



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

(11) PI 0716882-9 B1



(22) Data do Depósito: 07/09/2007

(45) Data de Concessão: 26/12/2018

(54) Título: SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO FÍSICA DE CONDUTORES DE FASE

(51) Int.Cl.: G01R 15/14; G01R 19/25; G01R 29/08.

(30) Prioridade Unionista: 08/09/2006 US 60/825,093.

(73) Titular(es): GENSCAPE INTANGIBLE HOLDING, INC..

(72) Inventor(es): STEVEN J. SYRACUSE; ROY CLARK; PETER G. HALVERSON; FREDERICK M. TESCHE; CHARLES V. BARLOW.

(86) Pedido PCT: PCT US2007077881 de 07/09/2007

(87) Publicação PCT: WO 2008/031029 de 13/03/2008

(85) Data do Início da Fase Nacional: 06/03/2009

(57) Resumo: SENSOR, MÉTODO E SISTEMA PARA MONITORAR LINHAS DE TRANSMISSÃO A presente invenção refere-se a um aparelho, método e sistema para medir o campo magnético produzido pelos condutores de fase em linhas de energia com múltiplas fases. As medições do campo magnético são utilizadas para determinar a carga de corrente nos condutores. Os campos magnéticos são percebidos por enrolamentos colocados suficientemente próximos das linhas para medir a voltagem induzida nos enrolamentos pelo campo, sem tocar as linhas. Os componentes x e y dos campos magnéticos são utilizados para calcular a sag do condutor, e então os dados da sag, junto com os dados da potência do campo, podem ser utilizados para calcular a carga de corrente na linha e a fase da corrente. Os cálculos da sag da presente invenção são independentes da voltagem da linha, e das medições da corrente da linha. O sistema aplica uma rotina de ajuste computadorizada junta às voltagens medidas e amostradas nos enrolamentos para, de forma precisa, determinar os valores dos parâmetros associados com os condutores de fase aéreos.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO FÍSICA DE CONDUTORES DE FASE"**.

Referência Cruzada a Pedidos de Patentes Anteriores

5 Este pedido de patente reivindica o benefício do Pedido de Patente Provisório copedente dos Estados Unidos com o Nº de Série 60/825.093 depositado em 8 de setembro de 2006, o qual é por meio deste documento incorporado por referência em sua totalidade.

Declaração com Relação à Pesquisa e Desenvolvimento Patrocinados pelo

10 Governo Federal

 A presente invenção foi desenvolvida com suporte do Governo dos Estados Unidos sob o Contrato DE-FG02-05ER84159 outorgado pelo Departamento de Energia. O governo possui certos direitos sobre a presente invenção.

Campo da Invenção

15 A presente invenção refere-se com um sensor de alta-resolução confiável, de baixo custo, que não é de contato, não-invasivo, de alta precisão, o qual irá simultaneamente monitorar a sag do condutor de transmissão de alta voltagem, a temperatura, a capacidade máxima de transporte de corrente (ou "ampacidade"), e a corrente da fase. Postos estes dados, o sistema pode

20 estimar a capacidade disponível de transmissão ("ATC") e dinamicamente classificar o circuito. O sistema da presente invenção funciona extremamente mesmo com um número mínimo de sensores instalados, e o sistema pode ser configurado totalmente de uma maneira portátil ou instalado para uso em longo prazo. O sistema e método computadorizados reivindicados fazem uso

25 do campo magnético emanando a partir das linhas aéreas de transmissão e de distribuição para determinar as propriedades dos condutores aéreos de fase e a corrente nos mesmos. O sistema tira vantagem do fato de que o campo magnético a partir dos condutores de fase é mais robusto do que o campo elétrico dos condutores. O campo elétrico, ou campo-e, é facilmente

30 corrompido pelo tempo e pelos efeitos terra, de modo que utilizar o campo magnético proporciona um sistema mais estável que pode ser utilizado em vários ambientes.

Antecedentes

A demanda por energia elétrica tem crescido significativamente mais rápida do que a capacidade do sistema de transmissão para distribuir a mesma, e distribuir a mesma de forma confiável. Como resultado, o sistema
5 aéreo de transmissão e de distribuição de energia está sendo operado de uma maneira para a qual ele não foi projetado; gargalos e congestionamento, apagões, dano de equipamento, e perturbações no sistema estão se tornando difundidos, e estão ocorrendo com frequência sempre crescente.

O monitoramento em tempo real de circuitos de transmissão críticos congestionados aperfeiçoaria a confiabilidade, aliviaria o congestionamento, aumentaria a capacidade disponível de transmissão ("ATC"), e de
10 forma segura permitiria que mais energia fosse movida através dos circuitos existentes do que atualmente é possível. Como resultado, o sistema existente serviria a mais demandas; as receitas operacionais poderiam ser aumentadas, e alguns custos de novas construções e de atualizações requeridas
15 pela demanda poderiam ser adiados. Ao mesmo tempo, a segurança operacional do sistema, a confiabilidade, e a capacidade de transferência de energia, podem ser aperfeiçoadas.

Os sistemas existentes de classificação dinâmica de circuito térmico ("DTCR") e de monitoramento em tempo real ("RT") possuem custos
20 total instalados significativamente altos. Como resultado do custo e de outras questões de produto, a penetração no mercado, a aceitação, uso e expansão destas tecnologias têm sido impedidos. O sensor da presente invenção será muito menos oneroso do que as tecnologias existentes de sensor e
25 DTCR, será capaz de instalação e calibragem fácil e rápida, e irá permitir a ampla implementação, a baixo custo, de DTCR.

Os aperfeiçoamentos necessários para aliviar os gargalos e o congestionamento nas linhas de transmissão, enquanto simultaneamente mantendo a confiabilidade, têm sido estudados de forma completa, reporta-
30 dos em detalhes, e repetidamente recomendados. Na melhor das hipóteses, é um empreendimento a longo de décadas de \$50 até 100 bilhões. Enquanto os aperfeiçoamentos requeridos são quase todos entendidos, e têm sido

detalhados e graficamente representados, eles estão perto de um início muito lento. Enquanto uma fração destes aperfeiçoamentos (incluindo uma apreciável nova construção), começou na década de 90, e está a caminho atualmente, a taxa de aperfeiçoamento ainda está de forma significativa atrasada em relação ao crescimento da demanda.

O congestionamento custa aos consumidores de eletricidade aproximadamente quatro bilhões de dólares por ano. Os custos relacionados com o congestionamento poderiam ser de forma significativa diminuídos se, enquanto mantendo a confiabilidade, transferências aumentadas através dos caminhos aéreos de transmissão congestionados fossem permitidas. A capacidade aumentada de transmissão aperfeiçoaria a confiabilidade da grade por permitir que regiões compartilhem as reservas de capacidade. O monitoramento em tempo real de parâmetros do circuito congestionado é um foco para esforços direcionados para a eficiência e confiabilidade mais elevadas da grade via medição aperfeiçoada e visualização da grade. Os parâmetros incluem a sag do condutor, a temperatura, a corrente, a ampacidade, e a ATC ("capacidade disponível de transmissão"). Quando estes parâmetros podem ser determinados de forma precisa, e em tempo real, a capacidade de transmissão latente ou "oculta" pode ser descrita; isto pode então ser monitorado, quantificado, registrado e modelado. Em última análise, e de forma mais importante, tal capacidade de transmissão pode ser capitalizada via os sistemas de classificação e operação dinâmica de circuito térmico. Os sistemas de classificação dinâmica de circuito térmico em tempo real ("RT-DCTR") maximizam o desempenho do circuito de transmissão (ATC, ampacidade, eficiência), enquanto simultaneamente mantêm a confiabilidade.

Enquanto alguns sensores de linha de transmissão de alta voltagem ("HVTL") e sistemas DTCR se tornaram disponíveis através dos anos, a aceitação, a penetração no mercado, o uso e a expansão de uso têm sido impedidos por uma série de fatores. As questões técnicas (por exemplo, falha de sistema, impacto do sensor sobre a confiabilidade, baixa precisão, perda frequente de calibragem, instalação ou calibragem complexa/longa/

invasiva) têm atormentado algumas tecnologias. Mais importante tem sido o custo total de instalação muito alto. Um produto sensor DTCR de linha de transmissão aérea (OHL) com custos muito menores representa um grande aperfeiçoamento em relação às tecnologias comerciais existentes.

5 Esforços para desenvolver dispositivos objetivando medir a capacidade, utilização e disponibilidade do condutor são impedidos pela complexidade no projeto ou na instalação. Por exemplo, a Genscape, Inc., tem depositado vários pedidos de patente para seu método de monitorar o fluxo de energia e de corrente em condutores de fase. Várias das publicações da
10 Genscape, Inc, (por exemplo, Patente US Nº 6.714.000; Patente US Nº 6.771.058; Patente US Nº 6.956.364; e Pedido de Patente US Nº 200050162148) exigem medições de campo magnético e medições de campo elétrico para derivar as dinâmicas da energia elétrica na instalação. As medições duplas da Genscape acarretam processamento de dados de forma
15 significativa intrincado para estimar fluxo de energia (MW) em circuitos de transmissão de alta voltagem.

 O Pedido de Patente da Genscape US Nº 20070052493 utiliza medições de fluxo magnético para determinar qual posição abaixo de um condutor aéreo é ótima para detectar alterações no campo magnético. A publicação '493 fornece poucos detalhes com relação à maneira pela qual os
20 dados agrupados pelo processo neste documento poderiam ser utilizados para determinar parâmetros úteis adicionais, tal como a magnitude do condutor de fase, o ângulo da fase, as alturas do cabo, a temperatura e a capacidade.

25 O Pedido de Patente 2005286190 para Rostron descreve um sistema de monitoramento de energia elétrica utilizando sensores de campo magnético localizados de forma remota a partir dos condutores de fase. Rostron não descreve as bases matemáticas e os algoritmos para variáveis desconhecidas do sistema. Na melhor das hipóteses, Rostron descreve a idéia
30 de que a medição do campo eletromagnético a partir de um pedestal ou plataforma fixa, acima do solo, pode ser utilizada ao prognosticar as correntes da fase. Rostron oferece muito poucos detalhes.

Breve Sumário da Invenção

A invenção neste documento inclui um aparelho, um método computadorizado, e um sistema implementado por computador para medir o campo magnético produzido por condutores de fase e utilizando estas medições para determinar a amplitude, a fase e a corrente em um condutor de fase, bem como a posição deste condutor no espaço (sag). O método não requer a temperatura do condutor nem medições de campo elétrico para precisão. Estes valores, em adição ao padrões conhecidos para os materiais dentro do sistema de distribuição de energia, permitem calcular a amplitude da corrente e a fase, em adição a sag da linha, com medições de sensor colocado de forma remota. Ao calcular a corrente e a sag da linha, a temperatura e a capacidade do condutor, junto com a ampacidade, podem ser determinadas.

Os objetivos da presente invenção são alcançados pela utilização de um sensor para medir a fase tridimensional e a magnitude do campo magnético emanando a partir dos condutores de fase em um sistema aéreo de transmissão. O sensor tira vantagem de pelo menos duas bobinas de fios paralelos possuindo correntes com polaridades opostas geradas pelo campo magnético. As bobinas, também chamadas de enrolamentos neste documento, cancelam o campo elétrico e o ruído associado com o mesmo para melhor precisão.

Os sensores são utilizados em pares para medir os componentes x e y do campo magnético a partir de uma linha aérea de transmissão e de distribuição de energia. Estes componentes do campo magnético induzem as respectivas voltagens do circuito aberto em cada sensor, as quais servem como entradas para um sistema computadorizado maior, para calcular outros parâmetros de interesse no modelo.

O sistema descrito e reivindicado neste documento também implementa um método computadorizado para medir a altura física de três ou mais condutores de fase em um sistema de transmissão e de distribuição de energia. Em particular, os módulos de aquisição de dados e de análise de dados do sistema de forma eficiente ajustam as medições de dados compa-

rados para parâmetros operacionais conhecidos para determinar, no mínimo, a altura de um condutor de fase, bem como a magnitude e a fase da corrente neste condutor. Outros parâmetros, tal como a sag, a ampacidade, a capacidade e a frequência da corrente, juntos com a temperatura do condutor, também podem ser determinados a partir do sistema descrito e reivindicado abaixo.

Breve Descrição dos Desenhos

A Figura 1 representa esquematicamente o circuito eletrônico da presente invenção como instalado em uma operação de campo possuindo sensores de campo magnético sob condutores de fase aéreos.

A Figura 2 apresenta uma representação com três partes dos sensores como colocados sob uma linha aérea de energia trifásica horizontalmente orientada e a saída associada gerada pelo sistema.

As Figuras 3A e 3B apresentam uma representação com três partes dos sensores como colocados sob uma linha aérea de energia trifásica verticalmente orientada e a saída associada gerada pelo sistema.

A Figura 4 representa um sensor de campo magnético, de cancelamento de campo elétrico, possuindo duas bobinas de polaridade oposta.

A Figura 5 representa esquematicamente o enrolamento da bobina dos sensores na Figura 4.

A Figura 6 apresenta um par de sensores de campo magnético de cancelamento de campo elétrico para colocação sob uma linha aérea de transmissão de acordo com a presente invenção.

A Figura 7 apresenta o par de sensores da Figura 6 com um invólucro protetor para instalações a longo prazo.

A Figura 8 é um gráfico do componente vertical de campo do campo magnético da imagem que seria medido no nível solo/terra como gerado por uma linha de transmissão aérea.

A Figura 9 é um gráfico da corrente média calculada pelo sistema sensor em comparação com valores conhecidos.

A Figura 10 é um gráfico da altura calculada pelo sistema sensor em comparação com o valor conhecido como medido.

A Figura 11 é um esquema da lógica de computador utilizada em uma concretização do filtro de dados para calcular os parâmetros do sistema aéreo de transmissão a partir das voltagens medidas pelo sensor.

Descrição Detalhada

5 Os condutores de fase aéreos de alta voltagem são catenárias suaves, muito longas, cujas características e comportamento eletromecânico têm sido intensamente estudados e são muito bem-entendidos¹. Os condutores de fase quase lineares geram campos magnéticos que variam com o tempo, os quais, em 60 Hz, podem ser tratados quase estaticamente. A po-
10 tência do campo em qualquer localização pode ser medida muito precisamente e, se medida simultaneamente em várias localizações espacialmente distintas, utilizada para determinar, de forma precisa, a distância até os condutores. A distância por sua vez pode ser utilizada para determinar a sag dos condutores; dado isto, a temperatura média do condutor, o ângulo da
15 fase da corrente e a magnitude da corrente, podem ser estabelecidos de forma precisa.

