D(t) = \begin{pmatrix} A_x \cos \omega_x t \\ 0 \\ A_z \cos \omega_z t \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Utilizando um campo de seleção 3D de acordo com 1Ddrive, o gradiente de campo de seleção duplicado na direção z exige que $A_z = 2A_x$ abranja um FOV quadrático com o movimento de FFP. A Figura 12 mostra as primeiras componentes de uma função 2D de sistema simulada para partículas ideais expostas à sobreposição do campo de acionamento de 2D Lissajous e do campo de seleção 3D. Cada direção de recepção possui seu próprio conjunto de funções de sistema, denotados por 'recepção x' e 'recepção z'. As componentes correspondentes aos harmônicos mais elevados da respectiva frequência de acionamento são indicadas pelos quadros de linhas duplas. No canal x, possuem um espaçamento de 24 componentes. Na direção espacial x, se parecem muito com a série 1D de Chebyshev, ao passo que na direção z não mostram variação espacial. No canal z, os harmônicos da frequência de acionamento exibe um espaçamento de 25 componentes com um padrão espacial que é basicamente girado 90 graus com relação às componentes x.

Enquanto as componentes correspondentes aos harmônicos das frequências de campo de acionamento somente permitem a codificação 1D na respectiva direção do campo de acionamento, as componentes que surgem de uma combinação em ambas as frequências de acionamento permitem uma variação espacial em ambas as direções ao mesmo tempo. Por exemplo, o movimento para a esquerda a partir do primeiro harmônico de campo de acionamento x no canal x (componente 24) corresponde à mistura de frequências $m\omega_x + n(\omega_x - \omega_z)$ com o número inteiro crescente n e $m = 1$. Para um m maior, inicia-se em um harmônico mais elevado m. O movimento para a direita

corresponde a n negativo. Assim, harmônicos de campo de acionamento puros e sua vizinhança refere-se a baixas ordens de mistura, ao passo que a distância crescente acompanha n maior e ordens de mistura mais elevadas.

5 Deve ser observado que a componente de função de sistema observada para $m\omega_x + n(\omega_x - \omega_z)$ parece uma segunda vez na frequência $m\omega_x + n(\omega_x + \omega_z)$. Assim, cada componente correspondente às misturas de frequência aparece duas vezes. São exemplos as componentes 23 e 73 ($m = 1, n = 1$, quadros em
10 negrito) ou 47 e 97 ($m = 2, n = 1$, quadros pontilhados), porém também 26 e 74 ($m = 1, n = -2$, quadros pontilhados) no canal x .

A Figura 12 também ilustra as máximas intensidades (pesos) das componentes de função de sistema geradas. As
15 maiores intensidades são encontradas nos harmônicos mais elevados das frequências de acionamento, no entanto com uma redução em direção a frequências mais altas. As componentes correspondentes para a mistura de frequências possuem intensidade muito menor que os harmônicos puros.

20 Quanto maior a ordem de uma componente de função de sistema, mais fina será sua estrutura espacial. Este comportamento e os padrões espaciais gerais são muito parecidos com os polinomiais 2D de Chebyshev, que podem ser escritos como um produto tensorial dos polinomiais 1D para
25 cada direção: $U_n(x) \otimes U_m(z)$. A Figura 13 ilustra as primeiras componentes dessas funções. As funções 2D de Chebyshev satisfazem uma relação de ortogonalidade. Uma representação gráfica desta relação para as primeiras 256 componentes é mostrada na parte esquerda da Figura 14. O produto interno
30 entre as funções ortogonais acaba, de modo que somente o produto de uma função com ele mesmo é diferente de zero, levando à linha diagonal na Figura 14. Na parte direita, o

gráfico correspondente é mostrado para a função 2D de sistema de Lissajous de partícula ideal. Pontos e linhas brilhantes fora da diagonal indicam que algumas componentes de função de sistema não são ortogonais entre si. No entanto, regiões
 5 escuras prevalecem e é possível concluir que a maioria das componentes é ortogonal. Portanto, existe somente pequena redundância na função de sistema.

Para demonstrar isto, uma imagem fantasma (Figura 15, esquerda) é expandida em um número igual de componentes
 10 de função 2D de sistema de Chebyshev e de Lissajous, respectivamente. O número de componentes foi escolhido para igualar o número de pixels na imagem (64 x 64). A imagem obtida a partir da transformação de Chebyshev exibe resolução reduzida em comparação à imagem original. O motivo é que as
 15 ~~funções de Chebyshev proporcionam maior resolução nas bordas~~ do FOV, porém resolução reduzida no centro. Para manter a alta resolução no centro da imagem, as componentes de ~~Chebyshev mais elevadas precisariam ser incluídas na~~ expansão. A imagem obtida a partir das componentes de função
 20 de sistema foi reconstruída pela inversão da matriz de função de sistema utilizando mínima regularização para suprimir o ruído. Metade das componentes de função de sistema foi retirada da função x de sistema de recepção e a outra metade da função z (conforme mostrado na Figura 12). A resolução da
 25 imagem em melhor que a observada para a expansão de Chebyshev, porém a imagem possui pequenos artefatos que a fazem parecer menos homogênea. Considerando o fato de que algumas componentes de função de sistema não são ortogonais e, portanto, redundantes, a qualidade da imagem é
 30 relativamente boa. As reconstruções a partir somente das componentes x ou z mostram uma qualidade de imagem significativamente pior, indicando que estes subconjuntos não são suficientes para representar homogeneamente as

informações da imagem.

A codificação de sinal MPI pode prover uma função de sistema que forma um conjunto de base bem comportado capaz de representar informações de imagem de alta resolução.

5 Para a excitação harmônica 1D de partículas ideais, a função de sistema corresponde a uma series de polinomiais de Chebyshev do segundo tipo. Portanto, uma reconstrução rápida e exata é provida pela transformada de Chebyshev.

10 As propriedades de partículas realísticas são introduzidas na função de sistema por uma operação do tipo convolução, levando a uma perda de definição das componentes de alta resolução. Isto introduz um limite de resolução que é determinado pelo grau de acentuação da curva de magnetização de partícula. Enquanto em princípio, uma imagem de maior
15 resolução pode ser novamente obtida por deconvolução, a resolução provida por partículas realísticas sem deconvolução já é alta o suficiente para muitas aplicações práticas.

 A função de sistema para imagens em 2D é determinada pela trajetória feita pelo FFP e por um núcleo
20 que representa a região em torno do FFP que contribui para o sinal. O formato deste núcleo de FFP é determinado pela topologia do campo de seleção. O simples caso de gradientes de campo de seleção constantes em todas as direções espaciais foi demonstrado. Para partículas ideais, o núcleo possui
25 singularidades agudas que proporcionam alta resolução espacial. No entanto, as regiões em torno desses picos agudos também contribuem para o sinal. Isto é provavelmente o motivo para a observação de que, na codificação 2D utilizando um padrão 2D de Lissajous, a função de sistema não é exatamente
30 representada pelas funções 2D de Chebyshev. Portanto, a reconstrução não pode ser realizada utilizando a transformada de Chebyshev como acontece em 1D, porém requer a inversão da matriz de função de sistema. No entanto, fica evidente uma

íntima relação entre a função 2D de sistema de Lissajous e os polinomiais 2D de Chebyshev. Isto pode ser utilizado para a transformada da função de sistema em uma representação mais esparsa utilizando uma transformação de Chebyshev ou do tipo

5 cosseno, resultando em menores exigências de memória e reconstrução mais rápida.

A função 2D de sistema de Lissajous não forma um conjunto totalmente ortogonal, uma vez que contém componentes redundantes. No entanto, é capaz de codificar informações de

10 imagem com alta resolução conforme mostrado na Figura 10. Possíveis inconsistências entre o teor de dados das informações adquiridas e a resolução desejada em pixels podem ser mediadas utilizando-se esquemas de regularização na reconstrução.

15 Para acelerar a tediosa aquisição experimental da função de sistema, pode-se utilizar as regras de paridade derivadas para a função 2D de sistema. Na teoria, isto permite a construção da função de sistema completo a partir da medição de somente de um quadrante do retângulo da figura

20 de Lissajous. Para uma figura 3D de Lissajous, um octante seria suficiente, acelerando a aquisição de função de sistema a um fator de oito. Experimentalmente, a simetria pode ser afetada pelo alinhamento não perfeito das bobinas. No entanto, o conhecimento das funções teóricas básicas e de sua

25 paridade pode ajudar a modelar a função de sistema a partir de somente algumas amostras medidas.

