

Desenvolvimento de um sensor de campo elétrico alternado com transmissão por fibra-óptica

V. Swinka Filho*, R. Robert**

*Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento

**Departamento de Eletricidade

Universidade Federal do Paraná

Recebido 30 de novembro 1998

Este trabalho mostra o desenvolvimento de um sensor de campo elétrico que utiliza o princípio da carga induzida por campo elétrico alternado em superfícies condutoras. O sensor é composto por duas semi-esferas de alumínio isoladas eletricamente e possui um circuito eletrônico incorporado alimentado por baterias e um sistema de transmissão por fibra-óptica ligado à uma unidade remota para leitura do sinal. O desenvolvimento do circuito eletrônico para tratamento do sinal é descrito em blocos utilizando as funções de transferência de cada estágio. Também é mostrado o método de calibração e os resultados dos ensaios realizados com um gerador de campo elétrico, o qual é formado por um capacitor de placas planas e paralelas. Os resultados dos ensaios com o sensor mostram a possibilidade de desenvolver um medidor de campo elétrico comercial com boas especificações técnicas, como exatidão, linearidade, repetitividade e baixo desvio com a temperatura ambiente, e que pode ser aplicado a princípio em dosimetria ou na análise do desempenho externo de isoladores de alta tensão.

In this work the development of an electric field sensor which uses the induced charge principle in conducting surfaces by an alternating electric field is shown. It is composed by two electrically insulated hemispheres and battery operated electronics with a fiber optic transmission system linked to a remote unit for signal reading. The development of the processing signal electronics is described in blocks with transfer functions for each stage. The calibration method and tests results carry out with an electric field generator which is composed by a parallel plate capacitor also is shown. The test results show that it is possible to develop a commercial electric field instrument with good technical specifications such as accuracy, precision, repeatability and low temperature drift. The sensor may be applied in exposure measurements or in performance analyses of high voltage insulation.

I Introdução

A medida de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica teve sua importância destacada inicialmente nos anos 70, quando foi levantada a questão sobre as possíveis interações de campos eletromagnéticos de frequência industrial com o corpo humano [1-5]. Além das aplicações em dosimetria os medidores de campo elétrico passaram a ser utilizados para determinar o desempenho de equipamentos elétricos. Como exemplo, pode ser citada a medida do campo elétrico em torno de um isolador de alta tensão [6] e com essa informação é possível otimizar o projeto desses equipamentos. Uma terceira aplicação

interessante para os sensores de campo elétrico é a utilização dos mesmos como medidores de alta tensão. Isto é possível através da instalação com geometria fixa e determinada, na qual o campo elétrico medido é proporcional a tensão no condutor próximo ao sensor.

Os medidores de campo elétrico alternado dividem-se basicamente, em três tipos: os de corpo isolado, os com referência à terra e os eletro-ópticos. Os medidores de campo elétrico do tipo corpo isolado operam medindo a corrente induzida pelo campo alternado entre duas seções isoladas de um corpo condutivo. Este tipo de medidor não necessita de referência à terra e normalmente é portátil e operado por baterias. Os medidores de campo elétrico referenciado à terra medem

a corrente para a terra de um eletrodo introduzido no campo elétrico a ser medido, e são utilizados para determinar campos próximos ao plano terra. Por último, os medidores de campo elétrico do tipo eletro-óptico que utilizam o efeito Pockels em cristais, onde o cristal sensor é acoplado por fibras-ópticas especiais, e não utiliza referência à terra.

II Desenvolvimento do sensor

Quando introduzimos um corpo qualquer, condutor ou dielétrico, numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, alteramos o campo elétrico na região ocupada pelo corpo e na sua vizinhança próxima. Assim, qualquer tipo de dispositivo sensor que utilizarmos para a medida do campo elétrico em determinada região do espaço, deverá ser capaz de determinar o valor do campo elétrico que existia na região do espaço antes da sua introdução. Os sensores construídos com materiais condutores e de formato esférico são os que geram menor distorção no campo a ser medido e, consequentemente, possuem uma maior exatidão [8]. Um outro fator a considerar é que, se existir um meio condutor elétrico entre o sensor e o dispositivo de leitura a ser utilizado, o potencial elétrico sofrerá modificação no ponto do espaço onde se deseja medir o campo elétrico e quando estivermos medindo o campo elétrico próximo a equipamentos energizados com alta tensão, estaremos modificando as condições de isolamento do equipamento, colocando em risco a segurança do operador e do equipamento.