O campo magnético, H , ao redor de um condutor de fase possui a magnitude $H = I/2 \pi r$, onde r é a distância até o condutor e I é a corrente da fase. Nos circuitos de transmissão trifásicos, as correntes da fase, I_1 , I_2 e
20 I_3 , são 120 graus fora de fase, variam muito durante um dia. Nos sistemas realísticos, existirão desequilíbrios que são endereçados no trabalho suportando a presente invenção. Enquanto os elementos físicos básicos discutidos abaixo predominantemente endereçam um sistema equilibrado, a invenção abrange vários parâmetros não-equilibrados que poderiam estar presen-
25 tes em qualquer dada situação.

H_1 , H_2 e H_3 continuamente variam em potência e mudam as direções na frequência fundamental (por exemplo, 60 Hz nos Estados Unidos e 50 Hz na Europa). Para determinar o campo H combinado em qualquer localização, deve-se calcular a soma dos vetores dos três campos contribuintes
30 pela decomposição dos mesmos em componentes, horizontal (x) e vertical (y), e pela adição destes separadamente. Esta soma é denotada como $H_x = H_{1x} + H_{2x} + H_{3x}$ e $H_y = H_{1y} + H_{2y} + H_{3y}$. Deve ser observado que somente os

componentes x e y do campo magnético são significativos para os propósitos neste documento devido ao terceiro, o componente z, ser muito pequeno, de modo que ele é estatisticamente insignificante para o sistema neste documento.

- 5 Para um circuito com uma configuração horizontal do condutor de fase, tal como esta da Figura 2, H_{1x} e H_{1y} em um ponto diretamente sob o nadir do condutor de fase central 200, são dados por

$$H_{1x} = \frac{I_1}{2\pi} \left(\frac{h}{h^2 + d^2} \right) \quad \text{e} \quad H_{1y} = \frac{I_1}{2\pi} \left(\frac{d}{h^2 + d^2} \right), \quad (\text{equação 1.1}),$$

- onde d é a distância fixa entre os condutores de fase 200, 210, e 220 e h é a altura dos condutores acima do ponto de teste,

$$H_{2x} = \frac{I_2}{2\pi} \left(\frac{1}{h} \right), \quad H_{2y} = 0, \quad \text{e} \quad H_{3x} = \frac{I_3}{2\pi} \left(\frac{h}{h^2 + d^2} \right), \quad H_{3y} = \frac{I_3}{2\pi} \left(\frac{-d}{h^2 + d^2} \right).$$

(Equações 1.2 e 1.3)

- Desde que I_1 , I_2 e I_3 , são sinusóides, o sistema deve somar três quantidades escalares senoidais fora de fase de 120 graus. Considere as quantidades escalares, V_1 , V_2 , V_3 , variando de forma sinusoidal, e 120 graus fora de fase. Na notação de fasor, V_1 , V_2 , V_3 , podem ser expressos como

$$V_1 = V_{1p} [\cos(0) + j \sin(0)] = V_{1p}, \quad V_2 = V_{2p} [\cos(120) + j \sin(120)] = V_{2p} \left[-\frac{1}{2} + j \sqrt{\frac{3}{4}} \right],$$

$$V_3 = V_{3p} [\cos(-120) + j \sin(-120)] = V_{3p} \left[-\frac{1}{2} - j \sqrt{\frac{3}{4}} \right],$$

e

- onde V_{1p} é V_1 pico, V_{2p} é V_2 pico, etc. A magnitude das quantidades combinadas é dada por

$$\begin{aligned} V &= [(\text{parte real})^2 + (\text{parte imaginária})^2]^{1/2} \\ &= \left[\left(V_{1p} - \frac{1}{2} V_{2p} - \frac{1}{2} V_{3p} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{3}{4}} V_{2p} - \sqrt{\frac{3}{4}} V_{3p} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[V_{1p}^2 + V_{2p}^2 + V_{3p}^2 - (V_{1p} V_{2p} + V_{1p} V_{3p} + V_{2p} V_{3p}) \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

Deixando fora o subscrito "p", o resultado é

$$V = \left[V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 - (V_1 V_2 + V_1 V_3 + V_2 V_3) \right]^{1/2}. \quad (\text{Equação 2})$$

Para uma localização de teste diretamente sob o nadir da fase central, o sistema combina os componentes do campo a partir das três fases aéreas. Por inserir o componente x das equações 1.1, 1.2 e 1.3 na Equação 2, viu-se que a magnitude de H_x , o componente horizontal do campo, é

$$H_x = \left[H_{1x}^2 + H_{2x}^2 + H_{3x}^2 - (H_{1x}H_{2x} + H_{1x}H_{3x} + H_{2x}H_{3x}) \right]^{1/2} = \frac{I}{2\pi} \frac{\sqrt{3}d}{h^2 + d^2} \quad \text{(Equação 3x)}$$

De forma similar, para H_y , o componente vertical do campo, temos

$$H_y = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{h} - \frac{h}{h^2 + d^2} \right) \quad \text{(Equação 3y)}.$$

10 A razão dos componentes é

$$\frac{H_y}{H_x} = \frac{\sqrt{3}h}{d} \quad \text{(Equação 4)}$$

É importante observar que quando a carga no condutor está equilibrada, a Equação 4 é independente tanto da voltagem do circuito como da corrente nos condutores de fase. Para um circuito de transmissão CA com geometria horizontal do condutor de fase, a Equação 4 apresenta que por simultaneamente medir a amplitude CA de H_x e de H_y diretamente abaixo do condutor de fase central, a distância a partir dos condutores de fase até as bobinas de percepção pode ser determinada utilizando a fórmula

$$h = \frac{d}{\sqrt{3}} \frac{H_y}{H_x} \quad \text{(Equação 5)},$$

20 onde d é a separação fixa dos condutores de fase. Dado h , podemos então calcular a corrente da fase, I , a partir da Equação 3y,

$$I = 2\pi H_y \left(\frac{1}{h} - \frac{h}{h^2 + d^2} \right)^{-1}.$$

25 H_x e H_y podem ser determinados pela medição das voltagens CA desenvolvidas nas bobinas com área grande posicionadas dentro do campo magnético de pelo menos um condutor de fase. Pode-se utilizar as bobinas para medir a magnitude e a fase dos campos magnéticos em três dimensões

(isto é, a dimensão "x" ou esquerda; direita, a dimensão "y" ou para cima; para baixo, e a dimensão "z" ou para frente; para trás). Nesta concretização, a imagem tridimensional dos campos pode ser descrita como vetores cujas caldas são fixas em pontos no espaço, mas cujas pontas giram, por exemplo, em elipses de delineamento de 60 Hz à medida que elas giram. Como
 5 será explicado em maiores detalhes abaixo, uma concretização preferida do sistema da presente invenção utiliza somente as bobinas cujos eixos geométricos estão nas direções horizontal e vertical.

Dado H , a tensão MS V para uma bobina cuja n voltas cercam
 10 uma área A é $V = 2\pi F \mu_0 H n A$. F é 60 Hz, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry/metros, e H é a amplitude MS do componente do campo magnético na direção do eixo geométrico da bobina. Para medir H_x , uma bobina 12, tal como esta apresentada na Figura 6, cujo eixo geométrico é horizontal, é utilizada; H_y requer uma bobina 10 com um eixo geométrico vertical. Duas bobinas idênticas (Figura
 15 6) com eixos geométricos ortogonais (uma configuração em "T") podem ser utilizadas para continuamente monitorar H_y/H_x , nos fornecendo informação contínua sobre h e I_{rms} .

Enquanto a Equação 5 se aplica somente à configuração horizontal do condutor de fase, as configurações verticais de condutor de fase
 20 (Figura 3) também podem ser monitoradas com bobinas apropriadamente configuradas (10, 12, 14, 16, 18, 20). Neste caso, H_y , diretamente sob as fases, será zero (por simetria), de modo que a aproximação de H_y/H_x não pode ser utilizada. Entretanto, H_x pode ser medido simultaneamente em duas alturas, y_1 e y_2 , diretamente sob os condutores 310, 320 e muito próximo
 25 do nível do solo; a razão $H_x(y_1)/H_x(y_2)$ pode então ser utilizada para determinar h e, dado isto, I_{rms} . O diagrama de projeto e em blocos funcionais para o sistema de desenvolvimento no campo é apresentado na Figura 1.

Como exposto nas Figuras 1 e 2, uma concretização da presente invenção inclui duas bobinas com área grande 14, 16 (650 – 1000 m²) lo-
 30 calizadas diretamente sob o nadir do condutor de fase central 200 de um circuito de transmissão horizontalmente configurado. As bobinas 14, 16 são dispostas em uma configuração em "T", e estão localizadas no nível do solo,

ou logo acima. As bobinas e o sistema sensor ocupam um volume de cerca de 1 m^3 , se situam em uma plataforma fina de concreto, e são alojados dentro de um invólucro a prova de água, de alta resistência, e de alta confiabilidade (não-metálico, baixa μ). Os cálculos adicionalmente indicam que, em
5 custo adicional mínimo, o sistema sensor pode estar localizado logo abaixo da superfície da terra com o painel solar e a antena estando localizados na torre de transmissão mais próxima.

A relação termomecânica entre a sag do condutor de fase e a temperatura média do condutor tem sido estudada exaustivamente e exten-
10 sivamente modelada^{2, 3, 4}. Vários pacotes de software comerciais, por exemplo, Sag10, LineAmps, EPRIS's DTCR Packet, e The Valley Group's IntelliCat, são baseados nos modelos anteriores. Dadas as informações mecânicas, de engenharia e dimensionais, específicas para o vão e o condutor sendo monitorados (por exemplo, tensão da linha, tipo e propriedades do
15 condutor, comprimento do vão), a temperatura média dos condutores no vão pode ser determinada a partir da medição precisa, em tempo real. Combinar a I_{rms} com o conhecimento preciso da sag e da temperatura, e incorporar a classificação estática do condutor (a última em função da temperatura), nos permite calcular a ampacidade. A diferença entre a ampacidade real em
20 tempo real e a I_{rms} real do condutor em tempo real é uma medida da margem, ou de capacidade adicional de transferência, disponível para os operadores, se os vãos monitorados não forem limitadas pelos espaços livres (sag) e/ou termicamente limitadas. Isto é a base para a classificação térmica dinâmica do circuito ("DTCT") e operação.

25 Referindo-se à Figura 1, o projeto preliminar do Sistema de Sensor suporta requerimentos muito baixos de energia contínua. Os subsistemas e componentes suportam a operação de ciclo de funcionamento baixo via os modos em espera, inativo e ativo-inativo. Os próprios transdutores não requerem energia, e para a maioria das concretizações, nenhum com-
30 ponente ou subsistema do sistema requer aquecimento ou resfriamento ativo (baseado em TEC). O sistema será energizado pela combinação de um painel solar Si 30V de alta eficiência 60 e por um arranjo de baterias Ni:MH (ou

ion de Li) recarregáveis 65; isto irá alimentar uma Fonte de Energia Comutada 55. Os dois componentes do sistema que mais requerem energia são o computador de placa única 35 e o transmissor de comunicações sem uso de fios 50, em 2,64 W. A combinação do painel solar 60 com o arranjo de baterias de alta eficiência carregadas aos poucos 65 irá fornecer ao sistema energia em todas as condições. Na escuridão, o arranjo de baterias totalmente carregadas 65 pode fornecer energia para o sistema por mais do que 60 horas; o tempo de recarga na plena luz do sol é menor ou igual a 7 horas. Dadas as constantes de tempo termomecânicas dois condutores de fase aéreos, a divulgação ativa em intervalos de 7,5 ou 10 minutos deve ser totalmente suficiente para suportar todas as atividades de monitoramento e/ou DTCR do usuário final. Na divulgação em 7,5 minutos, o ciclo de funcionamento eficaz da energia do sistema será aproximadamente de 6,7%.

As discussões técnicas da tecnologia DTCR sempre tratam dos parâmetros a serem monitorados e dos tipos de sensores, mas sempre especulam quanto ao número, localização e espaçamento dos mesmos. É bem-conhecido que a localização, a rota, a direção, a elevação e a topografia de um circuito, e seu direito de passagem, possuem efeitos muito significativos sobre a temperatura e, portanto, sobre a sag e o espaço livre dos vãos do condutor de alta voltagem. Se, por exemplo, um circuito tiver 5, 10, 20 ou talvez mais, direitos de passagem diretos ou milhas de circuito no nível do solo, e com uma única direção de compasso, é plausível que um único sensor, localizado no vão de regulação (ou no vão crítico) pudesse proporcionar a informação desejada de sag de limitação de ampacidade em tempo real e de temperatura. Entretanto, os direitos de passagem de transmissão longos, diretos, através de tipos únicos de terreno e de vegetação, e em altitude constante, não representam uma fração significativa de direitos de passagem e de milhas de circuito nos Estados Unidos.

Mais comumente, existem várias alterações na direção, topografia, e na elevação ao longo de um dado circuito; tais alterações afetam a radiação solar incidente, a velocidade do vento, a direção do vento, a temperatura ambiente e a umidade. A topografia, vegetação da superfície e geologia

da superfície; do terreno que se alteram possuem uma influência significativa sobre a temperatura do condutor e, portanto, sobre a sag; tais alterações frequentemente podem ser observadas em um vão baseado no vão. Estes fatores combinam para produzir a temperatura do condutor e a sag altamente dinâmicas e não prognosticáveis. Enquanto os sistemas climáticos, padrões e condições ambientes podem ser muito similares dentro de 8, 16,1 ou 24,1 km/h (5, 10 ou 20 milhas), em vários casos, mesmo assumindo parâmetros estáticos do direito de passagem, no curso de tempo de minutos ou horas podem ser vistas diferentes temperaturas ambiente, umidade, velocidade/direção do vento em pontos separados por tais distâncias.

Os vãos de regulação obviamente são localizações de sensor iniciais ou preestabelecidas. Entretanto, o vão de regulação é um vão uniforme do projeto assumido que aproximadamente retrata o comportamento termomecânico de um vão entre seus terminais. Seu propósito tem responsabilidade sobre o projeto e a construção de uma linha (sags e espaços livres são calculados para localização da estrutura e amarração do condutor), não com a operação através das estações e dos anos. Adicionalmente, enquanto um vão de regulação é um ponto inicial lógico, seu estado e comportamento termomecânicos podem não ser representativos do circuito como um todo.