Em um real experimento MPI, geralmente adquire-se muito mais componentes de frequência que o número desejado de pixels da imagem. Portanto, tem-se a liberdade de selecionar

30 os componentes de função de sistema para constituir um conjunto de base mais compacto que provê melhor ortogonalidade. Por exemplo, componentes em duplicata da função de sistema podem ser removidos após a aquisição para

se chegar a uma matriz de função de sistema menor para acelerar a reconstrução de imagem. Além disso, a seleção de harmônicos de acordo com seu peso pode ajudar a reduzir o tamanho da matriz. É também possível modificar o peso de determinados componentes para influenciar a resolução da imagem e a SNR.

Imagens em 2D de partículas realísticas não foram simuladas neste trabalho, porém, a partir dos desvios 1D, pode-se concluir que ocorrerá uma perda de definição do núcleo de FFP dependendo no grau de acentuação da curva de magnetização de partícula. Isto removeria as singularidades do núcleo, mas também resultaria em uma leve perda de resolução, conforme discutido no caso de 1D.

Imagens em 3D não foram mostradas, porém resultados em 2D podem ser diretamente extrapolados para 3D pela introdução de um campo de acionamento ortogonal adicional que permite trajetórias de FFP em 3D. Para uma trajetória 3D de Lissajous, a íntima semelhança da função de sistema a produtos de terceira ordem de polinomiais de Chebyshev pode ser esperada.

A topologia do campo de seleção e as trajetórias de FFP utilizadas neste trabalho foram escolhidas para sua simples viabilidade experimental. No entanto, muitas configurações alternativas de campo são possíveis. Para a trajetória de FFP, pode-se também utilizar padrões radiais ou espirais, ou padrões uniformes que são customizados para a anatomia a ser exibida na imagem. As trajetórias podem ser adaptadas para distribuir resolução variável na imagem. Para o campo de seleção, uma topologia que cria uma linha de campo livre em vez do FFP promete um escaneamento mais eficiente.

A descrição acima mostra que a codificação de sinal MPI utilizando campos de acionamento harmônicos em combinação com gradientes de campo de seleção constantes provê uma

função de sistema capaz de representar informações de imagem com alta resolução em vez da forma compacta. A íntima relação com polinômiais de Chebyshev do segundo tipo pode ser utilizada para acelerar a aquisição de função de sistema por meio de sua modelação parcial, ou para reduzir as exigências de memória por meio da aplicação customizada de transformações de esparsidade resultando em menores tempos de reconstrução.

As funções de sistema aqui exploradas estão ligadas por configurações de campo e trajetórias de escaneamento específicas. Muitas outras configurações são possíveis, provendo flexibilidade para customizar funções de sistema para atender a determinadas necessidades experimentais em termos de velocidade, resolução e sensibilidade.

Algumas configurações principais do método proposto de acordo com a presente invenção comparadas ao método conhecido serão agora ilustradas por simples diagramas de blocos que ilustram o respectivo uso da função de sistema (ou partes desta).

O método conhecido de reconstrução exige essencialmente as seguintes etapas (de acordo com a Figura 16, mostrando quais partes da função de sistema são exigidas/utilizadas):

1. Medir a "função de sistema" completa uma vez para uma determinada combinação de agente de contraste, geometria do scanner e trajetória:

a. Medir a resposta no tempo em todas as posições espaciais (pixels/voxels).

b. FFT do sinal de tempo para obter o espectro de frequência em cada posição.

c. Armazenar o resultado como matriz com componentes de frequência (fileiras) versus posições espaciais (colunas): "matriz de função de sistema", $G(f, x)$.

2. Medir o objeto de interesse:

a. Adquirir a resposta no tempo.

b. Armazenar a resposta transformada por Fourier:

"vetor de medição", $v(f)$.

5 3. Solucionar o problema inverso $G(f,x)c(x) = v(f)$ ou um problema regularizado relacionado para obter a distribuição de concentração: "vetor de imagem", $c(x)$.

A primeira realização de acordo com a presente invenção, que utiliza simetrias espaciais (de acordo com as
10 Figuras 17, 18), exige essencialmente as seguintes etapas para reconstrução:

1. Utilizar simetrias especulares óbvias (de acordo com a Figura 17)

a. Medir função de sistema reduzida em posições
15 selecionadas (por exemplo, um quadrante/octante ou posições intercaladas).

b. Gerar matriz de função de sistema completa por operações especulares.

c. Realizar a reconstrução padrão com matriz
20 completa.

2. Utilizar uma transformada de esparsidade ao longo das direções espaciais (de acordo com a Figura 18)

a. Medir a função de sistema em posições selecionadas para obter coeficientes para o conjunto de
25 função utilizado para expandir a distribuição espacial (por exemplo, coeficientes de Chebyshev).

b. Uma vez que a distribuição espacial pode ser aproximada por algumas componentes no espaço da transformada k , a função de sistema é representada por uma matriz esparsa
30 e, se a real resolução for menor que a resolução em voxel, a dimensão espacial do vetor é menor que no espaço real x .

c. Solucionar o problema inverso no espaço da transformada para obter $c(k)$.

d. Utilizar transformada inversa para obter a imagem $c(x)$.

A segunda realização de acordo com a presente invenção, que utiliza componentes redundantes de frequência (de acordo com a Figura 19), exige essencialmente as seguintes etapas para a reconstrução:

1. Utilizar a matriz de função de sistema completa ou espacialmente reduzida.

2. Identificar as componentes de frequência (fileiras) com padrão espacial idêntico (por exemplo, a partir de considerações teóricas).

3. Somar essas componentes na matriz de função de sistema e medir o vetor.

4. Inverter o problema reduzido para obter a imagem $c(x)$.

Embora a invenção tenha sido ilustrada e descrita em detalhe nos desenhos e na descrição acima, essa ilustração e descrição devem ser consideradas ilustrativas ou exemplares e não restritivas; a invenção não é limitada às configurações reveladas. Outras variações das configurações reveladas podem ser compreendidas e realizadas pelos técnicos no assunto ao colocarem em prática a invenção reivindicada, a partir de um estudo dos desenhos, da revelação e das reivindicações anexas.

Nas reivindicações, a palavra "compreendendo" não exclui outros elementos ou etapas, e o artigo indefinido "um" não exclui uma pluralidade. Um único elemento ou outra unidade pode atender às funções de vários itens mencionados nas reivindicações. O mero fato de que determinadas medidas são mencionadas em reivindicações dependentes mutuamente diferentes não indica que uma combinação destas medidas não pode ser utilizada com vantagem.

Um programa de computador pode ser

armazenado/distribuído em um meio adequado, por exemplo, um meio de armazenamento óptico ou um meio em estado sólido provido de ou como parte de outro hardware, porém também pode ser distribuído em outras formas, por exemplo, via Internet
5 ou por outros sistemas de telecomunicação com ou sem fio.

Quaisquer sinais de referência nas reivindicações não devem constituir limitação ao escopo.

REIVINDICAÇÕES

1. CONFIGURAÇÃO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, a configuração caracterizada por compreender:

5 - meios de seleção (210) para gerar um campo de seleção magnética (211), tendo um padrão no espaço de sua força de campo magnético, de modo que uma primeira sub-zona (301), tendo uma baixa força de campo magnético e uma segunda sub-zona (302), tendo uma maior força de campo magnético,
10 sejam formadas na região de ação (300),

 - meios de acionamento (220) para alterar a posição no espaço das duas sub-zonas (301, 302) na região de ação (300) por meio de um campo de acionamento magnético (221) de modo que a magnetização do material magnético (100) mude
15 localmente,

 - meios de recepção (230) para captar sinais de detecção, sendo que os sinais de detecção dependem da magnetização na região de ação (300), sendo a magnetização influenciada pela alteração na posição no espaço da primeira
20 e segunda sub-zonas (301, 302),

 - meios de armazenamento (75) para armazenar um subconjunto de dados de função de sistema da função de sistema da configuração, a dita função de sistema compreendendo um conjunto de dados de função de sistema que
25 descreve a relação entre a posição espacial do material magnético e a resposta do sistema para a dita configuração e a trajetória ao longo da qual a dita primeira sub-zona (301) é movimentada para a aquisição dos ditos dados de função de sistema, e

30 - meios de reconstrução (74) para reconstruir a distribuição espacial do material magnético (100) na região de ação (300) a partir dos sinais de detecção e do subconjunto armazenado dos dados de função de sistema,

utilizando conhecimento adicional sobre a estrutura da função de sistema, em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para gerar uma representação reduzida da função de sistema por meio da aplicação de uma transformada do tipo

5 Chebyshev ou cosseno ao longo da dimensão espacial e da resolução do problema de reconstrução muito mais esparsa que surge após a transformada.

2. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada em que os ditos meios de recepção (230) são

10 adaptados para captar somente o dito subconjunto dos dados de função de sistema da função de sistema da configuração por meio da detecção de sinais enquanto uma sonda do dito material magnético é subsequentemente colocada em diversas posições diferentes na dita região de ação (300).

15 3. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 2, caracterizada em que as ditas diversas posições estão localizadas em um quadrante ou em um octante da dita região de ação (300).

4. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 2,

20 caracterizada em que as ditas diversas posições são distribuídas de forma intercalada na região de ação (300).

5. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para primeiro reconstruir a função de sistema

25 completo a partir do subconjunto armazenado do conjunto de dados de função de sistema e para então reconstruir a distribuição espacial do material magnético a partir dos sinais de detecção utilizando o conjunto reconstruído de dados de função de sistema completo.

30 6. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para reconstruir dados de função de sistema que são exigidos para a reconstrução da distribuição espacial do

material magnético (100), porém não estão contidos no subconjunto armazenado do conjunto de dados de função de sistema, ocorrendo durante a reconstrução da distribuição espacial do material magnético (100).

5 7. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 5 ou 6, caracterizada em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para reconstruir dados de função de sistema por meio da exploração de simetrias espaciais, em particular simetrias especulares espaciais, existentes nas componentes
10 de frequência da função de sistema.

 8. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para reconstruir a distribuição espacial do material magnético (100) na região de ação (300) utilizando a
15 função de sistema com um número reduzido de componentes espectrais, obtidos a partir da soma das componentes de frequência do subconjunto armazenado de dados de função de sistema com informações espaciais similares.

 9. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1,
20 caracterizada em que os ditos meios de reconstrução (74) são adaptados para gerar a dita representação reduzida da função de sistema por meio de uma transformação da função de sistema completo.

 10. CONFIGURAÇÃO, de acordo com a reivindicação 1,
25 caracterizada em que os ditos meios de recepção (230) são adaptados para medir diretamente a dita representação reduzida da função de sistema em pontos selecionados da região de ação, e onde os ditos meios de reconstrução (76) são adaptados para determinar os coeficientes das ditas
30 funções analíticas que são utilizadas para descrever a dependência espacial da dita representação reduzida medida da função de sistema.

 11. MÉTODO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL

MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, o método caracterizado por compreender as etapas de:

- geração de um campo de seleção magnética (211), tendo um padrão no espaço de sua força de campo magnético, de modo que uma primeira sub-zona (301), tendo uma baixa força de campo magnético, e uma segunda sub-zona (302), tendo uma maior força de campo magnético, sejam formadas na região de ação (300),
- alteração da posição no espaço das duas sub-zonas (301, 302) na região de ação (300) por meio de um campo de acionamento magnético (221), de modo que a magnetização do material magnético (100) mude localmente,
- aquisição de sinais de detecção, sendo que os sinais de detecção dependem da magnetização na região de ação (300), sendo a magnetização influenciada pela alteração na posição no espaço da primeira e segunda sub-zonas (301, 302),
- armazenamento de um subconjunto de dados de função de sistema da função de sistema da configuração (10) utilizada para detectar e/ou localizar o material magnético (100) na região de ação (300), a dita função de sistema compreendendo um conjunto de dados de função de sistema que descreve a relação entre a posição espacial do material magnético e a resposta do sistema para a dita configuração e a trajetória ao longo da qual a dita primeira sub-zona (301) é movimentada para a aquisição dos ditos dados de função de sistema, e
- reconstrução de uma distribuição espacial do material magnético (100) na região de ação (300) a partir dos sinais de detecção e do subconjunto armazenado dos dados de função de sistema, utilizando conhecimento adicional sobre a estrutura da função de sistema, em que a dita etapa de reconstrução inclui a geração de uma representação reduzida da função de sistema por meio da aplicação de uma

transformada do tipo Chebyshev ou cosseno ao longo da dimensão espacial e da resolução do problema de reconstrução muito mais esparsa que surge após a transformada.

12. PROGRAMA DE COMPUTADOR, caracterizado por
5 compreender meios de código de programa para fazer um computador controlar uma configuração conforme definida na reivindicação 1 para realizar as etapas do método conforme definido na reivindicação 11 quando o dito programa de computador é executado no computador.