Considerando o exposto acima, optamos pelo desenvolvimento de um sensor esférico metálico, com um circuito eletrônico incorporado e com a transmissão do sinal via fibra óptica [7]. Desta forma, teremos o sensor isolado galvânicamente do ponto de leitura e com potencial flutuante, ou seja, não referenciado à terra. Os instrumentos de medição de campo elétrico por carga induzida em superfícies condutoras, que não usam referência à terra, são classificados como “free body” [9] ou medidores do tipo corpo isolado.

II.1 Esfera condutora em um campo elétrico

Numa esfera condutora que está sujeita a um campo elétrico uniforme há um deslocamento de cargas na sua superfície, gerando uma distribuição não homogênea da densidade superficial de cargas, dada por [10]:

$$\sigma = 3\epsilon_0 E_{oz} \cos \theta \quad (1)$$

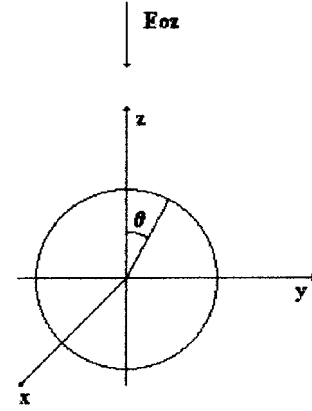


Figura 1

Esfera condutora em um campo elétrico

onde: σ é a densidade superficial de cargas; E_{0z} é a intensidade de campo elétrico antes de ser colocada a esfera; θ é o ângulo que o campo elétrico faz em relação ao eixo z e ϵ_0 é a permissividade do meio (ar).

Se isolarmos os dois hemisférios da esfera, de forma que possamos medir o deslocamento das cargas do hemisfério inferior para o superior, temos que a carga total deslocada, para uma esfera de raio a , será dada por:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma a^2 \sin \theta d\theta d\varphi = 3\pi\epsilon_0 a^2 E_{0z} \quad (2)$$

Agora, considerando que o campo elétrico aplicado varia senoidalmente com o tempo, temos:

$$E_{oz} = E_{\max} \sin(\omega t) \quad (3)$$

Onde E_{\max} é a amplitude do campo elétrico senoidal, ω é a frequência angular e t é o tempo. A carga induzida entre os dois hemisférios pelo campo senoidal será:

$$Q(t) = 3\pi a^2 \epsilon_0 E_{\max} \sin(\omega t) \quad (4)$$

Derivando (4) em relação ao tempo, obtemos que a corrente induzida será:

$$I(t) = 3\pi a^2 \epsilon_0 \omega E_{\max} \cos(\omega t) \quad (5)$$

A equação (5) mostra que a amplitude da corrente induzida I_{\max} entre os hemisférios é uma função linear da amplitude do campo elétrico E_{\max} , a menos de constantes que dependem da geometria, do meio onde o campo se estabelece e da frequência angular ω . A dependência da frequência angular não é desejável no desenvolvimento do medidor de campo elétrico. Por isso, ela pode ser eliminada por meio da integração eletrônica

do sinal de corrente medido, de forma que passamos ter um sinal, cuja amplitude independente da frequência do campo elétrico a ser medido.