Em resposta à infraestrutura envelhecida, aos significativos aumentos na carga média, e ao crescente problema de congestionamento, várias concessionárias, independentes dos operadores do serviço ("ISOs"), e organizações regionais de transmissão ("RTOs"), agora têm dados de levantamento de alta precisão sobre suas linhas de transmissão e direitos de passagem. Vários levantamentos recentes focaram os caminhos pesadamente carregados e congestionados, conhecidos, e revelaram a existência dos assim chamados "vãos críticos", isto é, vãos que não são com pouca frequência limitados pela sag; vão livre. Tais vãos críticos são candidatos óbvios para as colocações de sensor. Com tais dados de levantamento em mãos, tipicamente é possível designar um único vão mais crítico, mas frequentemente existem vãos adicionais que são, estaticamente, também críticos.

Como resultado, um dado caminho congestionado (ou pesadamente carregado) pode conter uma dúzia ou mais de vãos críticos que são, ou poderiam ser, indicados para a colocação de sensor.

A verdade é que atualmente não existe regra clara ou consenso quanto ao número e ao espaçamento do sensor. Cada cessionária, RTO, e ISSO é diferente, cada caminho congestionado é único, e um "vão crítico", à medida que utilizando o termo para designar uma colocação do sensor, é, por uma série de razões (algumas das quais são estatísticas), definido de forma diferente por diferentes entidades. É virtualmente certo que a determinação do número de sensores, a localização, e o espaçamento, serão determinados baseado em caso a caso, a saber, RTO por RTO, caminho congestionado por caminho congestionado. Se a história da compra dos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes ("IEDs") para as aplicações de sistema de transmissão e de distribuição ("A&D") for um guia, então, também é virtualmente certo que o número de sensores especificados será inversamente proporcional ao custo total instalado.⁶

À medida que mais corrente flui em uma linha de energia elétrica, a perda I^2R nos condutores causa um aumento na temperatura da linha, com um alongamento correspondente dos condutores da linha devido à expansão térmica. Desde que os condutores sejam suportados em pontos fixos (por exemplo, nas torres), existirá uma alteração na altura do condutor à medida que a corrente aumenta, e esta alteração na altura do condutor causa uma pequena alteração no campo B como medido no nível do solo.

Geometria e Corrente da Linha

Este estudo utiliza duas configurações que são típicas das linhas de transmissão da classe 500 kV como apresentadas nas Figuras 2 e 3. Como apresentado na Figura 2, uma linha possui um desenho horizontal dos condutores de fase 200, 210, 220, e podem existir dois condutores de proteção montados simetricamente acima dos condutores de fase (não-apresentados). A Figura 3 retrata uma linha verticalmente empilhada com um único fio aéreo de proteção e três condutores de fase 300, 310, 320.

Esta análise despreza os condutores aéreos de proteção e qual-

quer corrente que possa fluir nos mesmos. Na configuração horizontal da Figura 2, uma altura típica da linha é $h = 17,4$ m e as separações entre os condutores de fase são $d = 10,67$ m. Para a configuração vertical do condutor da Figura 3, a altura do condutor de fase A é pega como sendo $h = 17,4$ m e as separações dos condutores de fase são $d = 9,14$ m.

As voltagens nas linhas da Figura 2 estão 120° fora de fase uma em relação a outra. Tomando a referência da fase de 0° como estando nos condutores da fase B, as voltagens da linha podem ser expressas em notação fasora como

$$\begin{aligned} V_A &= V_o e^{-j2\pi/3} \\ V_B &= V_o e^{0} \\ V_C &= V_o e^{+j2\pi/3} \end{aligned} \quad (1)$$

Observe que estas voltagens estão equilibradas e que sua soma é zero: $\sum_i V_i = 0$.

As correntes que fluem nas linhas dependem das cargas elétricas conectadas com a linha. As concessionárias tentam equilibrar estas cargas de modo que as correntes da linha também fiquem equilibradas. Entretanto, não é sempre possível e algumas vezes existirá uma corrente total, ou de sequência zero I_0 fluindo, como

$$\sum_i I_i = I_0 \quad (2)$$

Além disso, devido as cargas elétricas na linha poderem ser reativas, não existe garantia de que as correntes possuam a mesma fase que a voltagem, nem que as fases estejam exatamente 120° separadas. À medida que o tempo varia, é esperado que tanto as amplitudes como as fases relativas dos fasores da corrente possam alterar, dependendo do estado do carregamento elétrico da linha.

Se for assumido que as fases da corrente são idênticas às fases da voltagem, então a corrente da sequência zero pode ser escrita como

$$I_o = I_A e^{-j2\pi/3} + I_B + I_C e^{+j2\pi/3}$$

$$= \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - I_A I_B - I_A I_C - I_B I_C} \quad (3)$$

Estimativa de Densidade do Fluxo Magnético

Para calcular o campo B produzido por uma linha de energia aérea, o ponto inicial é utilizar a lei de Biot-Savart⁷, a qual proporciona o campo magnético (H) na vizinhança de um condutor longo transportando uma corrente aparentemente estática I. Para um condutor teoricamente infinito, o campo H a uma distância r a partir do fio, produzido pela corrente é na direção $\hat{\phi}$, e é expresso como

$$H_{\phi}(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A/m}). \quad (4)$$

A densidade correspondente do fluxo magnético (campo B) a redor do fio é dada por $\vec{B} = \mu_o \vec{H}$, onde $\mu_o = 4 \pi \times 10^{-7}$ (H/m). Assim, o campo B é

$$B_{\phi}(r) = \frac{\mu_o I}{2\pi r} \quad (\text{teslas})$$

$$= 200 \frac{I}{r} \quad (\text{nanoteslas}) \quad (5)$$

Pela lei de Lenz, a voltagem de circuito aberto induzida em uma bobina de fio com n voltas com a área A está relacionada com a derivada de tempo do campo B ligando a bobina por

$$V(t) = -nA \frac{dB}{dt} \quad (\text{volts}). \quad (6)$$

Para um campo B de harmônica de tempo com frequência f, a amplitude de pico da voltagem da bobina do circuito aberto é dada por

$$|V(f)| = 2\pi f nA B \quad (\text{volts}). \quad (7)$$

A relação simples entre o campo B e a voltagem do circuito aberto da repetição na equação (7) implica que tal repetição pode ser utilizada como um sensor para medir o campo B produzido por uma linha de energia

aérea. Por consequência, uma linha de energia pode ser modelada como três condutores aéreos nas localizações (x_i, y_i) através de um terra de condução. Para cada condutor na linha, o campo B em uma localização de observação (x_0, y_0) pode ser expresso em termos de uma contribuição direta na forma da equação (4) mais uma contribuição surgindo a partir da presença do terra com perdas. As expressões para o campo B a partir de um único condutor através do terra foram desenvolvidas por Wait⁸ e posteriormente utilizadas por Olsen⁹ para uma linha trifásica como esta na Figura 2.

A partir de Olsen, os componentes Cartesianos do campo B nas localizações x_0, y_0 , são dados por uma soma de três termos surgindo a partir das correntes em cada condutor por

$$B_x(x_0, y_0) = -200 \sum_{i=1}^3 I_i \left[\frac{(y_0 - y_i)}{r1_i^2} - \frac{(y_0 + y_i + \alpha)}{r2_i^2} \right] \text{ (nT)} \quad (8a)$$

$$B_y(x_0, y_0) = 200 \sum_{i=1}^3 I_i \left[\frac{(x_0 - x_i)}{r1_i^2} - \frac{(x_0 - x_i)}{r2_i^2} \right] \text{ (nT)}. \quad (8b)$$

Nas expressões acima, o primeiro termo no colchete é a contribuição direta do campo B a partir do fio, e o segundo termo surge a partir do efeito terra. Este segundo termo aparece como uma *imagem* do condutor aéreo na terra em uma distância complexa $(y + \alpha)$, onde y é a altura do condutor em questão, e α é a distância complexa dependente da frequência, dada por

$$\alpha = (1 + j) 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma_g f_0}} \text{ (m)}. \quad (9)$$

Os termos $r1$ e $r2$ são as distâncias a partir do fio e da imagem até o ponto de observação, respectivamente, e são dados por

$$r1_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \text{ (m)} \quad (10a)$$

$$r2_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 + y_i + \alpha)^2} \text{ (m)} \quad (10b)$$

Efeito do Terra sobre o Campo B

Para ilustrar o comportamento do campo B produzido por uma linha de energia aérea e avaliar os efeitos do terra de condução, é instrutivo considerar uma única linha condutora (por exemplo, uma linha como esta na Figura 2 com a corrente fluindo somente na fase B 200). Para uma linha alta de 10,3 m, a Figura 8 apresenta um gráfico do campo B vertical normalizado (B_y/I) em 60 Hz para diferentes condutividades terra, utilizando a rigorosa análise de Wait e a análise de imagem aproximada por Olsen. O eixo geométrico x deste gráfico representa a distância horizontal do ponto de observação a partir da linha, e próximo a linha, é observado que a imagem complexa e os modelos exatos concordam, e que os efeitos terra não são muito significativos.

Um terra real possui uma condutividade elétrica σ que se situa entre 0,1 e 0,0001 S/m. A partir da Figura 9, observamos que para esta faixa de condutividade, a resposta do campo B para pontos de observação menores do que 200 metros a partir da linha é muito igual a esta do condutor de fase isolado. Assim, próximo a linha, os efeitos terra são desprezíveis e o segundo termo nos colchetes na equação (8) podem ser omitidos. O campo B é calculado apenas pelas contribuições a partir das correntes do condutor de fase.

Análise das Figuras 2 e 3

É instrutivo representar graficamente o campo B sob a linha do condutor 3 da Figura 2. A Figura 2 inclui uma representação gráfica de campo magnético para a linha de condutor 3 com a corrente trifásica possuindo diferenças de fase de 120° e amplitude de 400A. O componente vertical (y) do campo B é um máximo sob a fase central (200), e o componente horizontal (x) é maximizado em cerca de $x = \pm 14$ metros, o que é próximo da localização horizontal dos condutores de fase externos (210 e 220).

É notável na Figura 2 que a amplitude máxima do campo B é um fator de cerca de 3 menor do que no caso de três condutores com as mesmas magnitudes de corrente e fases idênticas.

É interessante considerar o comportamento dos campos B no grupo sob a linha alternativa, como apresentado na Figura 3, a qual tem os condutores empilhados verticalmente. A Figura 3 apresenta os componentes vertical e horizontal do campo B sob esta linha, e deve ser observado que o comportamento destes componentes são inversos a estes da linha com condutores horizontais. Ou seja, para a linha com condutores verticalmente empilhados 300, 310, 320, o componente horizontal (x) do campo b é máximo sob a linha, e os campos verticais (y) são maximizados em $x = \pm 14$ metros.

Efeitos da Corrente de Sequência Zero

Para avaliar a importância da presença de uma corrente de sequência zero fluindo na linha de transmissão da Figura 2, o modelo de cálculo foi utilizado com as correntes da fase A e C iguais a 1300A, a qual é próxima do máximo. A corrente da fase B 200 é igual a $1300 + I_0$, onde a corrente de sequência zero I_0 é permitida variar de zero até 100 A. cada uma destas correntes possui uma diferença de fase de 120° uma da outra.

Os valores de pico dos campos B (campos de densidade de fluxo magnético) são relativamente insensíveis a presença da corrente de sequência zero. Pela colocação de sensores de densidade de fluxo magnético nestas localizações de campo de pico, o sistema irá proporcionar dados úteis para estimar a sag da linha. Com relação a isso, a primeira colocação dos sensores na tem que ser arbitrária, mas ao invés disso, o sistema irá aproximar as localizações mais sensíveis para colocar os sistemas em precisão.

Estimativas de Sag da Linha

Com o modelo computacional para os campos B, é possível examinar e avaliar várias estratégias para estimar a sag da linha de transmissão devido ao aquecimento da linha. Algumas destas estratégias requerem estudo adicional, mas uma primeira etapa em desenvolver um método para estimar a sag da linha é examinar como os campos B medidos no terra alteram à medida que a altura da linha altera.

Além disso, no sistema da presente invenção, o valor da altura da linha é calculado muito precisamente, como apresentado na Figura 10,

para endereçar questões relacionadas com a sag da linha.

Método Computadorizado para Analisar Linhas Aéreas de Transmissão e de Distribuição

- Junto ao cenário das discussões acima, deve ser observado que
- 5 está dentro do escopo da presente invenção utilizar sistemas computadorizados para implementar os cálculos para determinar a magnitude da corrente, a fase da corrente e a altura do condutor de fase para qualquer dado sistema aéreo de transmissão e de distribuição de energia. Estes parâmetros podem então ser utilizados para modelar outros fatores tais como a temperatura da linha, a sag, o espaço livre, a ampacidade e a capacidade da linha. Como apresentado nas Figuras 1 a 3, o sistema computadorizado da presente invenção utiliza pares ortogonalmente orientados de sensores de campo magnético de cancelamento de campo elétrico 10, 12, 14, 16, 18 e 20 colocados sob os condutores de fase aéreos 200, 210, 220, 300, 310, 320.
- 15 Cada sensor em um par percebe um respectivo componente x ou y do campo magnético emanando a partir dos condutores de fase e portanto, não interfere no sistema de transmissão. Os componentes do campo magnético emanando a partir das linhas induzem as respectivas voltagens de circuito aberto em cada sensor, as quais servem como entradas para sistemas computadorizados maiores para cálculo de outros parâmetros de interesse no modelo.
- 20

Cada sensor (por exemplo, 10) no sistema é um aparelho capaz de medir a fase tridimensional e a magnitude do campo magnético emanando a partir de um condutor de fase. O sensor 10 possui pelo menos um par

25 de enrolamentos condutivos paralelos 21-23, 22-34 de polaridade oposta a partir de um terra comum. Os enrolamentos com polaridade oposta substancialmente cancelam o sinal de campo elétrico nos enrolamentos e geram uma voltagem de circuito aberto entre as extremidades não-aterradas de cada enrolamento. O resultado é que dois bons sinais de campo magnético

30 a partir das bobinas são imagens de espelho, positiva e negativa, uma da outra. O sinal do campo elétrico é o mesmo nos dois condutores a partir das bobinas. Por utilizar um dispositivo de entrada diferencial nos componentes

eletrônicos, o campo elétrico é rejeitado como um sinal do modo comum, e o sinal de campo magnético do modo diferencial é mantido.