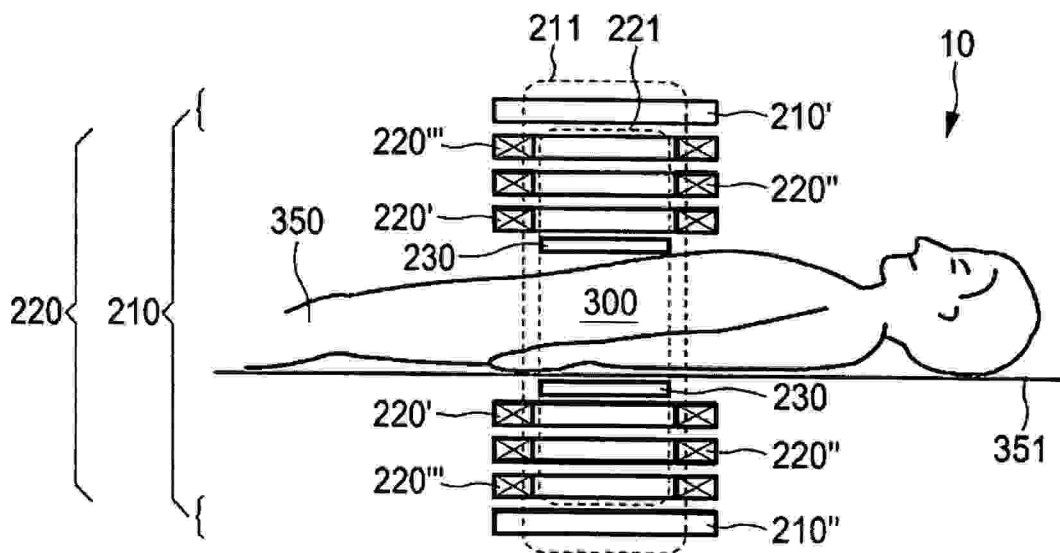


FIG. 1

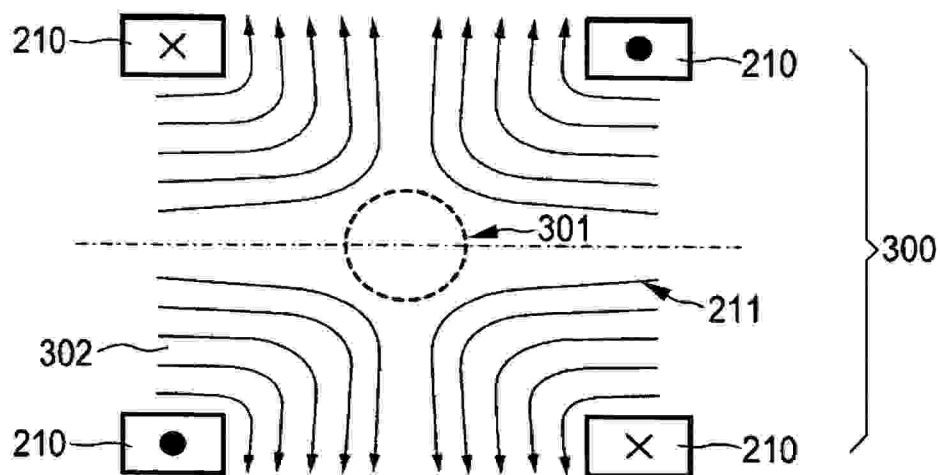


FIG. 2

FIG. 3

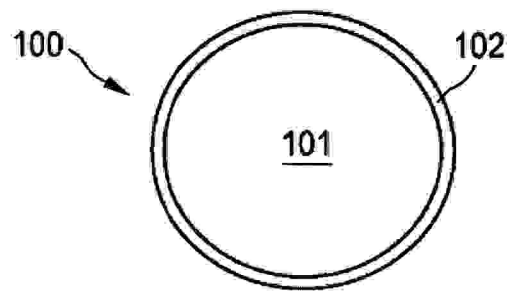


FIG. 4a

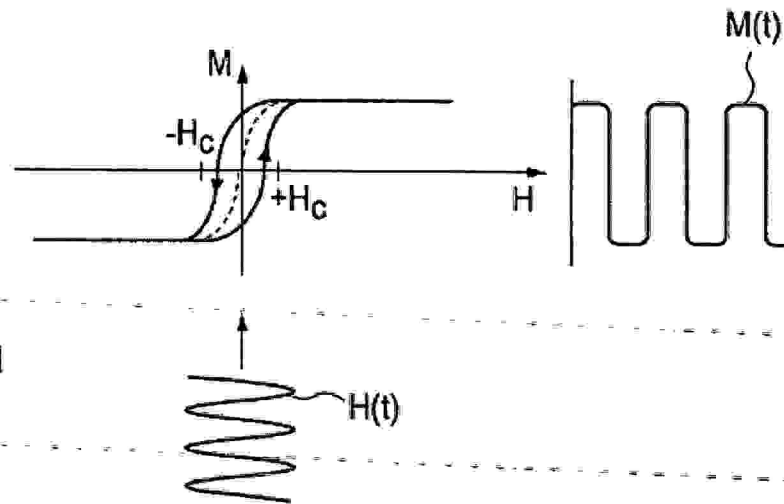
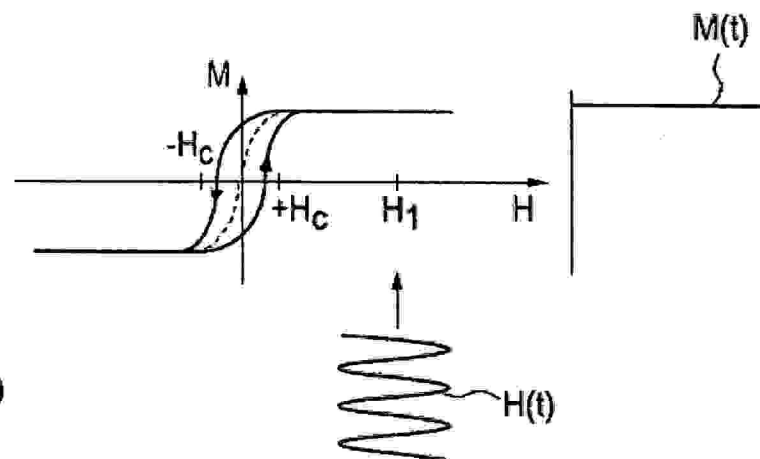


FIG. 4b



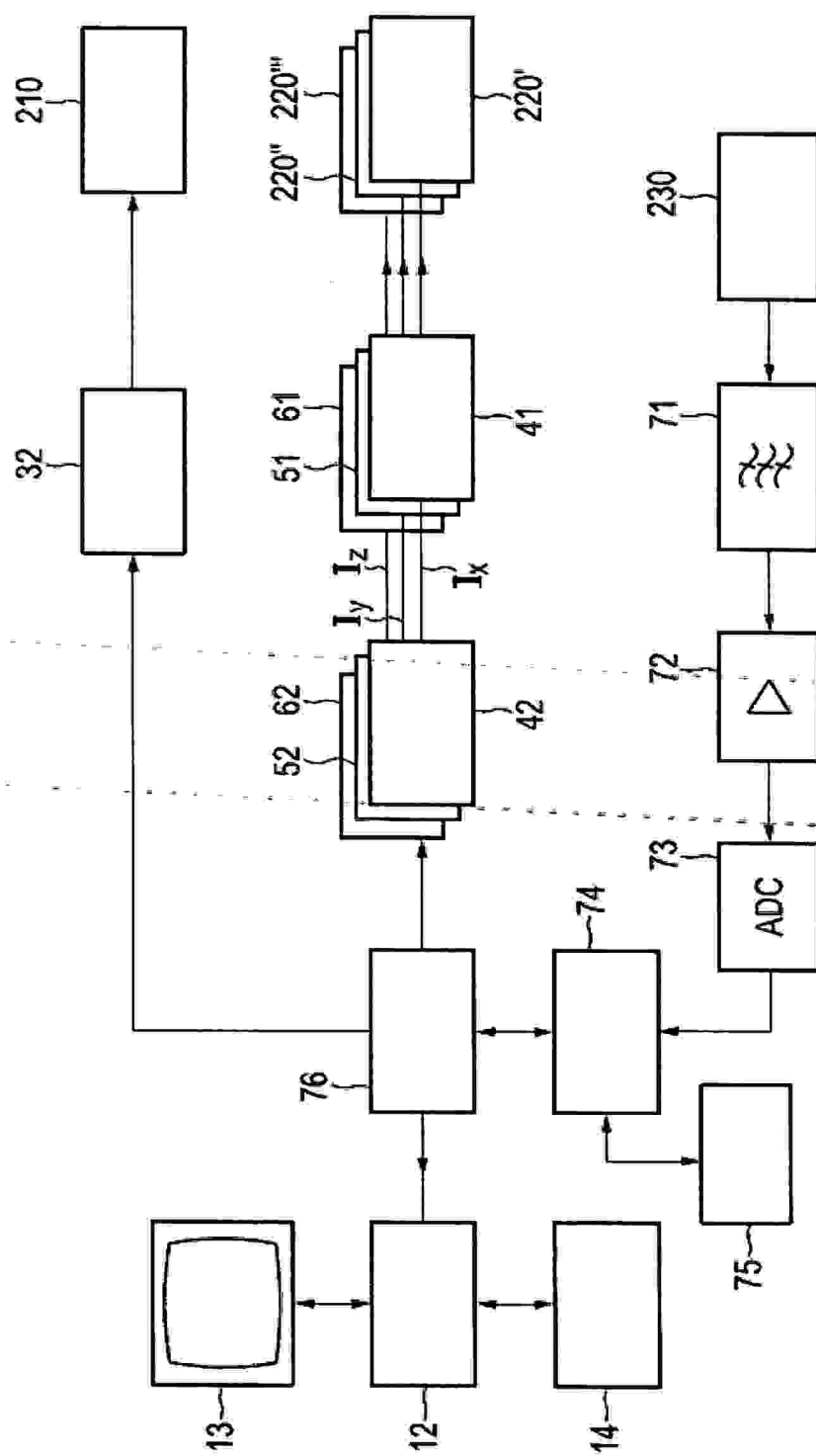


FIG. 5

FIG. 6a

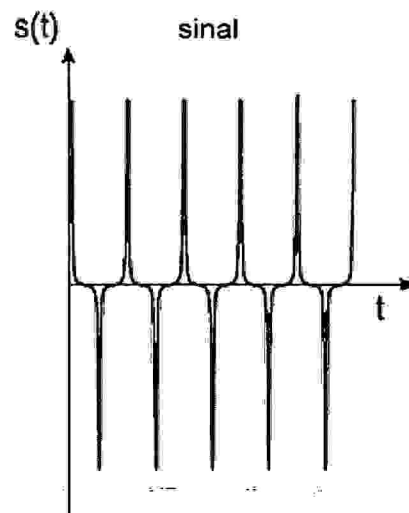
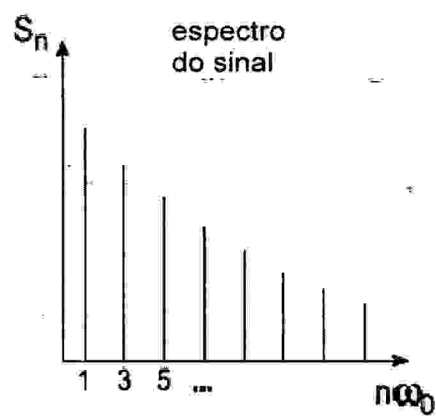