II.2 Desenvolvimento do circuito

A função do circuito eletrônico incorporado a esfera condutora é amplificar o sinal de corrente induzida na esfera, de forma que sua amplitude seja independente da frequência, para que possa ser convertido em sinal óptico e transmitido via fibra óptica para um outro dispositivo que irá converter o sinal óptico em leitura de campo elétrico. O circuito eletrônico é representado na figura 2 em seu diagrama em blocos:

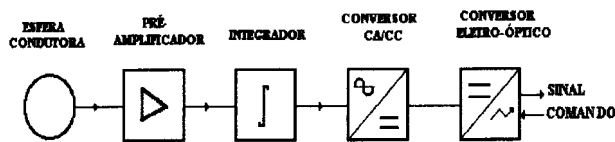


Figura 2

II.2.1 Pré-amplificador

O primeiro estágio para tratamento do sinal de corrente induzida na esfera é um amplificador operacional com alta impedância de entrada e baixa corrente de polarização. A configuração utilizada foi a de amplificador inversor, sendo um dos hemisférios da esfera ligado ao terminal comum do circuito e o outro ligado a entrada inversora do amplificador operacional, através de um resistor de baixo valor, como mostra a figura 3. Desta forma, a corrente induzida no hemisfério flui para a massa virtual na entrada inversora do amplificador operacional. Na entrada do primeiro estágio, temos:

$$V_0 = R_1 I(t) \quad (6)$$

A função de transferência para o amplificador inversor é dada por:

$$V_1 = -\frac{R_2}{R_1} V_0 \quad (7)$$

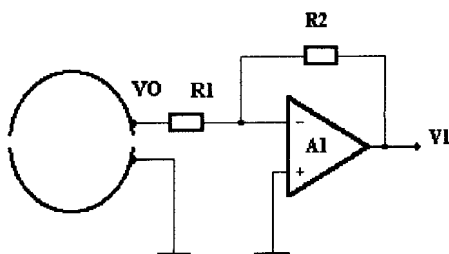


Figura 3

Substituindo as equações (5) e (6) na equação (7), podemos expressar o sinal de saída do primeiro estágio em função do campo elétrico:

$$V_1(t) = 3\pi\epsilon_0 a^2 \omega R_2 E_{max} \cos(\omega t + \pi) \quad (8)$$

II.2.2 Amplificador integrador

O segundo estágio para tratamento do sinal consiste de um amplificador operacional com configuração de amplificador integrador, representado na figura 4, cuja função é fornecer um sinal com amplitude independente da frequência angular ω . A função de transferência deste estágio é dada por:

$$V_2(t) = -\frac{1}{R_3 C_1} \int V_1(t) dt \quad (9)$$

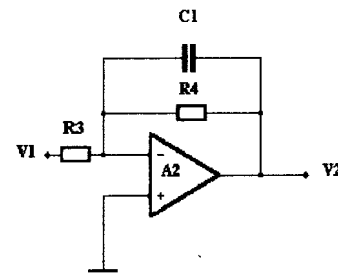


figura 4

Substituindo o valor de V_1 da equação (8) na equação (9) e integrando temos:

$$V_2(t) = \frac{3\pi\epsilon_0 a^2 R_2 E_{max} \sin(\omega t)}{C_1 R_3} \quad (10)$$

A equação (10) mostra que agora temos um sinal proporcional ao campo e com a mesma fase, e com a amplitude independente da frequência ω . Isto significa que, se o instrumento for calibrado em um campo elétrico de frequência 60 Hz, sua calibração continua válida para medir campos com frequências próximas, por exemplo, campos gerados por uma rede de distribuição de 50Hz.

Um outro fator importante a considerar é a presença de distorções harmônicas nas redes de distribuição. A equação (5) que expressa a corrente induzida na esfera em função do campo elétrico, mostra que a amplitude das componentes harmônicas na corrente induzida na

esfera é proporcional à frequência, causando uma diferença no sinal de campo elétrico na saída do primeiro estágio a qual é compensada no integrador com um ganho proporcional ao inverso da frequência.

II.2.3 Conversor CA/CC

O terceiro estágio consiste em um conversor CA/CC de precisão, representado na figura 5, onde o sinal senoidal é convertido para um sinal contínuo com valor proporcional ao valor de pico do sinal de entrada.