Em uma concretização, os enrolamentos 21-23, 22-24 possuem uma área delimitada de pelo menos 150 voltas por metro quadrado. Os enrolamentos são enrolados ao redor de uma bobina substancialmente cilíndrica de modo que cada enrolamento fique separado virado ao redor das respectivas espessuras em seção transversal lado a lado da bobina. Em uma concretização preferida, os enrolamentos são do mesmo material, ligação e raio da volta. A bobina inclui um núcleo que pode ser fabricado de uma material de ferrita, de uma liga de níquel e ferro, ou de Metglass. ("liga de cobalto").

A voltagem induzida em cada sensor está relacionada com sua posição em relação aos condutores de fase aéreos, com o número de elos ou voltas nas bobinas do sensor, e com a taxa de alteração do campo magnético a partir dos condutores de fase. Deve-se ter em mente que as bobinas são sensíveis à derivada do tempo do sinal do campo magnético. Uma consequência disto é que as bobinas são duas vezes sensíveis à segunda harmônica de uma frequência fundamental (por exemplo, fundamental de 60 Hz no presente caso). As bobinas são três vezes tão sensíveis à terceira harmônica e assim por diante. Em uma concretização, o sensor está suficientemente próximo de um condutor de fase aéreo de modo que a voltagem de circuito aberto entre os enrolamentos seja de pelo menos 100 mV CA. Em uma concretização mais preferida, as voltagens de circuito aberto estão entre cerca de 100 e cerca de 400 mV CA.

É desejável operar o sistema dentro de uma faixa de frequências que evite a frequência ressonante das bobinas, ou enrolamentos, dentro de cada sensor 10. Por esta razão, as bobinas são configuradas para possuírem a frequência ressonante centrada em 4 kHz ou mais. Com uma frequência fundamental de interesse em cerca de 60 Hz, o sistema de acordo com a presente invenção opera bem abaixo da frequência ressonante das bobinas para uma resposta mais controlada e estável. As bobinas dentro dos sensores da presente invenção são projetadas de modo que a capacitância de interenrolamento seja extremamente baixa (aproximadamente 0,5 nF) e esta

baixa capacitância produz a frequência ressonante na faixa desejada de 4 kHz ou mais.

Deve ser observado que a saída do sensor 10 depende da carga nas bobinas dentro do sensor 10, como determinada pelos componentes eletrônicos de entrada. Se a carga for "impedância alta", então quase nenhuma corrente surge da bobina, e a saída medida é a voltagem. Se a carga for "baixa impedância", então corrente significativa ira surgir da bobina. Portanto, existe a possibilidade de que um sistema de baixa impedância, baseado nas medições de corrente induzida a partir do sensores, poderia ser utilizado para calcular os valores desejados para o sistema aéreo de transmissão e de distribuição.

Como citado acima, os sensores trabalham em pares e estão posicionados ortogonalmente sem cruzarem de modo a perceberem somente os componentes x e y dos campos magnéticos CA produzidos por um condutor de fase. Um sensor verticalmente posicionado (por exemplo, 12) possui um eixo geométrico horizontal e proporciona uma voltagem que pode ser medida induzida pelo componente x do campo magnético. Um sensor horizontalmente posicionado (por exemplo, 10) possui um eixo geométrico vertical e proporciona uma voltagem que pode ser medida induzida pelo componente y do campo magnético. Como apresentado na Figura 1, uma concretização mais preferida utiliza três pares de sensores ortogonalmente orientados 10, 12, 14, 16, 18, 20 posicionados no solo sob três condutores de fase aéreos.

As Figuras 4 e 5 apresentam detalhes adicionais de um sensor utilizado de acordo com a presente invenção. O sensor 10 possui dois enrolamentos 10a, 10b lado a lado em uma espessura de seção transversal do sensor. Um primeiro enrolamento 10a começa na extremidade 22 mais próxima do núcleo do sensor e enrola ao redor da circunferência do núcleo para um número desejado de voltas, desse modo terminal na extremidade solta 21 ao longo da circunferência externa do sensor 10. Como apresentado na Figura 5, a primeira extremidade (núcleo) 22 do segundo enrolamento 10b e a extremidade solta 21 do primeiro enrolamento 10a são conectadas com

um terra comum. Ma medição de voltagem diferencial fica então disponível entre os enrolamentos a partir da extremidade solta 23 do segundo enrolamento 10b e da primeira extremidade (núcleo) 24 do primeiro enrolamento 10a.

5 Um aspecto útil de pegar a medição de voltagem diferencial deste modo é que os enrolamentos com polaridade oposta 10a e 10b cancelam os campos elétricos gerados nos enrolamentos. O campo elétrico não é necessário para o sistema da presente invenção e somente distorce as medições desejadas de voltagem. Por cancelar os campos elétricos gerados nos
10 enrolamentos 10a e 10b, o sistema da presente invenção proporciona medições de voltagem mais precisas relacionadas somente com o campo magnético emanando a partir dos condutores de fase aéreos.

Continuando com a revelação da Figura 1, as voltagens de circuito aberto a partir dos sensores são entradas diferenciais para um respectivo filtro passa-baixa para cada sensor. Esta filtragem remove as harmônicas mais elevadas e proporciona somente os dados de interesse para a próxima etapa no processo. De acordo com considerações padrões do projeto, o filtro passa-baixa pode ser um filtro passa-baixa C, em particular, pode ser um filtro passa-baixa com uma frequência de corte de cerca de 98 Hz.

20 As medições analógicas de voltagem são então amostradas por um conversor de analógico para digital 25 (ADC) para digitalizar o processamento dos dados. Em uma concretização, o ADC possui oito canais e amostra os sinais de voltagem em 8000 amostras por segundo para produzir um número de 16 bits representando cada voltagem em tempo real medida
25 através dos pares de enrolamentos em cada sensor. Por incorporar um oscilador dentro do projeto de hardware, a invenção aperfeiçoa o desempenho do ADC 25 e proporciona um dispositivo conveniente para calcular a frequência dos sinais de voltagem.

30 As voltagens, obviamente, são induzidas através dos enrolamentos de cada sensor em resposta ao campo magnético a partir dos condutores de fase no sistema aéreo de transmissão e de recepção. Os números representando as voltagens em formato digital são alimentados para um

processador do computador 35 para análise de acordo com a presente invenção. Os sinais elétricos representados de forma digital proporcionam o fundamento para a habilidade do sistema em determinar a magnitude da corrente em cada condutor de fase aéreo, as fases e as frequências destas correntes, a altura, a sag, e o espaço livre de cada condutor de fase, a capacidade e a ampacidade de cada condutor e a temperatura das linhas.

De modo a proporcionar ferramentas de calibragem, dados do sensor, e uma verificação geral em relação ao sistema, a Figura 1 apresenta um telêmetro a laser para manualmente medir a altura dos condutores a partir do sensor e para determinar as posições geográficas dos sensores. Entretanto, a invenção abrange a possibilidade de utilizar uma base de dados pré-populada para considerar esta informação. Todos os dados a partir das medições de campo podem ser transmitidos via uma rede tradicional ou sem uso de fios (por exemplo, a Internet) para outros computadores e para outros centros de processamento de dados localizados remotos do ponto de coleta de dados. Finalmente, a Figura 1 também apresenta o suporte de bateria e de painel solar que permite a instalação no campo sem conexão com uma fonte de energia separada.

O sistema adicionalmente inclui um módulo de processamento de dados implementado em software para processar os dados digitais que representam as saídas de sinal de voltagem em tempo real a partir dos sensores. O módulo de processamento de dados é dividido em dois programas executáveis. O primeiro programa executável completa a aquisição de dados em tempo real. O segundo programa executável completa a análise em tempo real ou fora de linha.

O módulo de aquisição de dados dentro do sistema de processamento de dados inclui um filtro passa-banda digital para isolar a frequência fundamental do fluxo de dados representando cada sinal de voltagem em tempo real. O módulo de aquisição de dados pode ser adicionalmente dividido em um módulo de determinação de fase para identificar a fase de cada sinal de voltagem e em um módulo de determinação de amplitude para identificar a amplitude de cada sinal de voltagem. Cada um destes módulos é

discutido em maiores detalhes abaixo.

Em uma concretização da invenção, o módulo de determinação de fase calcula um produto interno do vetor (isto é, arranjo linear) de amostras de dados com um vetor contendo uma onda senoidal para obter um valor Q. O módulo adicionalmente calcula um produto interno das amostras de dados por um vetor contendo um cosseno de 60 Hz para obter um valor I. Finalmente, o valor de $\arctan \text{tg} (Q/I)$ produz a fase dos dados. "I" significa "em fase" e "Q" significa "quadratura". Isto também é conhecido como "produto escalar" dos dois vetores. As fases são opcionalmente ajustadas pelas mudanças de fase da bobina.

A invenção também inclui um módulo de determinação de amplitude que inclui um dispositivo para calcular os volts valor médio quadrático para cada canal dentro do conversor de analógico para digital 25. As amplitudes são dimensionadas pelas sensibilidades medidas da bobina, de modo que os dados são agora em unidades de volts por volta por metro quadrado. Por consequência, se a bobina X serrar 1 volts, e se ela tiver 1000 voltmetro ao quadrado, então o novo valor seria 0,001. Esta etapa permite a comparação mais fácil com resultados da simulação. A seguir, os dados de amplitude e de fase são suavizados (passam pelo filtro de passa-baixa) por um filtro de resposta finita.

Um exemplo mais detalhado do módulo de processamento de dados inclui os conversores de analógico para digital (ADCs) coletando leituras de voltagem em 8000 leituras por segundo durante 4 segundos. Estes 32000 números por ADC são enviados para um processador do computador 35 após um retardo de 1 segundo, de modo que o computador recebe 256000 números a cada 5 segundos. Em uma concretização preferida, cada um dos seis sensores no sistema envia dados para um dos 8 canais no conversor de analógico para digital. O sétimo canal é utilizado para a sincronização, e o oitavo canal é um sobressalente.

Os sinais a partir dos ADCs contêm o seno/cosseno de 60 Hz desejados, mas eles também incluem as harmônicas mais altas que devem ser filtradas para o software funcionar de forma apropriada. Para fazer isto, o

software filtra quaisquer sinais acima de 72 Hz e abaixo de 48 Hz. Isto é feito por "convolver" os 32000 números com um "núcleo do filtro", o qual é uma lista de 2001 números. A convolução é um modo de pegar duas listas de números (dois arranjos) e formar uma lista de médias ponderadas a partir das mesmas. Devido ao núcleo do filtro ser construído como prescrito por

5 padrões conhecidos, a média ponderada mantém sinais que estão entre 48 e 72 Hz. A lista organizada de números é mais curta do que a lista original, de modo que agora o sinal tem o comprimento de somente 29999 amostras, o que é mais do que suficiente para os propósitos neste documento.

10 Apesar de que para obter a fase se poderia verificar quando as voltagens ADC passam por zero, um modo mais preciso de fazer isto é como a seguir:

1. "Colocar na janela" os sinais ADC anteriormente filtrados. Ou seja, se o sinal ADC tiver o comprimento de 29999 números, fazer outra lista

15 de números, também com o tamanho de 29999, que começa em zero, gradualmente aumenta, então gradualmente volta para zero. Então, multiplicar cada número ADC pelo número correspondente na lista. Isto faz o sinal ADC se tornar zero no início, gradualmente aumentar, de modo que ele parece uma onda senoidal, então, gradualmente diminuir e ir para zero até o último,

20 o 29999-ésimo número. Em uma concretização, a função de janela é a janela de "Blackman". A janela de Blackman impede as alterações repentinas e abruptas nos dados (isto é, indo de zero até um valor mais elevado imediatamente) que causam erros em partes posteriores do sistema.

2. Construir uma onda senoidal perfeita de 60 Hz na memória do

25 computador. Este é o "seno do modelo", e da mesma forma que os valores ADC, isto tem o comprimento de 29999 números.

3. Construir uma onda de cosseno perfeita de 60 Hz, com 29999 números, a qual está 90 graus adiante da onda senoidal.

4. Multiplicar cada número da onda senoidal do modelo pelo

30 número ADC correspondente, e adicionar todos esses produtos. Isto é chamado de componente "I" ou "em fase".

5. De forma similar, multiplicar cada número da onda cosseno do

modelo pelo número ADC correspondente, e adicionar todos estes produtos. Isto é chamado de componente "Q" ou "quadratura".

6. Neste ponto, se poderia obter o arco tangente de I dividido por Q. Isto forneceria a fase do sinal, em radianos. Entretanto, desde que Q pode ser zero, e a divisão por zero causa problemas no software, o melhor método utiliza uma rotina de propósito especial que é prontamente disponível como "atan2". Esta rotina pega I e Q e calcula o ângulo sem o problema da divisão por zero. O ângulo é produzido em radianos, mas pode ser convertido para graus.

Para calcular a amplitude do sinal, se começa com a saída da "colocação em janela" na etapa 1 ao encontrar a fase. Com a lista de 29999 números, se calcula a raiz média ao quadrado (RMS) da lista (isto é, coloca cada número ao quadrado, adiciona todos os quadrados, divide por 29999, e tira a raiz quadrada). Então, se multiplica por um fator de correção para considerar o fato de que a janela de Blackman removeu algum sinal no início e no fim. Esta é a amplitude do sinal ADC que nós precisamos. As unidades são volts RMS.

Outro detalhe é que para economizar recursos do processador, se podem fazer várias otimizações para o filtro. Uma otimização é que ao invés de ajustar três correntes de cabos individuais, o software na verdade ajusta a razão das correntes nos condutores de fase exteriores 210, 220, 310, 320. Para ser consistente, a parte de amplitudes da bobina de "Q" é então baseada na razão das amplitudes da bobina. O efeito é reduzir o número de conhecidos e de desconhecidos por um.

De forma similar, ao invés de ajustar três fases do cabo, o sistema ajusta a diferença de fase das correntes nos condutores de fase externos 210 e 220 comparada com a corrente no condutor do meio 200. Isto reduz o número de conhecidos e de desconhecidos por um. Por consequência, o software realmente trabalha com 5 desconhecidos e 6 conhecidos.

