

VITOLDO SWINKA FILHO

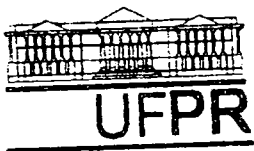
**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO  
ALTERNADO COM TRANSMISSÃO POR FIBRA-ÓPTICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Renê Robert

CURITIBA

1996



Ministério da Educação e do Desporto  
Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Exatas  
Curso de Pós-Graduação em Física

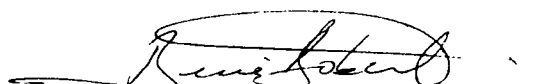
**ATA DA DEFESA DE TESE DE MESTRADO DO SR. VITOLDO SWINKA FILHO**

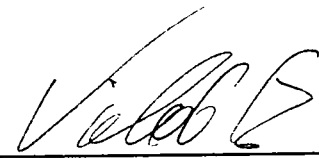
**TÍTULO DA TESE: "DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO  
ALTERNADO COM TRANSMISSÃO POR FIBRA ÓTICA"**

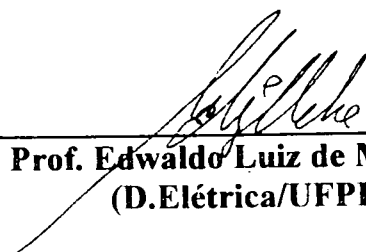
**Em sessão pública de Defesa de Tese, iniciada as quatorze horas e trinta minutos, nesta data, após um Seminário sobre o assunto da Tese e arguição pela Banca, esta decidiu atribuir Conceito 4.**

**Curitiba, 13 de dezembro de 1996**

**Banca Examinadora:**

  
**Prof. René Robert**  
**Presidente/Orientador - UFPR**

  
**Prof. Vólidi Costa Zambenedetti**  
**(CNAT/LAC)**

  
**Prof. Edwaldo Luiz de Mattos Mehl**  
**(D.Elétrica/UFPR)**

**Dedico este trabalho à minha esposa e filhos,**

**Martinha, Tiago e Bruna**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Renê Robert pela orientação segura e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento (LAC-UFPR/COPEL) pela utilização das instalações e equipamentos.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletricidade do LAC-UFPR/COPEL pelo apoio técnico e sugestões na montagem do gerador de campo elétrico e na realização dos ensaios.

Ao Sr. Atalício Antunes da Rosa do Setor de Mecânica da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento em Mecânica pelas sugestões e confecção das peças do gerador de campo elétrico.

Aos funcionários do Laboratório de Metrologia Elétrica da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletricidade do LAC-UFPR/COPEL pelo apoio técnico e sugestões nos ensaios de laboratório.

Aos funcionários do Laboratório de Eletrônica da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas de Automação e Instrumentação do LAC-UFPR/COPEL pelo apoio técnico e sugestões no sistema de transmissão de sinal por fibra-óptica.

Ao Sr. Douglas Sergey Domingues da Silva da Oficina de Apoio à Pesquisa do Departamento de Física da UFPR pela confecção das peças do sensor.

Aos colegas e professores do curso de pós-graduação em Física pelo apoio e amizade e a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO.....</b>	<b>05</b>
2.1 ESFERA CONDUTORA EM UM CAMPO ELÉTRICO.....	06
2.2 DESENVOLVIMENTO DA ELETRÔNICA DO SENSOR.....	08
2.3 DETERMINAÇÃO DAS FAIXAS DE MEDIÇÃO.....	18
2.4 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO.....	19
<b>3. MONTAGEM DO GERADOR DE CAMPO ELÉTRICO.....</b>	<b>22</b>
3.1 CONSTRUÇÃO DO CAPACITOR DE PLACAS PLANAS E PARALELAS.....	25
3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO COM O SENSOR.....	27
<b>4. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O SENSOR .....</b>	<b>29</b>
4.1 EXATIDÃO.....	29
4.2 PRECISÃO.....	31
4.3 REPETITIVIDADE.....	35
4.4 LINEARIDADE.....	37
4.5 DESVIO COM A TEMPERATURA.....	37
<b>5. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>41</b>
<b>7. APÊNDICE.....</b>	<b>42</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama esquemático da esfera condutora sujeita a um campo elétrico	06
Figura 2	Diagrama em blocos do sensor de campo elétrico	08
Figura 3	Esquema eletrônico do pré-amplificador	09
Figura 4	Esquema eletrônico do amplificador integrador	10
Figura 5	Esquema eletrônico do conversor ca/cc	11
Figura 6	Esquema eletrônico do conversor eletro-óptico	12
Figura 7	Diagrama em blocos da unidade remota	13
Figura 8	Esquema eletrônico do sistema de tratamento de sinal do sensor	14
Figura 9	Fotografia da primeira placa de circuito impresso	15
Figura 10	Fotografia da segunda placa de circuito impresso	16
Figura 11	Fotografia do alojamento das baterias do sensor	16
Figura 12	Fotografia do sensor montado	17
Figura 13	Fotografia dos componentes do sensor e da unidade remota	17
Figura 14	Esquema elétrico do método de calibração do sensor	20
Figura 15	Curva de calibração do sensor	21
Figura 16	Diagrama elétrico das possíveis alimentações do gerador de campo	23
Figura 17	Gráfico do comportamento do campo elétrico no interior do gerador	24
Figura 18	Fotografia da montagem do gerador de campo elétrico	26
Figura 19	Diagrama elétrico do gerador de campo elétrico	28
Figura 20	Gráfico da diferença de campo elétrico gerado e medido	30
Figura 21	Gráfico da reta ajustada para determinar a precisão	31