$$V_3 = \frac{3\pi\epsilon_0 a^2 R_2 E_{max}}{C_1 R_3} \quad (11)$$

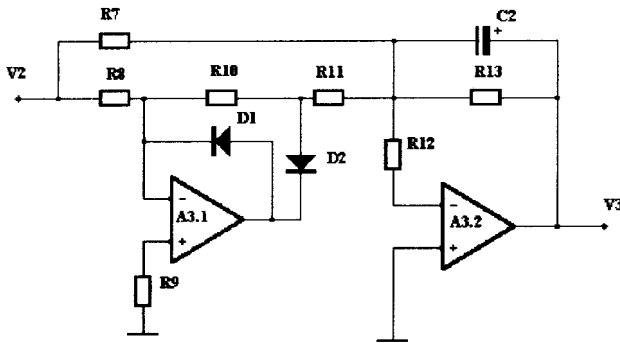


Figura 5

II.2.4 Conversor eletro óptico

O quarto e último estágio do circuito eletrônico incorporado ao sensor, consiste em um conversor de tensão em frequência, representado na figura 6, onde o sinal contínuo (V3) foi fixado para uma faixa de 0 à 4V, para qualquer faixa de campo elétrico. Esse sinal é convertido para um sinal de frequência de 0 à 4kHz, o qual é aplicado a um diodo emissor de luz (LED). Os pulsos ópticos na faixa de 660nm, são acoplados a uma fibra óptica plástica e transmitido para um outro dispositivo remoto que realizará a conversão dos pulsos ópticos em indicação do campo elétrico.

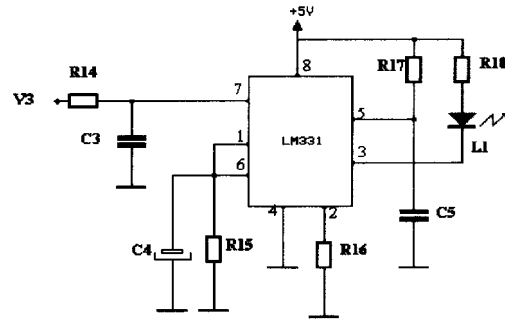


figura 6

A função de transferência que relaciona a frequência de saída em kHz, com o sinal contínuo na entrada (V3) em volts para o conversor LM331 utilizado é dada por:

$$f_s = \frac{V_3 R_{16}}{K R_{15} R_{17} C_5} \quad (12)$$

Onde K é uma constante do conversor.

Substituindo a equação (11) na equação (12), temos finalmente, a função de transferência total do sensor de campo elétrico, a qual relaciona a frequência dos pulsos ópticos de saída com o campo elétrico aplicado.

$$f_s = \frac{3\pi\epsilon_0 a^2 R_2 R_{16}}{K C_1 C_5 R_3 R_{15} R_{17}} E_{max} \quad (13)$$

II.2.5 Unidade remota

O sinal óptico em frequência transmitido pelo sensor deve ser tratado e convertido em indicação de campo elétrico. Para isso, primeiro convertemos os pulsos ópticos em sinal elétrico, usando um foto-transistor, e em seguida o sinal irá passar por um quadrador para ser entregue ao dispositivo que converterá em indicação de campo. Podemos usar como dispositivo conversor um multímetro digital portátil com frequencímetro. Desta forma, podemos converter a leitura em frequência (kHz) diretamente para campo elétrico em kV/m. Uma segunda função da unidade remota é enviar para o circuito eletrônico incorporado ao sensor um comando para que o mesmo só permaneça energizado durante a medição, isso é feito utilizando uma segunda fibra-óptica, e quando a unidade remota é energizada, a fonte do circuito eletrônico do sensor é também ativada. A unidade remota é representada na figura 7 em diagrama de blocos:

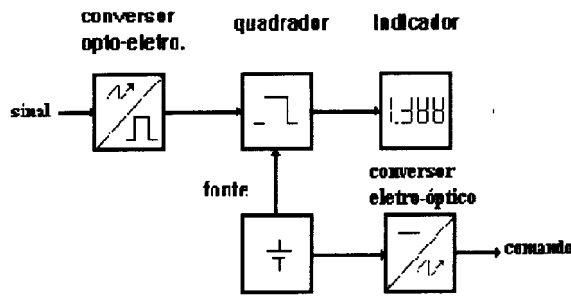


figura 7

Na figura 8 é apresentado o diagrama eletrônico da unidade de tratamento de sinal incorporada ao sensor.