FIG. 6b



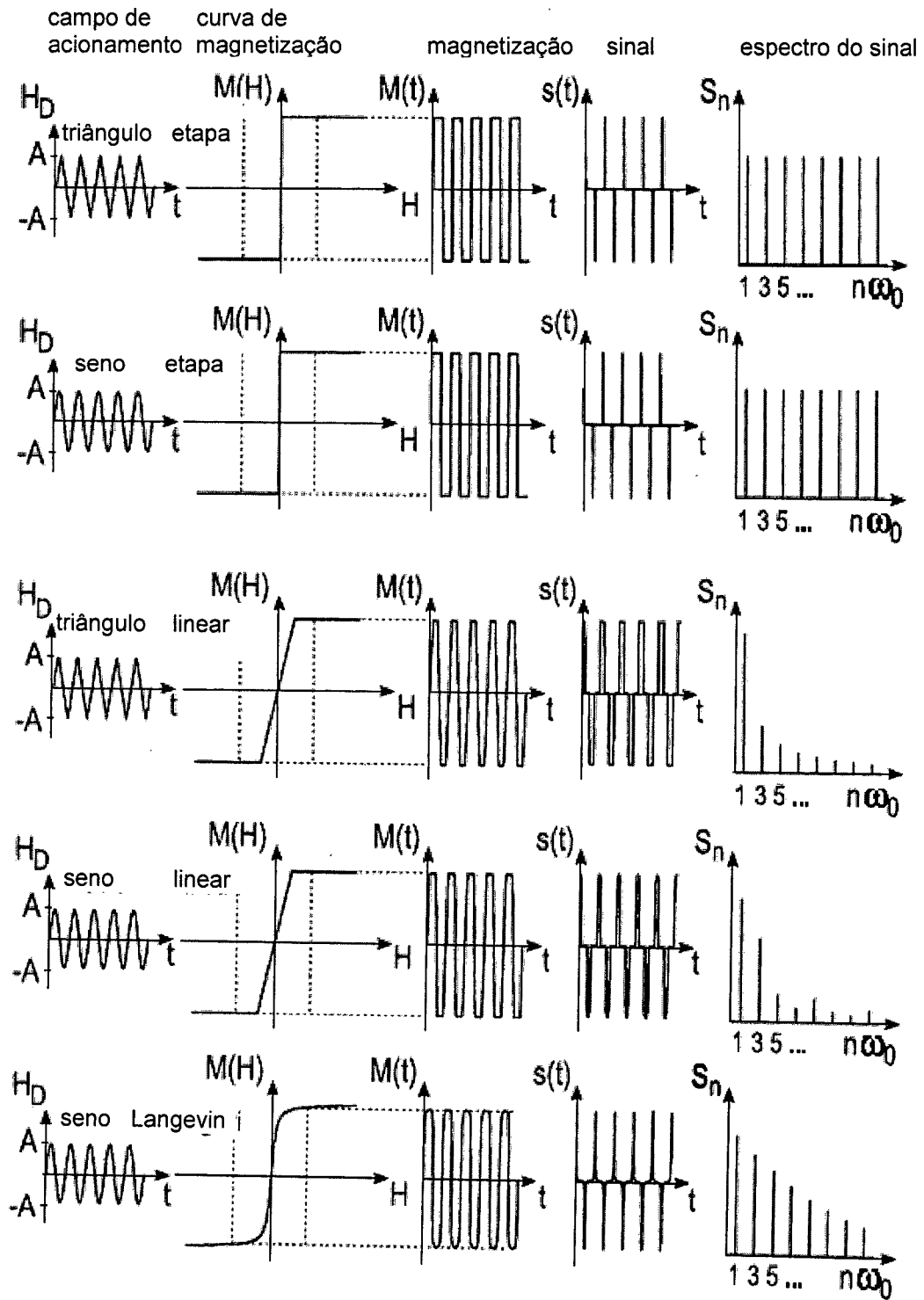


FIG. 7

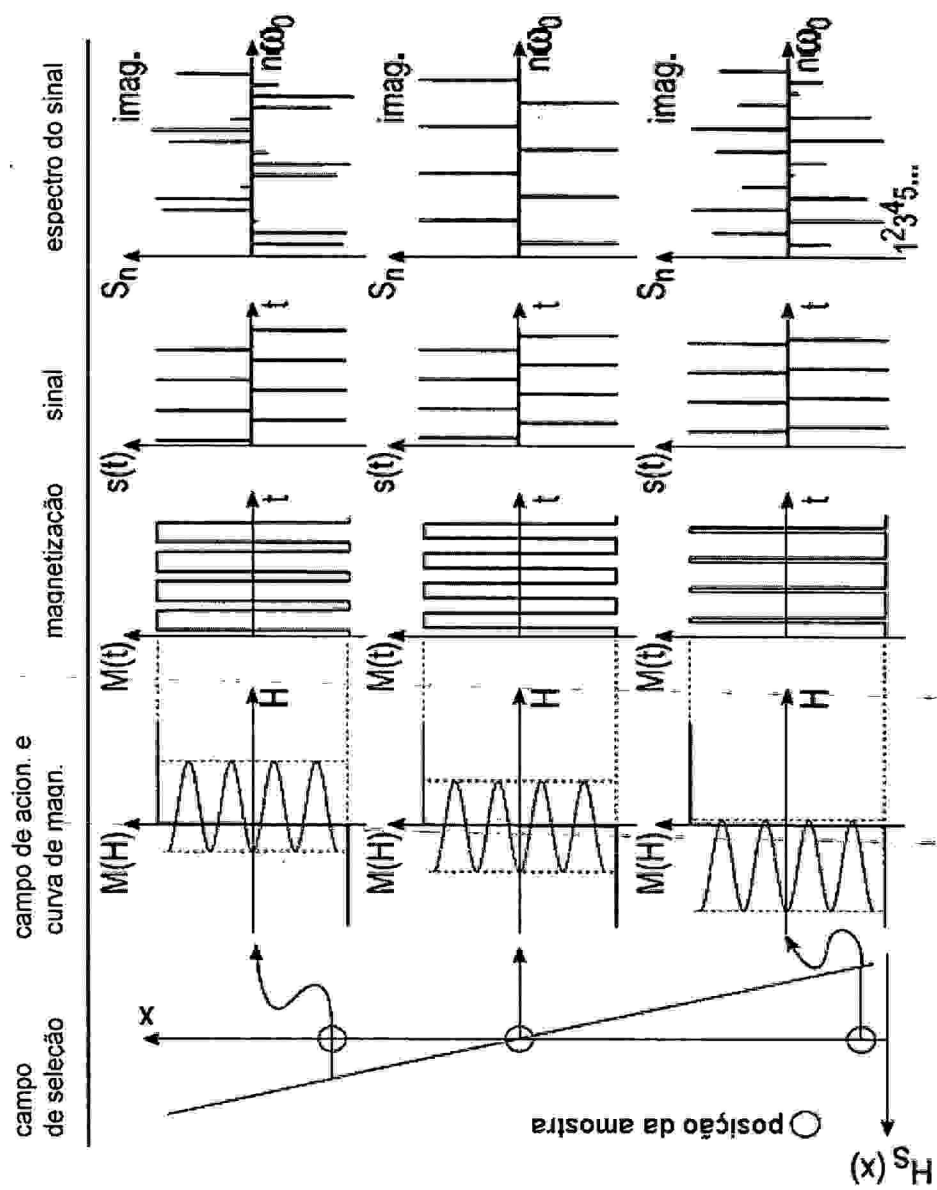