No geral, a invenção permite um método computadorizado para remotamente medir a altura física de pelo menos três condutores de fase em um sistema de transmissão e de distribuição de energia em adição a magni-

tude e a fase das correntes no condutor de fase. O método inclui as etapas de posicionar um par ortogonalmente orientado de sensores de campo magnético de cancelamento de campo elétrico sob cada condutor, de modo que o campo magnético de um condutor de fase gere uma voltagem de circuito aberto entre as respectivas extremidades das bobinas nos sensores. A seguir, o método proporciona a medição das voltagens de circuito aberto em cada sensor e o software operacional em um processador de computador para determinar a altura, a magnitude e os parâmetros de fase do sistema.

O software da presente invenção utiliza a tecnologia de ajuste para calcular os parâmetros de interesse a partir das voltagens induzidas nos sensores. O ajuste possui duas partes: uma simulação de campo magnético e uma rotina repetitiva que tenta fazer o ajuste combinar com as medições. Um exemplo da rotina de ajuste é apresentado na Figura 11. A simulação de campo possui as seguintes entradas, as quais inicialmente são todas supostas:

- * As alturas de cabo. Todas são assumidas como sendo iguais.
- * As três correntes dos cabos individuais, em ampères RMS.
- * As três fases dos cabos individuais, em graus.

Em adição, a simulação precisa saber as posições esquerda e direita, e para cima e para baixo, das quatro bobinas, e suas orientações. O telêmetro a laser pode ser utilizado para obter estes dados.

A partir dos dados, a simulação prognostica que as saídas das bobinas devem ser: as quatro amplitudes de bobina (volts por volta por metro ao quadrado) e fases (graus). Em uma concretização, a rotina de ajuste executa as seguintes etapas:

1. Ela proporciona a simulação com suposições para os 7 valores desconhecidos listados acima.
2. Ela compara as quatro fases da bobina e as quatro amplitudes da bobina (8 valores conhecidos), preditos pela simulação com os valores medidos para calcular o valor de erro.
3. O ajustador varia os 7 desconhecidos, e tenta novamente. Se o erro aumentar, ela mantém o melhor valor.

4. Isto continua durante algum número razoável de repetições.

Os melhores ajustes constituem o conjunto de respostas incluindo a altura do cabo, as correntes e as fases. Como pode ser prontamente reconhecido, o sistema calcula 7 desconhecidos a partir de 8 medições. Por
5 consequência, na teoria, o problema é determinado com mais condições do que necessárias.

Em uma concretização mais preferida, as etapas do ajustador incluem designar estimativas iniciais para os parâmetros do sistema, os parâmetros incluindo a altura de cada condutor de fase, a corrente nos condu-
10 tores de fase e a fase destas correntes, e determinar os valores reais para as alturas dos condutores de fase, as correntes nos condutores de fase, e as fases das correntes pela operação de um loop de cálculo repetido dentro do software do computador. O loop de cálculo repetido inclui as etapas de:

(i) calcular o valor esperado das respectivas voltagens comple-
15 xas do circuito aberto nos sensores, que devem resultar a partir das estimativas iniciais designadas para cada altura, corrente e fase do condutor;

(ii) calcular o erro entre as voltagens medidas do circuito aberto em cada sensor e as voltagens esperadas do circuito aberto em cada sensor;

20 (iii) designar uma nova estimativa para pelo menos uma das alturas de condutor de fase, correntes e fases;

(iv) calcular repetidamente as etapas (i), (ii) e (iii), via o processador do computador para minimizar o erro entre as voltagens complexas esperadas do circuito aberto e as voltagens complexas medidas do circuito
25 aberto em cada sensor; e

(v) determinar o conjunto real de valores para a altura de cada condutor de fase, a magnitude da corrente em cada condutor de fase, e a fase da corrente em cada condutor de fase a partir dos valores repetidamente determinados que minimizaram o erro para todos os parâmetros do siste-
30 ma.

A etapa de designar valores iniciais inclui designar valores iniciais para a altura, a corrente e para a fase de cada um dos três condutores

de fase, e a etapa de calcular a voltagem prognosticada em cada respectiva bobina inclui calcular o campo magnético percebido por cada bobina a partir de cada um dos três condutores de fase. A etapa de designar uma nova estimativa inicial para a altura, para a corrente e para a fase em um condutor de fase compreende avaliar se o valor de erro aumenta ou diminui quando a estimativa é aumentada ou diminuída por uma quantidade conhecida referida como o valor de excitação para este parâmetro.

Em outra concretização, a invenção é caracterizada como um método computadorizado para remotamente medir os parâmetros físicos associados com um sistema de transmissão e de distribuição de energia, os parâmetros incluindo a altura física de pelo menos três condutores de fase em um sistema de transmissão e de distribuição de energia, e a magnitude e a fase da corrente em cada condutor de fase. O método, de acordo com a presente invenção, inclui posicionar pelo menos três pares ortogonalmente orientados de sensores de campo magnético de cancelamento de campo elétrico, de modo que o campo magnético de cada condutor de fase gere uma voltagem de circuito aberto entre as respectivas extremidades das bobinas nos sensores, medir as voltagens de circuito aberto em cada sensor, e operar comandos de software de controle de computador via um processador de computador para determinar valores em tempo real dos parâmetros do sistema.

O software pode incluir comandos implementando as seguintes etapas:

(i) designar estimativas iniciais para os parâmetros desconhecidos do sistema para cada um dos três condutores de fase, os parâmetros do sistema incluindo a respectiva altura de cada condutor de fase, a magnitude da corrente em um respectivo condutor de fase e a fase da respectiva corrente;

(ii) calcular o valor esperado das respectivas voltagens complexas de circuito aberto em cada sensor resultantes das estimativas iniciais designadas para os parâmetros do sistema;

(iii) calcular o erro E_0 entre as voltagens medidas do circuito a-

berto em cada sensor e as voltagens de circuito aberto prognosticadas em cada sensor; e

(iv) calcular os valores reais dos parâmetros do sistema via a operação de um loop de cálculo repetido para cada sensor.

5 Em uma concretização preferida do software, o loop repetido de cálculo inclui:

(i) selecionar um parâmetro do sistema para ajuste;

(ii) incrementar um parâmetro selecionado do sistema por um valor de excitação;

10 (iii) calcular o valor predito das respectivas voltagens complexas de circuito aberto no sensor que deve resultar do parâmetro aumentado do sistema em conjunto com as estimativas iniciais designadas para os parâmetros restantes;

(iv) calcular o erro E^+ entre as voltagens medidas do circuito aberto no sensor e as voltagens prognosticadas do circuito aberto no sensor;

15 (v) decrementar o parâmetro selecionado do sistema pelo valor de excitação;

(vi) calcular o valor prognosticado das respectivas voltagens complexas do circuito aberto no sensor que devem resultar do parâmetro do sistema diminuído em conjunto com as estimativas iniciais designadas para os parâmetros restantes;

20 (vii) calcular o erro E^- entre a voltagem medida do circuito aberto no sensor e a voltagem prognosticada do circuito aberto no sensor;

(viii) armazenar o valor do parâmetro selecionado que minimiza o valor do erro;

25 (ix) selecionar o próximo parâmetro do sistema para ajuste, de modo que os parâmetros do sistema sejam repetidamente selecionados;

(x) repetidamente calcular as etapas (ii) até (ix) para determinar qual conjunto de valores de parâmetro do sistema minimiza os valores de erro entre as voltagens complexas prognosticadas do circuito aberto no sensor e as voltagens complexas medidas do circuito aberto nos sensores. O método computadorizado executa o loop de cálculo repetido para cada sen-

30

sor simultaneamente.

Como citado nas concretizações acima anteriormente descritas, o método inclui a etapa de digitalmente amostrar as voltagens do circuito aberto em cada sensor (por exemplo, em 8000 amostras por segundo) e determinar a frequência da corrente em cada condutor de fase por comparar os parâmetros reais do sistema com um oscilador. Ao calcular o valor esperado para as voltagens do circuito aberto, o método e sistema neste documento calculam a densidade do fluxo magnético na qual cada sensor operaria para um dado conjunto de parâmetros do sistema. Com relação à etapa (viii) do loop de cálculo repetido acima, a etapa de calcular o valor para o parâmetro selecionado que minimiza o valor de erro, o método preferido subtrai uma razão de equações diferenciais do valor do parâmetro selecionado do sistema. Mais especificamente, a razão diferencial é determinada pelo cálculo da primeira derivada da função de erro do sistema dividida pela segunda derivada da função de erro do sistema. Este cálculo útil foi primeiro realizado devido ao fato de que a função de erro utilizada neste método é uma equação quadrática.

Uma narrativa mais detalhada das etapas de ajuste é útil para entender a invenção. Quando o ajustador é chamado a primeira vez, alguma suposição inicial quanto a "resposta" tem que ser proporcionada. A suposição poderia ser que a altura do cabo é 18 metros, as correntes nos cabos são todas 100 Amps, e as fases são + 120, 0, - 120. As fases também poderiam ser mudadas para - 120, 0, e + 120. A próxima etapa é calcular um número referido como "erro", ou "E" de forma reduzida. Se a suposição estiver exatamente correta, o erro é tão pequeno quanto possível e próximo de zero. Tecnicamente, isto é chamado "minimizar o erro". Para os propósitos neste documento, o termo "minimizar" é utilizado no senso de forçar o valor de erro para o mais próximo possível de zero. É impossível para o erro ser sempre exatamente zero, porque, como explicado anteriormente, o erro é uma soma dos quadrados de erros individuais, e a função de colocação ao quadrado torna todos os pedaços do erro positivos, e os pedaços sempre irão possuir pelo menos algum erro devido as fontes de ruído, tal como o

ADC, e interferência externa. Em qualquer caso, quanto mais uma suposição de parâmetro é errada, maior é o número E.

Neste ponto, o cálculo é o loop lógico tradicional. à medida que o software repetidamente faz o loop, ele faz seu caminho através da lista de parâmetros ajustáveis. Estes são as alturas do condutor de fase (assumidas como sendo todas as mesmas), as correntes do condutor, e as fases. Para cada um destes parâmetros, existe uma lista de tamanhos de excitação, D_i , os quais são alterações menores na altura (1 cm), alterações menores na corrente (alteração de 1%) e alterações menores na fase (0,01 grau). Se o tamanho de excitação for zero, então este sinal não é ajustado para este parâmetro, e o loop não faz nada. isto é conveniente porque a fase do cabo do meio é sempre zero, e assim, ela não precisa ser ajustada.

Para começar, refira-se ao erro já calculado como E_0 . O software ajusta o parâmetro correntemente avaliado e diminui o mesmo pelo tamanho de excitação associado com este parâmetro. A seguir, o software calcula o erro para este valor de parâmetro ajustado e denomina este valor E^- . O software também vai na direção oposta por aumentar o parâmetro por um valor de excitação e calcular o erro E^+ . Utilizando E_0 , E^- e E^+ , o software calcula um novo melhor valor para este parâmetro. A fórmula para obter um novo valor X_i é:

- Novo $X_i = X_i - (E'/E'')$, quando E' é a primeira derivada e E'' é a segunda derivada de $E(X_i)$.
- $E' = (E^+ - E^-)/(2D_i)$, novamente onde D_i é o tamanho de excitação.
- $E'' = ((E^+) + (E^-) - (2E_0))/(D_i^2)$.

O sistema agora possui um novo X_i , mas no caso das fases, o novo X_i pode estar fora da faixa "legal" de - 180 até + 180 graus. Se este for o caso, então o software adiciona ou subtrai 360 graus para "embrulhar" o mesmo de volta para a faixa. O novo X_i é utilizado para calcular um novo erro E_0 , e o loop continua até que o erro esteja dentro de uma tolerância definida.

Se a análise dos dados utilizar a etapa descrita acima para otimizar recursos com as razões correntes e com as diferenças de fase, a pró-

xima etapa é converter as razões das correntes nos cabos para correntes reais. Para fazer isto, o sistema pega a voltagem a partir de uma das bobinas (por exemplo, a bobina Bx e divide a mesma pelo que os resultados do ajustador fariam a corrente ser. a razão será um numero grande, o qual é multiplicado pelas correntes nos cabos para obter as correntes reais nos cabos.

Ainda a partir de outra perspectiva, o sinal de erro é basicamente uma comparação das voltagens complexas a partir das bobinas com as voltagens complexas a partir de um programado "preditor de forma de onda" que "prediz" o que as bobinas veriam baseado nas estimativas para os parâmetros, referido geralmente como Xi. Se as voltagens da bobina preditas exatamente combinarem com as voltagens medidas, então o erro é zero. o valor de E (onde D é utilizado como delta) é:

- $E = (Dv_{12} + Dv_{22} + \dots + Dv_{62}) Wv + Dp_{22} + \dots + Dp_{62}) Wp$
- onde $Dvi = (Vmi/VmBY) - (Vpi/VpBY)$ (este é o erro a partir de uma voltagem da bobina)
- e $Dpi = (Pmi - PmBY) - (Ppi - PpBY)$ (este é o erro a partir de uma fase da bobina).

O significado do subscrito "i" é um número da bobina, o qual pode ser de 0 até 5 (devido a existirem 6 bobinas).

Os "m" significam "medido" e os "p" significam "predito".

Os "W" são "pesos", os quais são utilizados para ajustar o quanto sensível nós somos as voltagens ou fases (por exemplo, $Wv = 1,0$, e $Wp = 10^{-5}$).

Em outras palavras, a primeira parte do erro é a soma dos quadrados das diferenças das razões das voltagens da bobina que são medidas em relação a estas preditas. A razão para a bobina i é a voltagem a partir da bobina i dividida pela voltagem a partir da bobina B_Y, a qual é a bobina sob o condutor central que percebe o componente vertical do campo magnético. A segunda parte do erro é a soma dos quadrados das diferenças entre as fases relativas medidas e as fases relativas preditas. Relativa significa a fase a partir da bobina B_Y o que significa subtrair a fase de B_Y da fase da bobina i.

Adicionando as duas partes, e esta soma é o erro que o ajustador utiliza.

Predizer as voltagens da bobina é o trabalho do "preditor de formas de onda". O preditor de forma de onda pega como entradas as localizações no espaço dos cabos e das bobinas (a localização do cabo pode alterar, à medida que ele vai para cima e para baixo). Ele também utiliza as orientações da bobina e as orientações do cabo. Ele utiliza as suposições quanto a quais são as correntes nos cabos e as fases. O processo utilizado na programação do preditor de forma de onda é uma aplicação convencional de teoria eletromagnética (equações de Maxwell), a qual é resumida, em parte, abaixo.