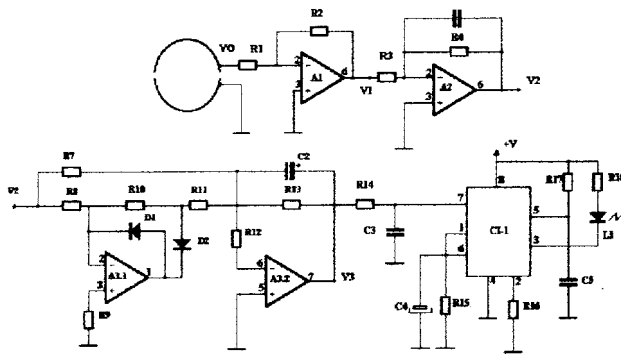


figura 8

III Determinação das faixas de medição

Como existe uma limitação para a frequência máxima transmitida pela fibra-óptica, limitação esta imposta pelos conversores de sinal óptico em eletrônico, foi padronizado que para qualquer faixa de medição de campo elétrico do sensor, o sinal de saída será sempre de 0 à 4 kHz. Desta forma, para determinar uma faixa de medição para o sensor precisamos calcular o valor do resistor R_2 do primeiro estágio. Como o conversor tensão-frequência converte de 0 à 4V para 0 à 4kHz, devemos impor na equação(10) uma tensão V_3 igual à 4 V para o valor final da faixa de medição do campo elétrico E_{\max} desejado. Agrupando as demais constantes na equação (10) e isolando R_2 , temos:

$$R_2 = \frac{4C_1R_3}{3\pi\epsilon_0a^2E_{\max}} \quad (14)$$

Com o valor de R_2 determinado para cada faixa de medição, podemos calcular o fator de escala F_e para

converter a leitura de frequência em campo elétrico

$$E = F_e f_s \quad (15)$$

Igualando as equações (13) e (15) temos que :

$$F_e = \frac{KC_1C_5R_3R_{15}R_{17}}{3\pi\epsilon_0a^2R_2R_{16}} \quad (16)$$

Podemos ter um sensor com diversas faixas de trabalho, fazendo a comutação do resistor R_2 através de micro-chaves mecânicas, ou ainda remotamente utilizando uma comutação com chaves analógicas comandadas por um sinal óptico através de uma terceira fibra-óptica.

IV Método de calibração

A calibração do sensor de campo elétrico pode ser realizada em laboratório, utilizando o método de injeção de corrente [9]. Para isso é necessário uma fonte padrão de corrente alternada para gerar uma corrente equivalente à corrente induzida pelo campo elétrico na superfície da esfera condutora. A variação da corrente induzida por unidade de campo elétrico será:

$$k = 3\pi\epsilon_0\omega a^2 \quad (17)$$

onde:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ Hz}$$

$$a = 4,6 \text{ cm}$$

Substituindo os valores numéricos das constantes temos:

$$k = 6,65 \times 10^{-11} \text{ A.m.V}^{-1}$$

Assim, para cada unidade de campo elétrico (V/m), teríamos que injetar uma corrente de 66,5pA. Para simular um campo de 10kV/m, que corresponde ao final da faixa do sensor, teríamos que injetar uma corrente de 665 nA. Como as atuais fontes de corrente disponíveis geram somente correntes com resolução de no máximo 1 mA, foi utilizado para gerar essas correntes a configuração mostrada na figura 9. Utilizando um resistor padrão de 100 kΩ com exatidão de 7 ppm em série com a entrada do circuito e uma fonte padrão de tensão na faixa de 0 à 100mV, foram geradas tensões de forma a obter as correntes relativas aos valores de campos simulados.

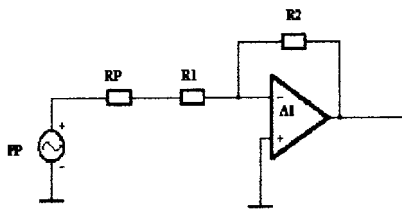


Figura 9

FP - Fonte de Tensão Padrão Yokogawa Electric Works - Tipo 2558 exatidão 0,08%

RP - Resistor Padrão 100 kΩ TETEX exatidão 7 ppm.