Figura 22	Gráfico das dispersões das medidas em relação a reta ajustada	32
Figura 23	Gráfico das diversas medidas para a faixa de 0 a 10 kV/m	33
Figura 24	Gráfico das dispersões das medidas para a faixa de 0 a 10 kV/m	34
Figura 25	Gráfico do ensaio de repetitividade do sensor	36
Figura 26	Gráfico do ensaio de desvio com a temperatura	38
Figura A1	Montagem do ensaio para determinar defeitos em isoladores	42
Figura A2	Gráfico do perfil do campo elétrico no isolador polimérico	43
Figura A3	Gráfico das diferenças de campo elétrico nos isoladores poliméricos	44

## **RESUMO**

Neste trabalho é mostrado 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 a montagem de um gerador de campo elétrico, utilizando um capacitor de placas planas e paralelas, que é utilizado para realizar os ensaios com o sensor de campo elétrico. 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 desvio com a temperatura ambiente, e que pode ser aplicado a princípio em dosimetria ou na análise de performance de isoladores de alta tensão.



## **ABSTRACT**

In this work it is shown the development of an electric field sensor which uses the induced charge principle in conducting surfaces by an alternating electric field. The sensor 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 processing signal electronics is described in blocks with transfer functions for each stage. Also it is shown the assembly of an electric field generator using a parallel plate capacitor which is used to test the electric field sensor. The results of tests show that it is possible to develop a commercial electric field instrument with good technical specifications such as accuracy, precision, repeatability and temperature drift. The sensor may be applied in exposure measurements or in performance analyses of high voltage insulation.

## CAPÍTULO 1

### 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 baixa frequência com o corpo humano. Em 1979 um estudo epidemiológico realizado por N. Wertheimer e E. Leeper relatou uma acentuada taxa de leucemia em crianças que viviam próximas a linhas de alta tensão na cidade de Denver, Colorado [1]. Esse estudo desencadeou uma corrente de opinião na qual se acredita que a exposição a campos eletromagnéticos de baixa frequência pode trazer algum efeito maléfico à saúde, em forma de leucemia e câncer. Esse fato gerou altos investimentos em pesquisas nesta área, principalmente por empresas de geração e distribuição de energia elétrica, como por exemplo, um estudo realizado pela empresa norte-americana Southern California Edison Company e publicado no jornal científico "Epidemiology"[2], no qual foram analisados indivíduos que durante os anos de 1960 à 1988 trabalharam pelo menos um ano sujeitos a campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão de alta tensão, subestações e usinas hidroelétricas. A conclusão desses estudos é que as pessoas que receberam altas doses de exposição a campos eletromagnéticos de baixa frequência possuem o mesmo risco de contrair câncer ou leucemia do que aqueles que receberam baixa dose de exposição.

Com relação ao campo elétrico, a Organização Mundial de Saúde (OMS) fixou como segura a taxa de exposição por um período de 24 horas em um campo elétrico de 5kV/m [3], sendo que normalmente no nosso dia a dia estamos sujeitos a doses bem inferiores a essa. Em

trabalhos realizados pelo Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (LAC-COPEL)[4], foram medidos campos elétricos ao nível do solo embaixo de linhas de transmissão de 69 kV, e encontrado valores na ordem de 150V/m. Também foram medidos campos elétricos e magnéticos em diversos pontos dos locais de trabalho da Usina Governador Bento Munhoz da Rocha no Paraná [4], e foi encontrado um valor máximo de campo elétrico de 331V/m. Em um outro trabalho realizado em residências e escritórios na Suécia e na Noruega [5], onde foram considerados as diferentes configurações de linhas de alimentação, foram levantados os valores médios de campo elétrico nos diversos cômodos, obtendo-se um valor máximo de 163V/m. Podemos perceber que esses valores obtidos estão bem abaixo do estabelecido pela OMS. Biólogos acreditam que, se os campos eletromagnéticos de frequência industrial causam algum problema à saúde, deve-se ao campo magnético, porque o campo elétrico é efetivamente blindado pelo corpo humano[1]. O campo elétrico sofre uma redução na sua amplitude quando penetra na matéria condensada, como é o caso dos tecidos biológicos, de acordo com as condições de contorno aplicadas às equações de Maxwell. Um campo elétrico de uma linha de 60Hz é reduzido em sete a oito ordens de grandeza no interior do corpo humano, e este valor não é significativo se comparado com o campo elétrico interno gerado pelas flutuações térmicas de densidade de cargas[1].