O campo B em qualquer localização de observação é a soma dos campos produzidos por cada condutor de fase.

$$B_x(x_o, y_o) = -\frac{\mu_o}{2\pi} \sum_{i=A}^C I_i \left[\frac{(y_o - y_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T)$$

$$B_y(x_o, y_o) = \frac{\mu_o}{2\pi} \sum_{i=A}^C I_i \left[\frac{(x_o - x_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T).$$

onde $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ (H/m). Nestas equações, x_1 e y_1 representam as coordenadas x e y dos condutores de fase.

As equações 1a e 1b são derivadas a partir de considerações magnetoestáticas. Entretanto, pode ser apresentado que para frequências suficientemente baixas (na faixa de kHz) ou para sinais temporários lentamente variantes (como as correntes da linha de energia de 60 Hz), as representações estáticas ainda são válidas. Assim, para as correntes do condutor de fase que variam com o tempo, como em **Erro! Fonte de referência não-encontrada**, a resposta do campo B temporário em " $x_0 y_0$ " é escrita como

$$B_x(t; x_o, y_o) = -\frac{\mu_o}{2\pi} \sum_{i=A}^C I_i(t) \left[\frac{(y_o - y_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T)$$

$$B_y(t; x_o, y_o) = \frac{\mu_o}{2\pi} \sum_{i=A}^C I_i(t) \left[\frac{(x_o - x_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T).$$

Os sensores de campo magnético possuem respostas que são

proporcionais a frequência no domínio espectral

$$V(f) = -j 2\pi f A_{eq} B(f),$$

onde A_{eq} é a área equivalente do sensor. No domínio do tempo, isto é uma relação derivada como

$$V(t) = -A_{eq} \frac{d}{dt} B(t).$$

5

Como uma consequência, as voltagens medidas do sensor no domínio do tempo podem ser expressas em termos das correntes nos condutores como

$$V_x(t; x_o, y_o) = \frac{\mu_o}{2\pi} A_{eq} \sum_{i=A}^C \frac{dI_i(t)}{dt} \left[\frac{(y_o - y_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T)$$

$$V_y(t; x_o, y_o) = -\frac{\mu_o}{2\pi} A_{eq} \sum_{i=A}^C \frac{dI_i(t)}{dt} \left[\frac{(x_o - x_i)}{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \right] \quad (T).$$

Estas relações, e outras técnicas similares, são programadas o preditor de
10 forma de onda para uso em uma concretização preferida da invenção.

A invenção foi testada em testes de campo ao vivo com resultados consistentemente excelentes. As Figuras 9 e 10 apresentam os parâmetros calculados do sistema em relação a valores conhecidos para os condutores de fase reais em operação para um sistema aéreo ao vivo de transmissão e de distribuição de energia. Os valores calculados, os quais resultaram
15 na tecnologia descrita e reivindicada neste documento, rastreiam valores conhecidos para um grau de precisão altamente aceitável.

No relatório descritivo e nas Figuras, foram descritas concretizações típicas da invenção. A presente invenção não está limitada a tais concretizações ilustrativas. Os termos específicos foram utilizados somente em
20 um senso genérico e descritivo, e não para propósito de limitação. O escopo da invenção é exposto nas reivindicações seguintes.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema computadorizado para determinar a localização física de condutores de fase (200, 210, 300, 310, 320) em adição à magnitude, fase, ou frequência da corrente nos condutores de fase (200, 210, 300, 310, 320),
5 o sistema compreendendo:

um aparelho para medir a fase tridimensional e a magnitude do campo magnético emanando a partir dos condutores de fase (200, 210, 300, 310, 320), o dito aparelho compreendendo pelo menos um par de sensores de campo magnético ortogonalmente orientados (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20)
10 para posicionamento de forma remota a partir de um condutor de fase (200, 210, 300, 310, 320), os ditos sensores (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20) compreendendo pelo menos um par de enrolamentos condutivos coaxiais (10a, 10b) possuindo polaridade oposta a partir de um terra central comum, os ditos enrolamentos (10a, 10b) com polaridade oposta substancialmente cancelando o
15 sinal do campo elétrico nos ditos enrolamentos (10a, 10b) e gerando uma voltagem de circuito aberto entre as respectivas extremidades de cada enrolamento (21 e 24, 22 e 23);

caracterizado pelo fato de que apresenta

um conversor analógico para digital com múltiplos canais para
20 amostrar a voltagem induzida do circuito aberto;

um módulo de processamento de dados implementado em um computador para processar os sinais digitais a partir do conversor de analógico para digital, os ditos sinais digitais representando as saídas de sinal de voltagem em tempo real dos ditos sensores (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20), o dito
25 módulo de processamento de dados compreendendo:

pelo menos um filtro passa-banda digital para isolar pelo menos a frequência fundamental de cada sinal de voltagem;

um módulo de determinação de fase para identificar a fase de cada dito sinal de voltagem a partir de cada dito sensor;

30 um módulo de determinação de amplitude para identificar a amplitude de cada dito sinal de voltagem a partir de cada um dos ditos sensores (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20).

2. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a dita voltagem do circuito aberto é uma entrada diferencial para um filtro passa-baixa.

5 3. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que adicionalmente compreendendo um filtro passa-baixa conectado com cada um dos ditos pelo menos um par de sensores de campo magnético (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20) para filtrar o sinal de voltagem do circuito aberto gerado por cada um dos ditos enrolamentos (10a, 10b).

10 4. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o dito filtro passa-baixa é um filtro passa-baixa RC.

5. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o dito filtro passa-baixa RC possui a frequência de corte de 98 Hz.

15 6. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que adicionalmente compreende um oscilador para aperfeiçoar a precisão do conversor de analógico para digital.

20 7. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito aparelho é posicionado de forma remota a partir dos condutores de fase (200, 210, 220, 300, 310, 320), porém dentro do campo magnético mensurável emanando a partir dos ditos condutores de fase (200, 210, 220, 300, 310, 320).

25 8. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito conversor de analógico para digital amostra os sinais de voltagem em 8000 amostras por segundo durante 4 segundos.

9. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a saída de cada dito conversor de analógico para digital é um número de 16 bits representando voltagens.

30 10. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito módulo de determinação de fase e o dito módulo de determinação de amplitude utilizam uma janela de Blackman.

11. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado pelo fato de que o dito módulo de determinação de amplitude proporciona uma saída da magnitude do sinal de voltagem em volts de valor médio quadrático.

5 12. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito aparelho para medir o campo magnético compreende pelo menos três pares de sensores (10 e 12, 14 e 16, 18 e 20) proporcionando seis sinais de voltagem.

10 13. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que cada sensor em um par é posicionado ortogonalmente ao outro sensor neste par para perceber somente os componentes X e Y dos campos magnéticos AC produzidos por um condutor de fase (200, 210, 220, 300, 310, 320).

15 14. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito conversor de analógico para digital é um conversor de analógico para digital com oito canais, aceitando medições de voltagem a partir de cada sensor.

15. Sistema computadorizado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito sistema energizado por um painel solar.