R1 - Resistor de Entrada do Sensor

Com os valores do sinal de frequência do sensor obtidos para cada valor de campo elétrico simulado por injeção de corrente (figura 10) foi realizada uma regressão linear e obtido os parâmetros para a curva de calibração do sensor:

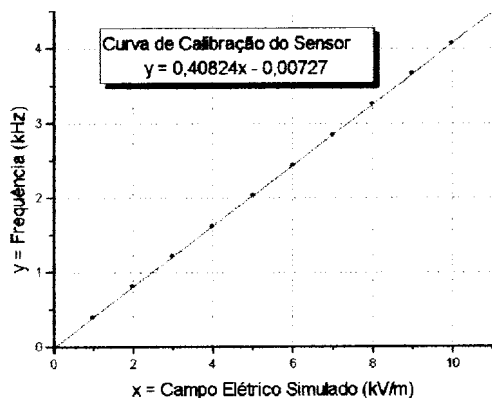


Figura 10

Os parâmetros da reta obtidos representam um bom ajuste e o coeficiente de correlação linear igual a um, indica um bom alinhamento dos pontos experimentais em relação a reta ajustada.

V Resultados dos ensaios e discussões

Exatidão

O campo elétrico gerado no interior de um capacitor plano de placas paralelas foi usado como valor verdadeiro [10-12]. Podemos verificar na figura 11, que a diferença entre o campo elétrico gerado e o campo elétrico medido, se mantém em um valor médio positivo próximo a 1,4%, indicando a existência de um erro

sistemático no processo de medição, o qual pode ser devido à geometria da montagem do capacitor de placas planas e paralelas ou ao método de calibração do sensor

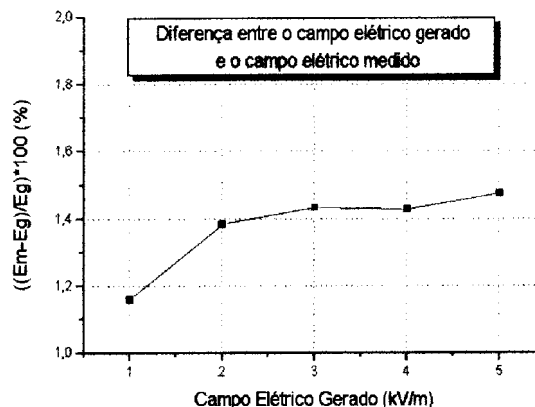


Figura 11

A máxima diferença encontrada, de 1,5%, define a exatidão deste processo de medida.

Precisão

Para obter um valor de precisão representativo deste processo de medição, foram realizadas diversas medidas do campo elétrico gerado, em diversos pontos da faixa de trabalho do sensor (figura 12).

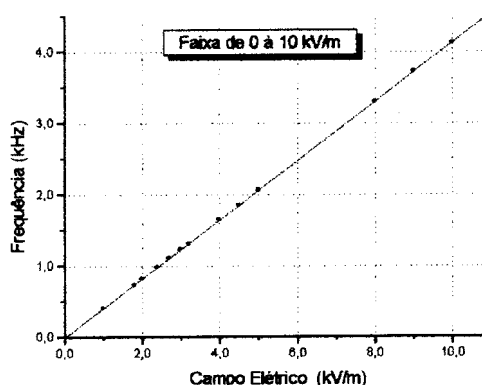


Figura 12

Na figura 13 é representada a dispersão para todos os valores de campo elétricos medido na faixa de trabalho do sensor de 0 à 10 kV/m.