FIG. 8

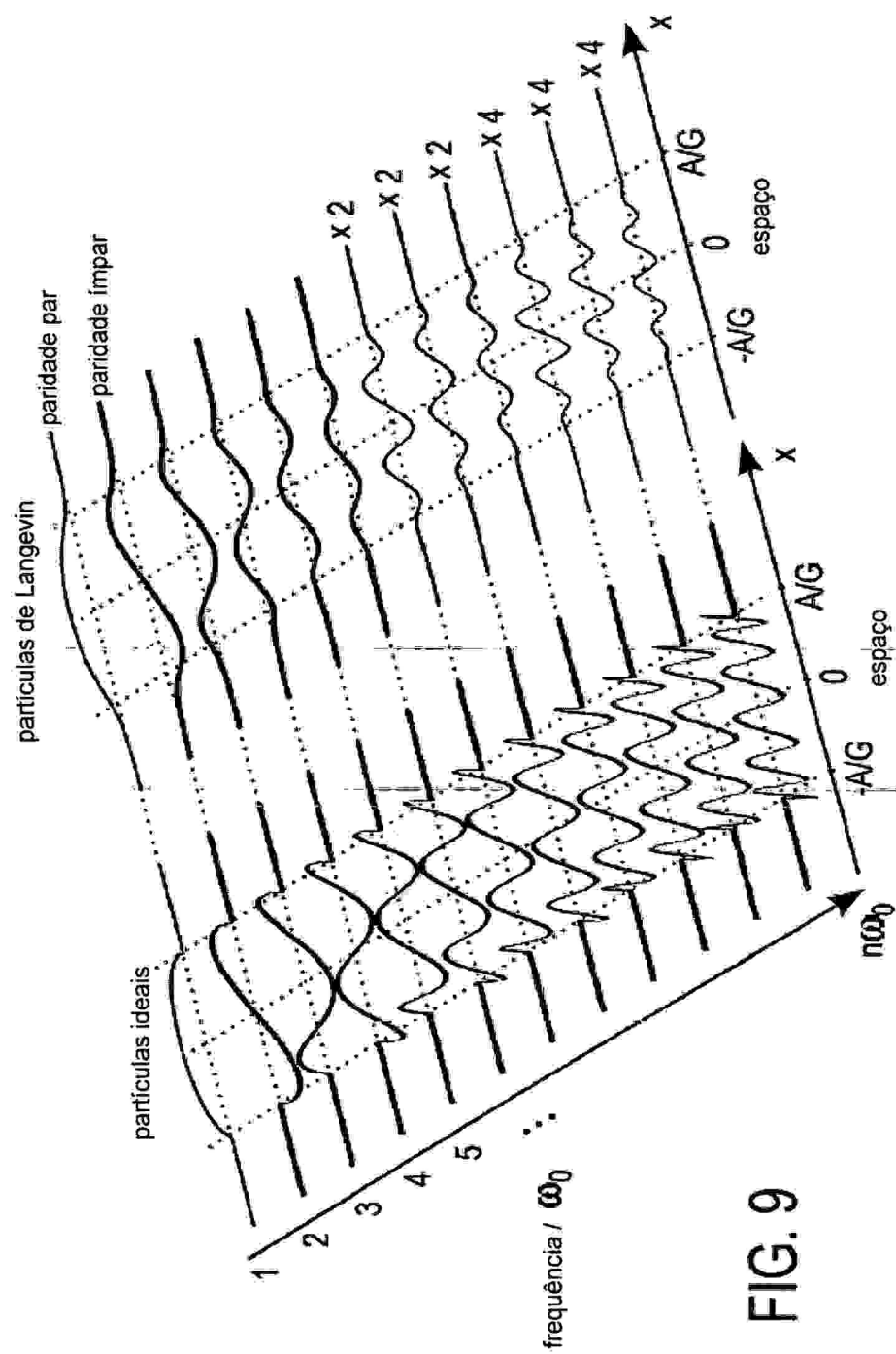


FIG. 9

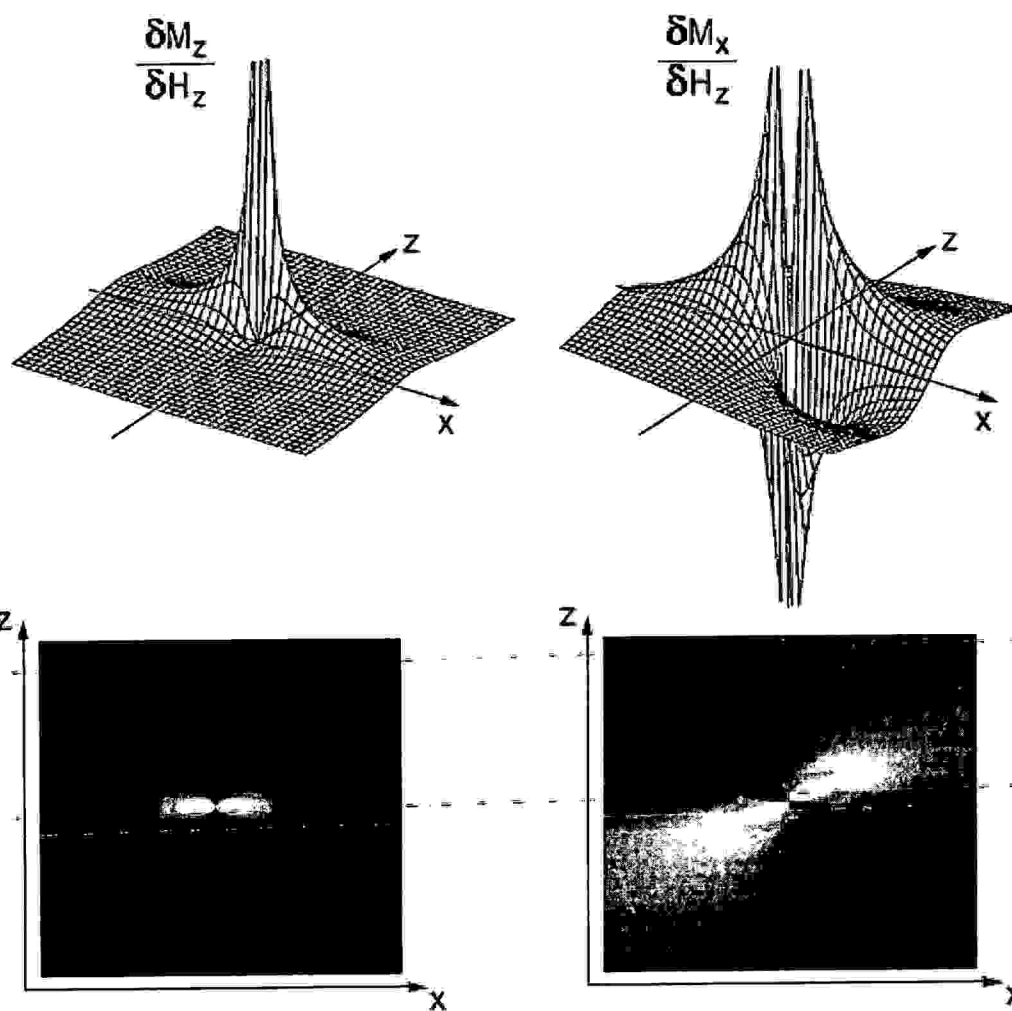