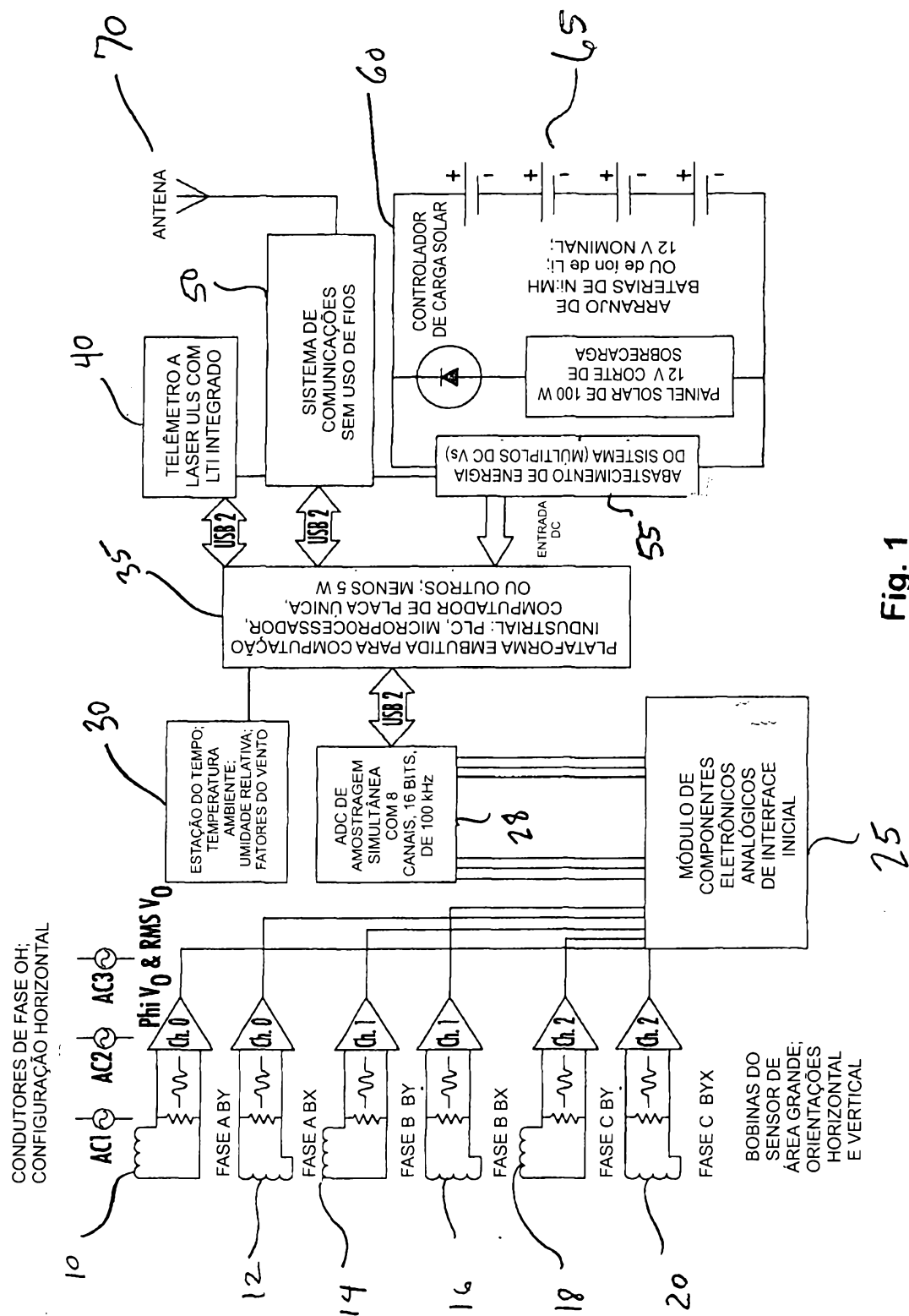


Fig. 1

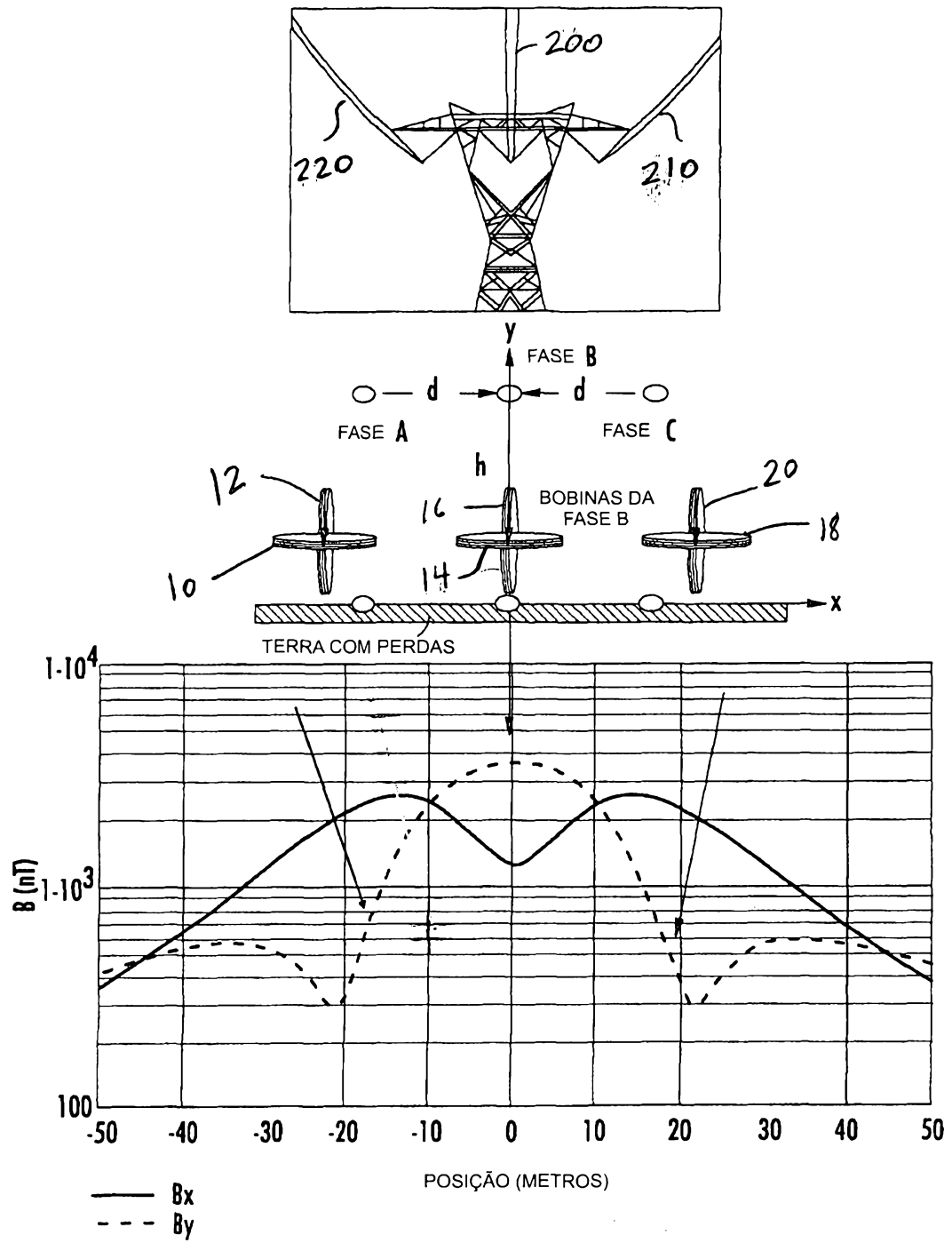


Fig. 2

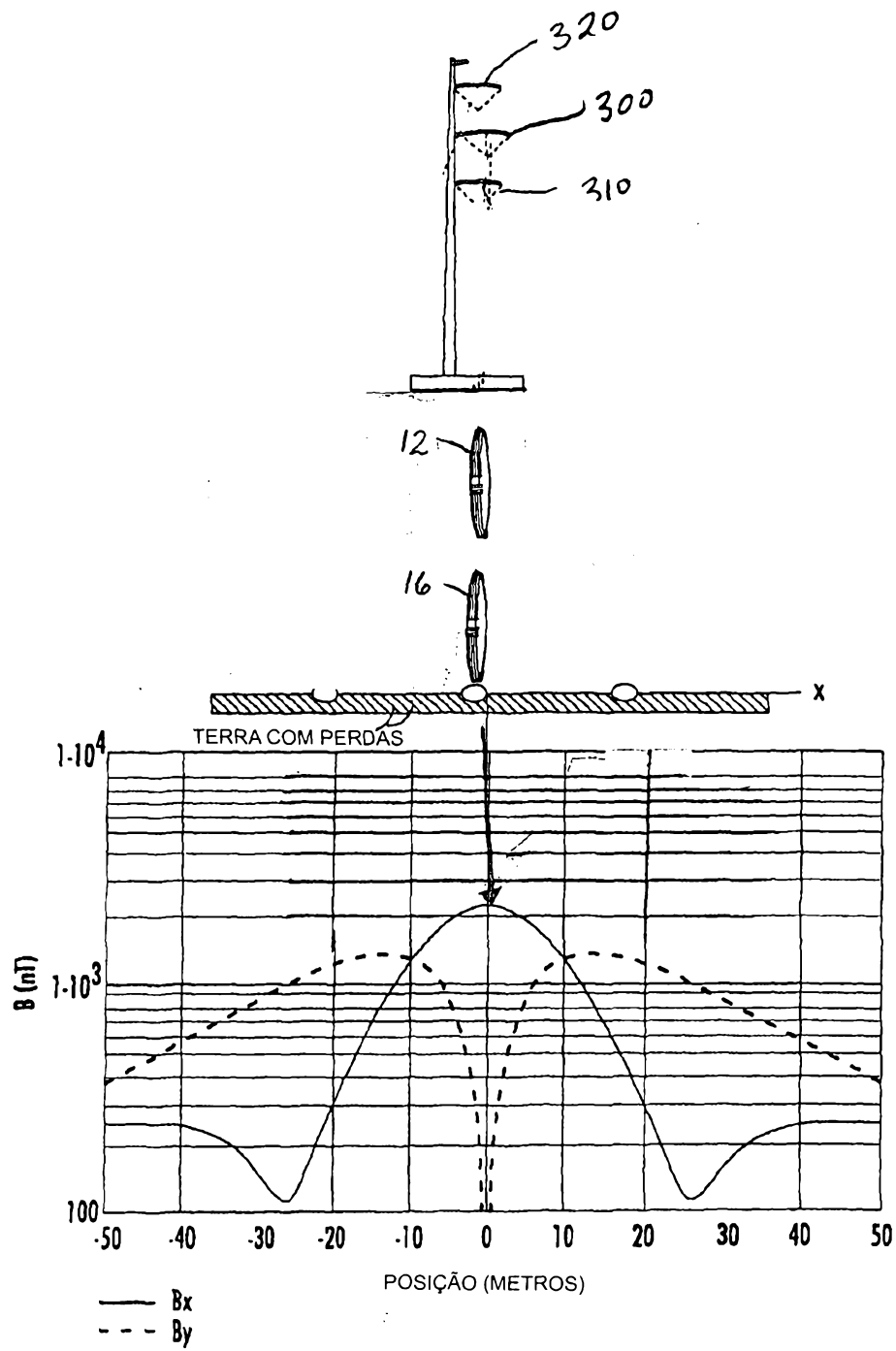


Fig. 3A

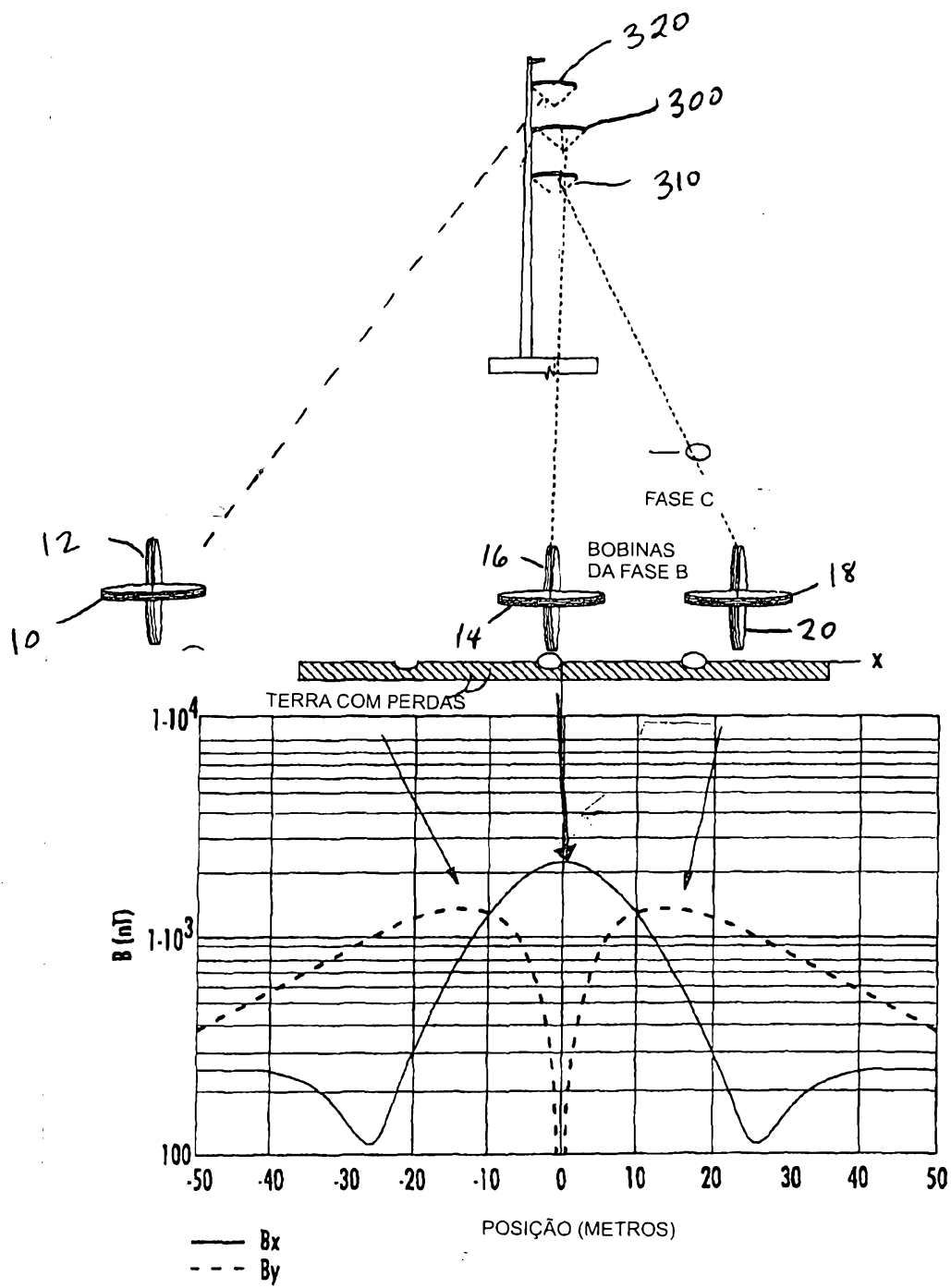
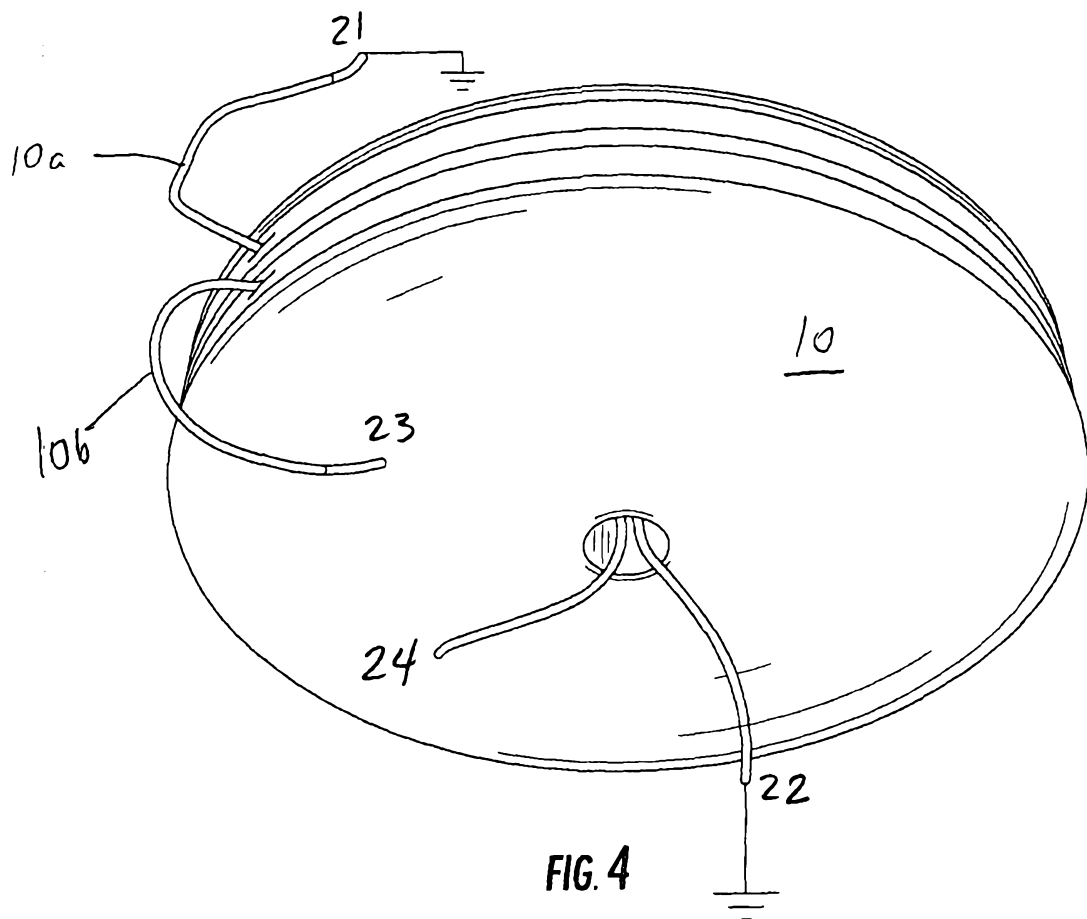