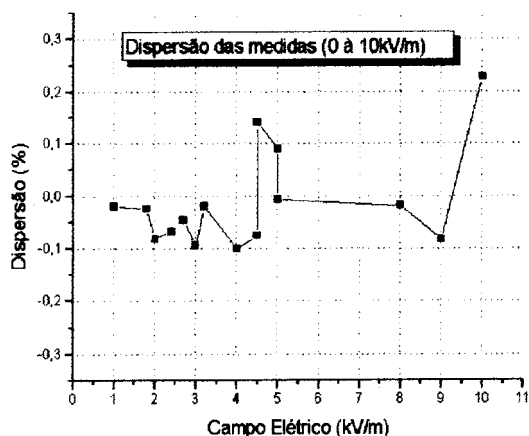


Figura 13

Considerando os valores máximos de dispersão observados podemos estabelecer a precisão do processo de medição em 0,25%

Repetitividade

A repetitividade foi avaliada com medições sucessivas, em intervalos de tempo de 5 minutos, para um mesmo valor de mensurando (50% da faixa), efetuadas sob as mesmas condições de medição [13-14].

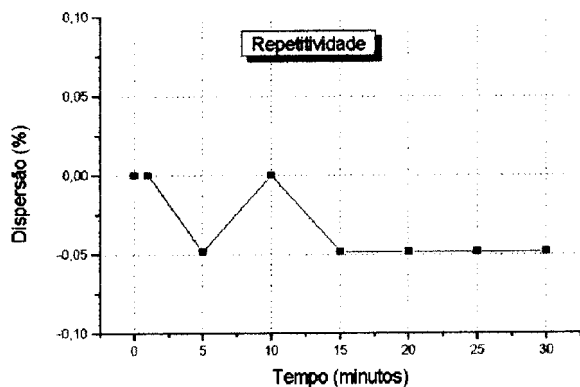


Figura 14

Podemos observar que o processo apresentou uma boa repetitividade, onde o valor da diferença observada de 0,05%, corresponde a flutuação na medida da frequência do sensor, a qual corresponde à variação de 1Hz em 2.064 Hz.

Linearidade

O resultado da regressão linear realizada nos dados das medidas na faixa de 0 à 10 kV/m, mostrada na figura 12, apresentou um coeficiente de correlação igual à 1, o que significa que as medidas estão bem alinhadas

com a reta ajustada. Podemos verificar visualmente no gráfico que não existe nenhuma tendência de não linearidade. Com base no exposto podemos quantificar o parâmetro linearidade como sendo menor que o valor determinado para a precisão da medida, ou seja, menor que 0,25%.

Desvio com a temperatura

Utilizando o método de injeção de corrente para simular um campo elétrico de 5 kV/m, correspondente a 50% da faixa de trabalho, o sensor foi colocado em um banho térmico, inicialmente à temperatura de 1°C até a temperatura máxima de 40°C. A variação do sinal de saída do sensor em função da temperatura, convertido em porcentagem em relação ao sinal fornecido a temperatura de 20°C, é mostrada na figura 15.

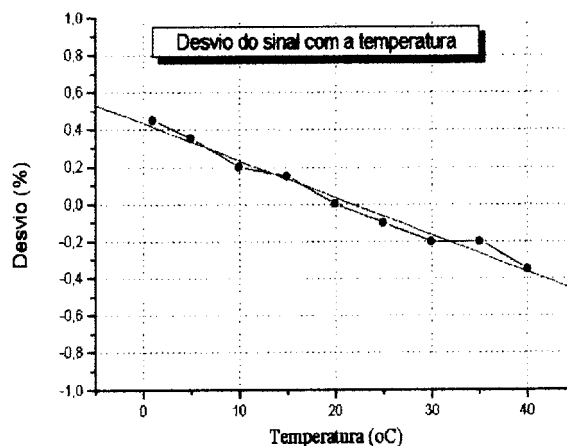


Figura 15

Utilizando o coeficiente angular da reta ajustada, verificamos que o sinal do sensor decresce 0,02% para cada unidade de acréscimo de temperatura, ou seja, temos um desvio de 0,02%/°C.

VI. Conclusões

- Exatidão: O valor de 1,5% obtido para a exatidão do processo medição está dentro do previsto na literatura para sensores do tipo corpo isolado, considerando que este ensaio na verdade é uma comparação entre o método de calibração de injeção de corrente utilizado e o campo elétrico gerado na região central do capacitor de placas planas e paralelas. No resultado de exatidão obtido devemos então considerar a incerteza do campo elétrico na região central do capacitor, esta incerteza é prevista em 1% pela IEC 833 [9], para as dimensões utilizadas na montagem do capacitor. Com isso podemos

concluir que se desconsiderarmos os erros sistemáticos devido à geometria do gerador de campo elétrico podemos encontrar um valor ainda melhor para a exatidão do sensor.