FIG. 10

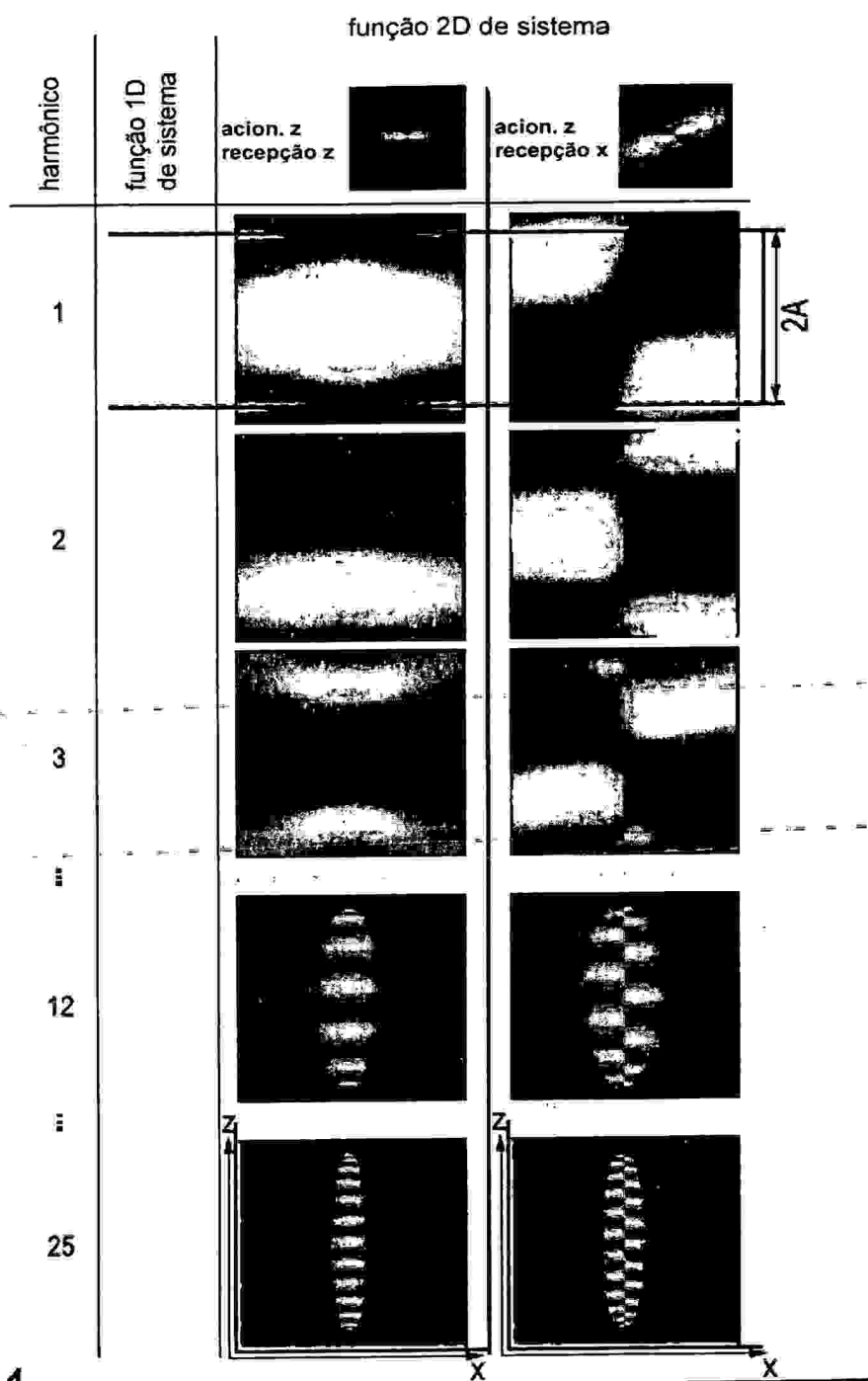
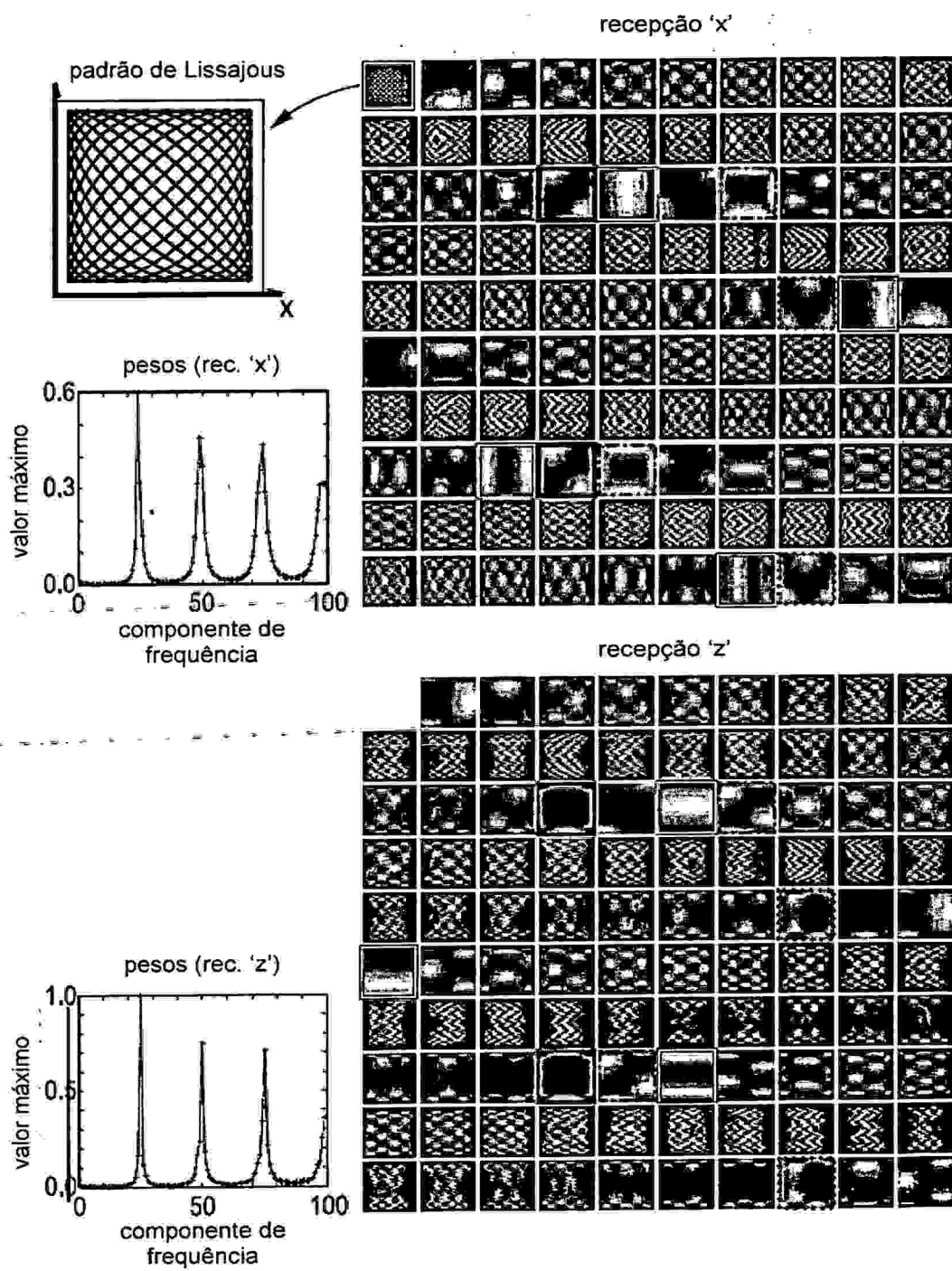