Fig. 3B



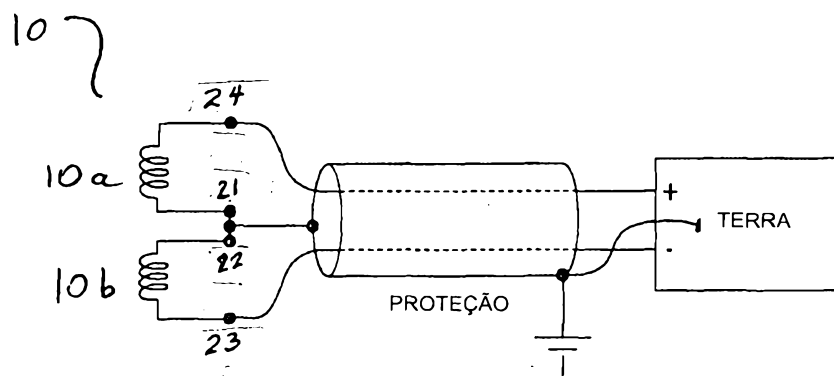


Fig. 5

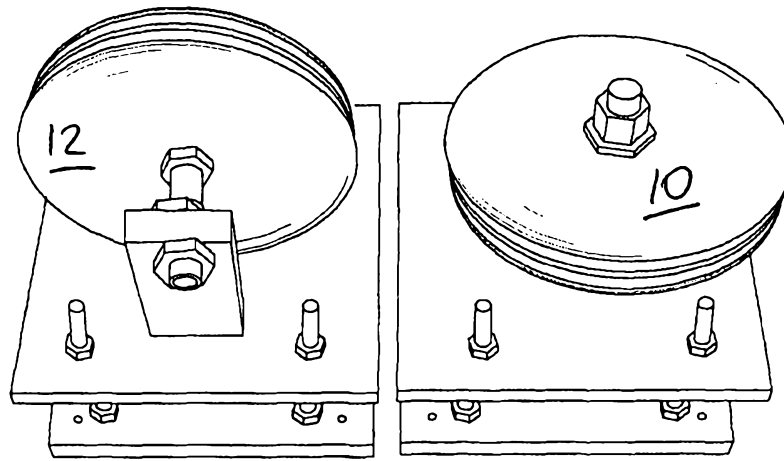


Fig. 6

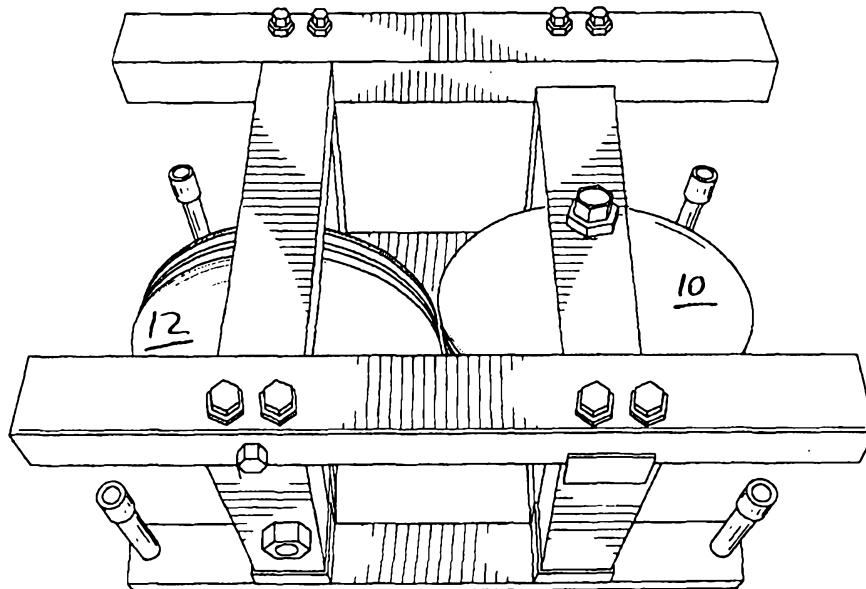
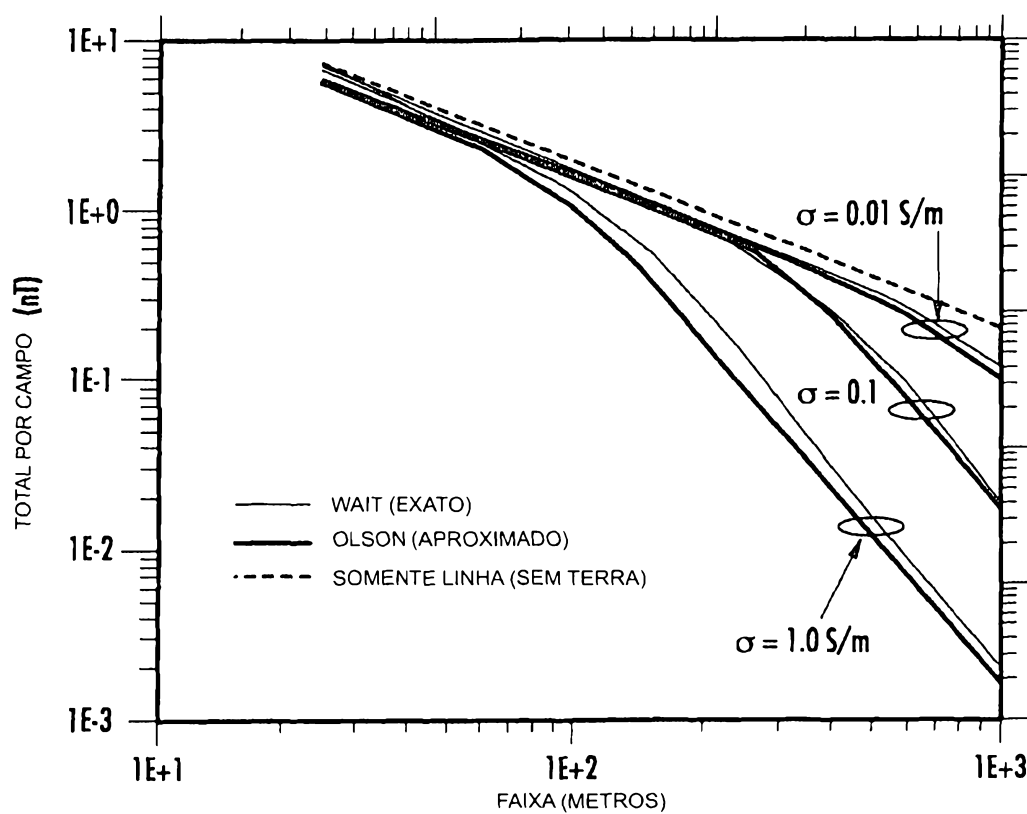


Fig. 7



REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO COMPONENTE DO CAMPO TOTAL BY (VERTICAL)
NA TERRA EM 60 Hz PARA UMA LINHA ALTA DE FASE ÚNICA COM 10,3 MM, EM FUNÇÃO DA FAIXA

Fig. 8

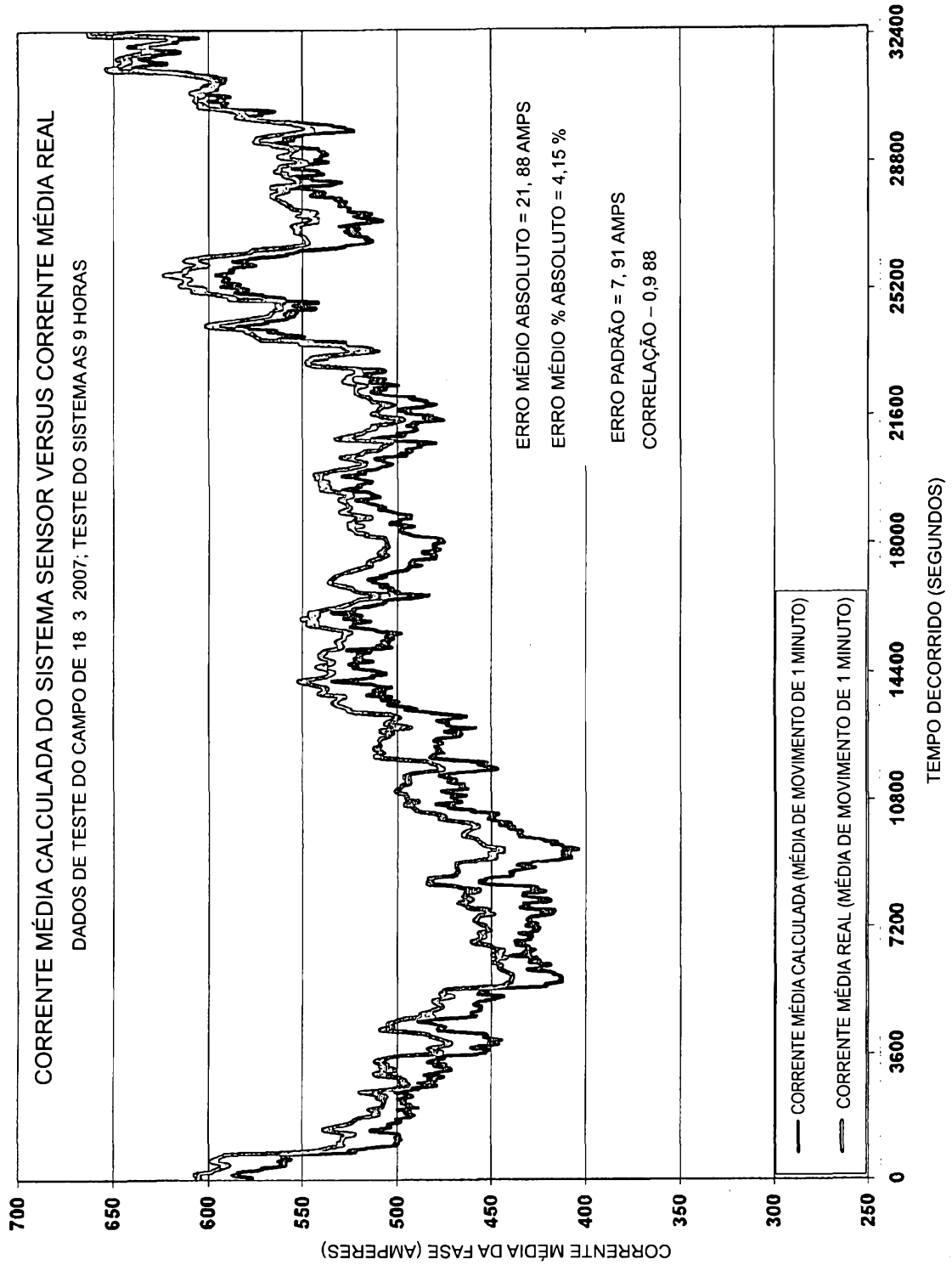


Fig. 9

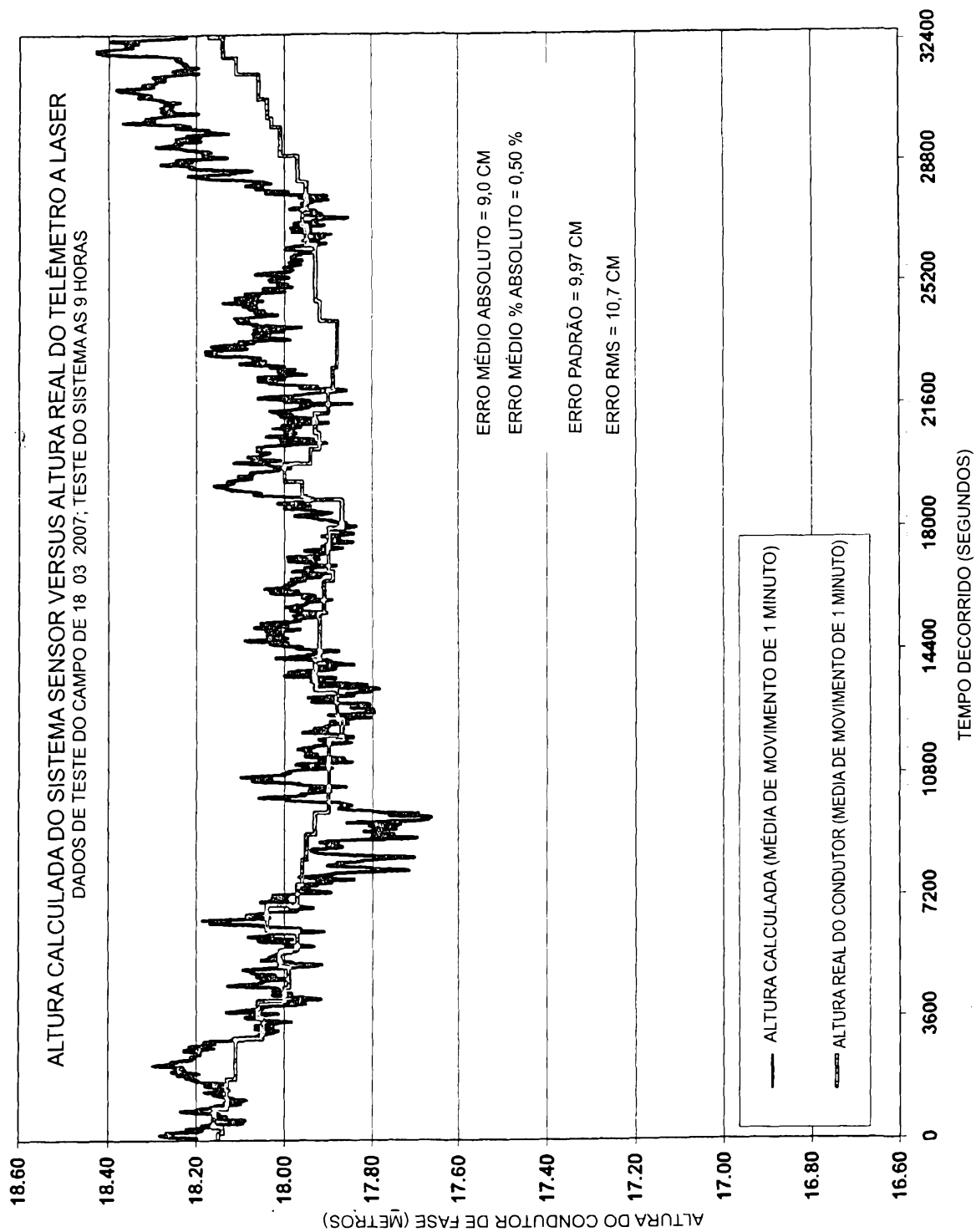


Fig. 10

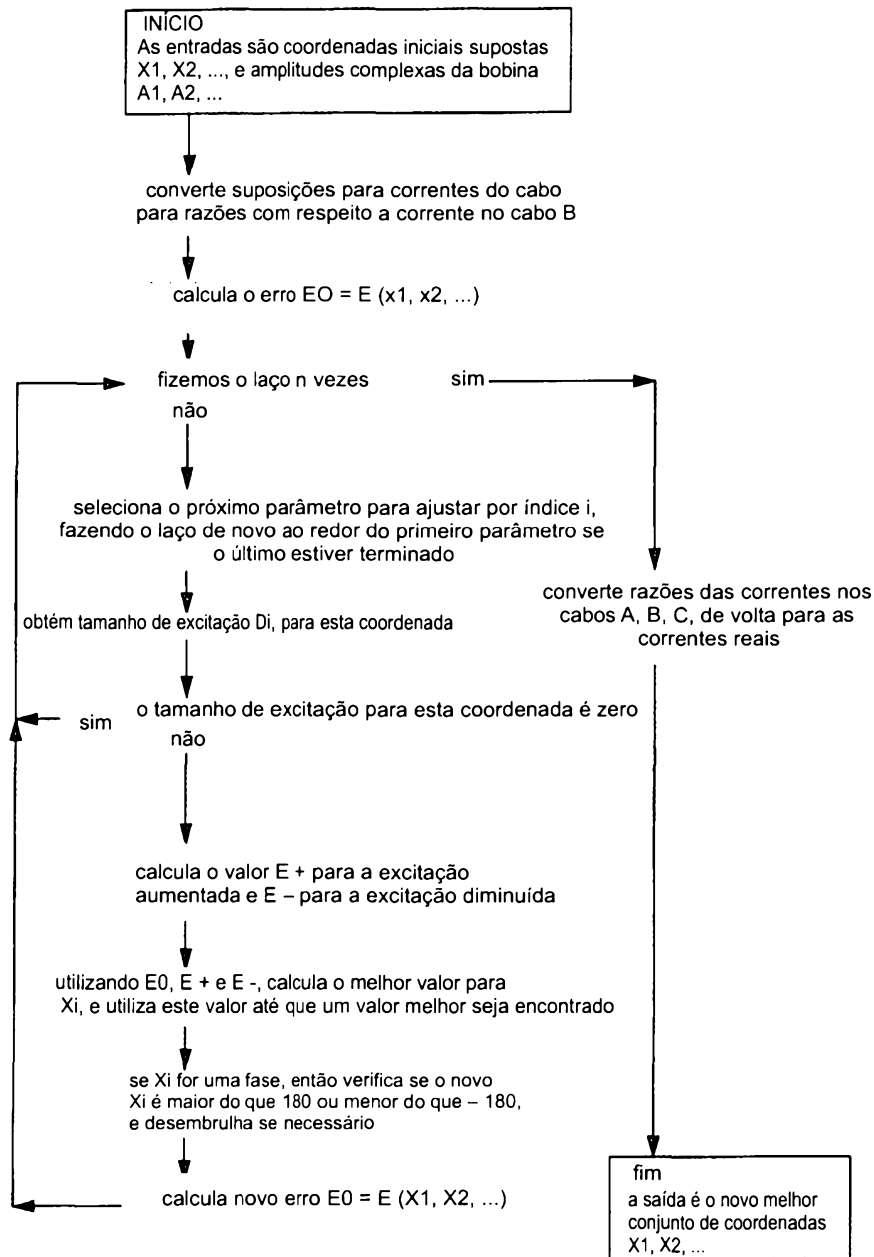


FIG. 11