- Precisão: A análise das dispersões das medidas efetuadas na faixa de trabalho do sensor (1 a 10 kV/m) mostra que o processo possui uma boa precisão, ou seja apresenta pequenos erros estatísticos, já que o valor de 0,25% é a dispersão máxima das medidas, ou seja, considerando um nível de confiança de 100%.

- Repetitividade: O ensaio de repetitividade mostrou que o instrumento mantém sua calibração estável, e que o desvio encontrado de 0,05% é quatro vezes menor que valor máximo de dispersão encontrado no ensaio de precisão. Este fato mostra que as dispersões das medidas, ou seja as flutuações estatísticas, são causadas em grande parte pelo gerador de campo elétrico e não pelo sensor.

- Desvio com a temperatura - O ensaio mostrou que o sensor apresenta uma relação praticamente linear de 0,02%/°C dentro da faixa de variação da temperatura ambiente, isso significa que num caso extremo de variação de temperatura durante o dia de 10°C, teremos uma variação de 0,2% na calibração do sensor. Os resultados de uma forma geral mostraram que o sensor desenvolvido possui boas características comparado com os comerciais disponíveis, e que com um pouco de investimento na parte de engenharia de produto podemos desenvolver um medidor de campo elétrico portátil com indicação remota e que poderá ser utilizado em qualquer das aplicações mencionadas na introdução desse trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem: Ao Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento (LAC-UFPR/COPEL) pelo apoio técnico e utilização das instalações e equipamentos. Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

References

1. D. Hafemeister, "Biological Effects of Low-Frequency Electromagnetic Fields". *Am. J. Phys.*, **64**, 974 (1996).

2. J. D. Sahl, M. A. Kelsh, S. Greenland, "Cohort and Nested Case-Control Studies of Hematopoietic Cancers and Brain Cancer Among Electrical Utility Workers". *Epidemiology*, **4**, 104 (1993).
3. World Health Organization Geneva. *Environmental Health Criteria 35 Extremely Low Frequency (ELF) Fields*. 1984.
4. L.R.A. Gamboa, C.F. Melo, Medição de Campos Eletromagnéticos de 60 Hz em Linhas de Transmissão. Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento LAC-UFPR/COPEL, Relatórios CNEL 059A/95, 2062/95, 064/94.
5. K. H. Mild, M. Sandström, A. Johnsson, "Measured 50 Hz Electric and Magnetic Fields in Swedish and Norwegian Residential Buildings". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **45**, 710 (1996).
6. E. Gockenbach, P. Ganzmann, E. Brogli, Some Applications of an Electric Field Sensor in the High Voltage Technique. Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, 40.06, 1989.
7. V. Swinka Filho, Desenvolvimento de um Sensor de Campo Elétrico Alternado com Transmissão por Fibras Ópticas. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Paraná, 1996.
8. Z. Hui, Y. Feiyu, The influence of Probe on the Measuring Accuracy of Electric Field. 9th International Symposium on High Voltage Engineering, no. 8326 Graz Convention Center Austria, Europe, 1995.
9. IEC International Electrotechnical Commission (IEC Public. 833). Measurement of power frequency electric fields, 1987.
10. M. Misakian, P. M. Fulcomer, Measurement of Nonuniform Power Frequency Electric Fields. *IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-18* 657 (1983).
11. A. Braun, E. Brzostek, D. Kind, et. al. Development and Calibration of Electric Field Measuring Devices. Sixth International Symposium on High Voltage Engineering. New Orleans, LA, USA n. 40.09, 1989.
12. O. Bottauscio, G. Crotti, S. D'Emilio, et. al. "Generation of Reference Electric and Magnetic Fields for Calibration of Power-Frequency Field Meters". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **42**, 547 (1993).
13. Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo. Portaria Número 029 de 10 de março de 1995.
14. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Metodologia Básica para Aplicação de Técnicas de Confiabilidade Metrológica. Dezembro 1981.