FIG. 11



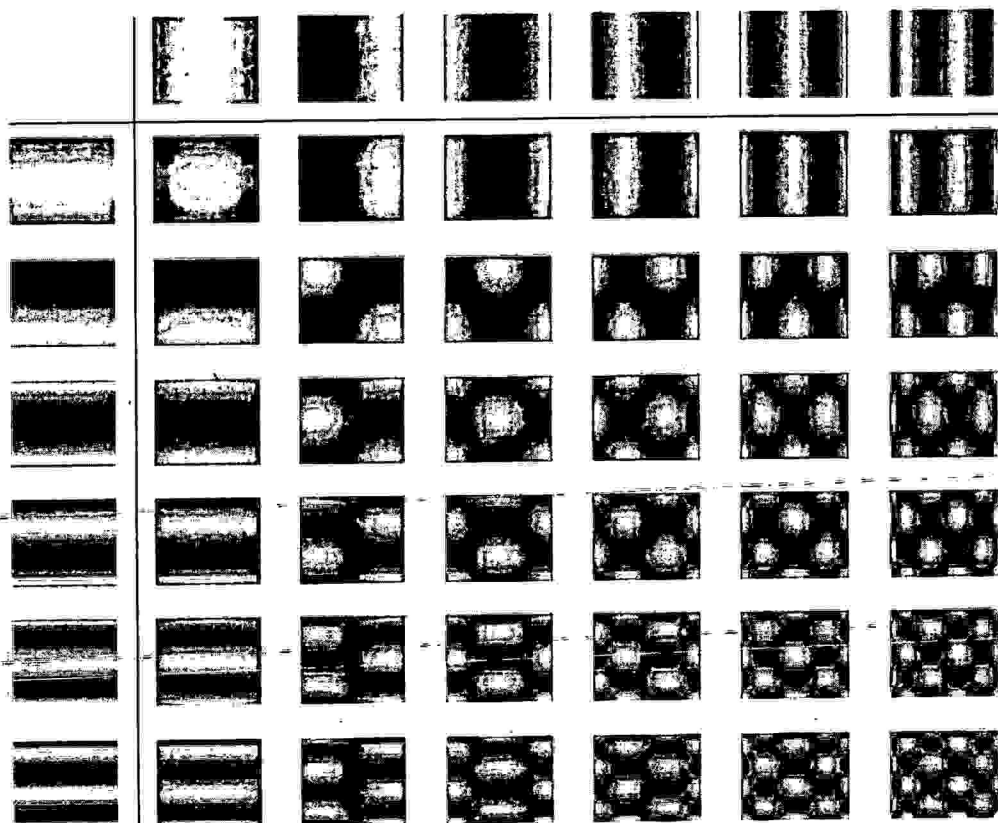


FIG. 13

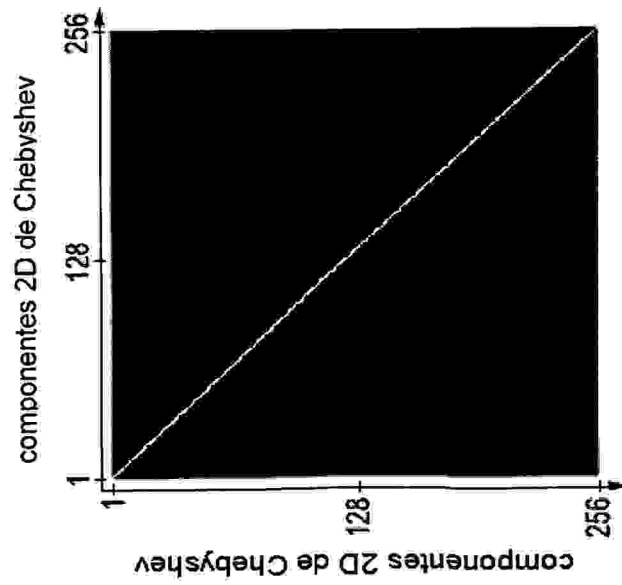
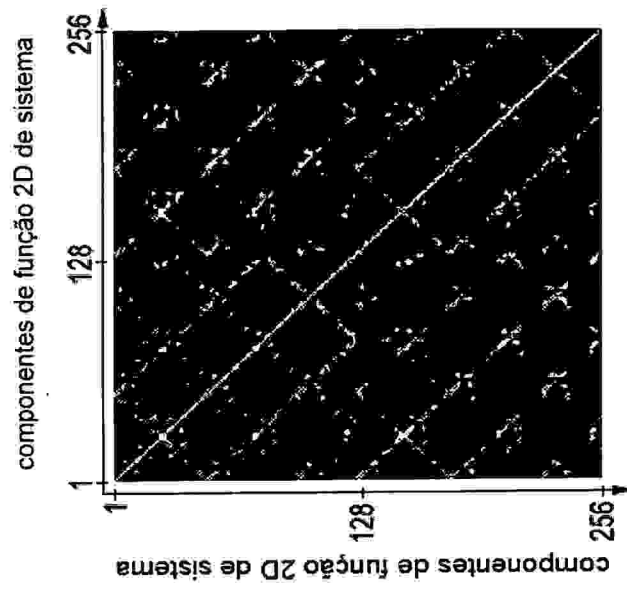


FIG. 14



FIG. 15

FIG. 16

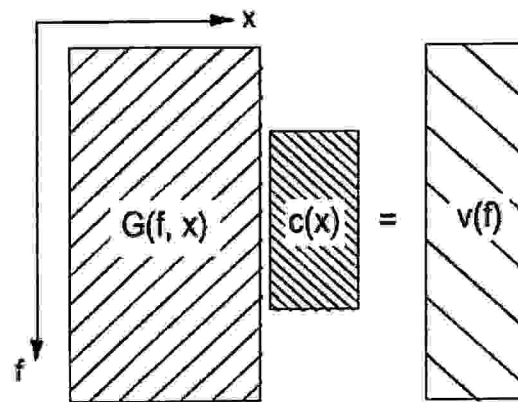
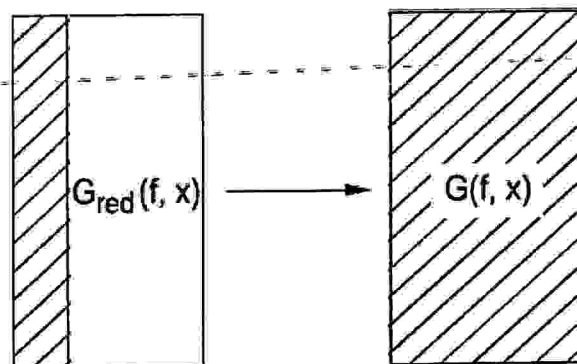


FIG. 17



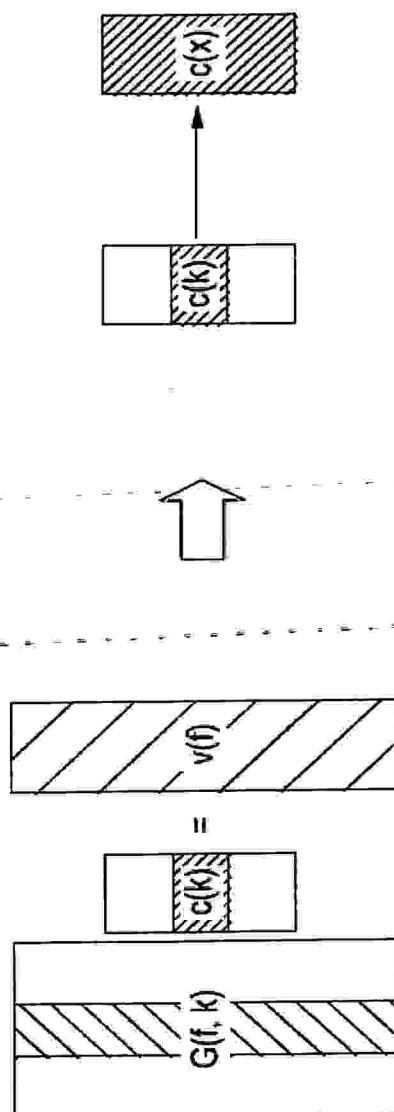


FIG. 18

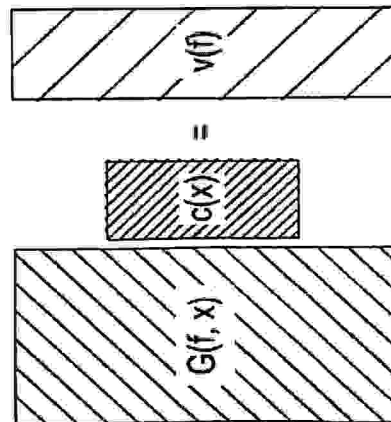
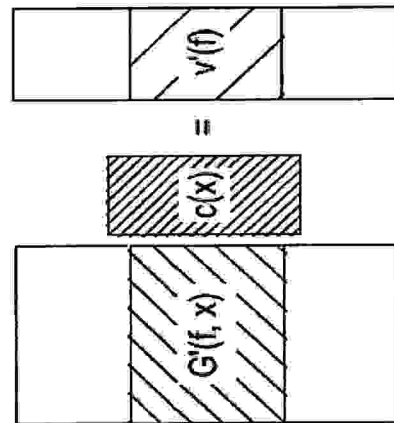


FIG. 19

RESUMO

CONFIGURAÇÃO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO, MÉTODO PARA DETECTAR E/OU LOCALIZAR UM MATERIAL MAGNÉTICO EM UMA REGIÃO DE AÇÃO E PROGRAMA DE COMPUTADOR

Na geração de imagem de partícula magnética (MPI), a reconstrução exige o conhecimento de uma assim chamada função de sistema. Esta função descreve a relação entre a posição espacial e a resposta de frequência. Para resoluções e campos de vista razoáveis, a função de sistema se torna relativamente grande, resultando em longos tempos de aquisição para a função de sistema e alta demanda de memória durante a reconstrução. A presente invenção propõe a redução do tamanho da matriz de função de sistema utilizando-se as propriedades estruturais da matriz. Essas propriedades são, por exemplo, simetrias espaciais que reduzem o número de colunas e respostas idênticas em diferentes frequências, reduzindo o número de fileiras. Em outras configurações, a matriz pode ser transformada em uma representação esparsa utilizando funções de base apropriadas.