Além das aplicações em dosimetria os medidores de campo elétrico passaram a ser utilizados para determinar a performance de equipamentos elétricos. Como exemplo, através da determinação do perfil de campo elétrico em torno de um isolador de alta tensão é possível determinar a taxa de tensão aplicada em cada parte do material[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 uma geometria fixa e determinada, na qual o campo elétrico medido é proporcional a tensão aplicada no ponto desejado. O desenvolvimento de sensores em um arranjo com essa finalidade utilizando transmissão de sinal via fibra-óptica são denominados de “TP’s ópticos”, pois substituem os conhecidos transformadores de potencial utilizados para medida de alta tensão [7].

Os medidores de campo elétrico alternado dividem-se em três tipos básico: 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-ópticos utilizam o efeito Pockels em cristais[7], onde o cristal sensor é acoplado por fibras-ópticas especiais, e não utiliza referência à terra., Este tipo de medidor não é muito utilizado por ter um custo mais elevado que os demais.

Como em nosso país há pouco desenvolvimento de instrumentação eletrônica, tanto científica como industrial, esse trabalho tem como objetivo mostrar que é possível desenvolver um sensor de campo elétrico, com características comparáveis aos importados e que possa ser utilizado em qualquer uma das aplicações descritas anteriormente, e também dominar as técnicas para aferição e calibração do mesmo. No capítulo 2 é mostrado o princípio de funcionamento do sensor e o desenvolvimento do circuito eletrônico utilizado para tratamento do sinal medido. Também é mostrado como se determina as faixas de medição e o método para calibração em laboratório. No capítulo 3 é descrito a montagem de um gerador de campo

elétrico com a construção de um capacitor de placas planas e paralelas, e também a configuração utilizada para gerar e medir a alta tensão aplicada ao capacitor e o sinal do sensor de campo elétrico. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o sensor, como a exatidão, a precisão, a linearidade, a repetitividade e o desvio com a temperatura. No capítulo 5 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos e as conclusões. Esse trabalho ainda possui um apêndice onde é mostrado uma interessante aplicação do sensor de campo na determinação da ruptura do dielétrico em isoladores poliméricos de alta tensão.

## CAPÍTULO 2

### DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO

Quando introduzimos um corpo qualquer, condutor ou dielétrico, numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, conseqüentemente 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 esféricos são os que geram menor distorção no campo a ser medido e, conseqüentemente, 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, estaremos modificando o potencial elétrico no ponto do espaço onde desejamos medir o campo elétrico e, ainda, se 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. 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.

## 2.1 ESFERA CONDUTORA EM UM CAMPO ELÉTRICO

Se uma esfera condutora está sujeita a um campo elétrico, como mostra a figura 1, haverá um deslocamento de cargas na sua superfície, gerando uma distribuição não homogênea da densidade superficial de cargas, dada pela equação abaixo [10] :

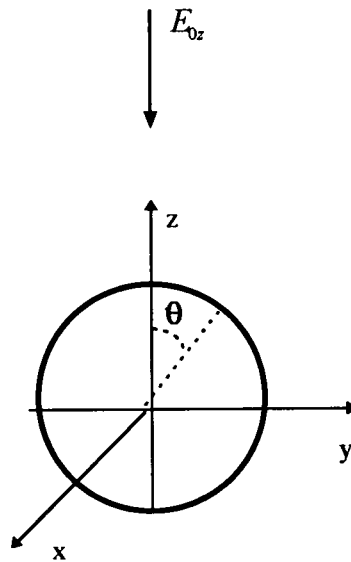
$$\sigma = 3 \varepsilon_0 E_{0z} \cos \theta \quad (1)$$

onde:  $\sigma$  é a densidade superficial de cargas;

$E_{0z}$  é a intensidade de campo elétrico antes de ser colocada a esfera;

$\theta$  é o ângulo em relação ao eixo z;

$\varepsilon_0$  é a permissividade do meio (ar).



**Figura 1**

### **Esfera condutora em um campo elétrico**

A equação (1) é válida para campos uniformes, sendo que para o caso limite de campos não uniformes, gerados por uma carga pontual, teríamos uma diferença máxima de 0,1% se o sensor estiver a uma distância mínima de dez vezes o seu raio [10].

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  $a$  é dada por:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma a^2 \cdot \sin \theta d\theta d\varphi = 3\pi \varepsilon_0 a^2 E_{oz} \quad (2)$$

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

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

Onde  $E_{\max}$  é o valor de pico do campo elétrico senoidal,  $\omega$  é a frequência angular e  $t$  é o tempo. A carga induzida entre os dois hemisférios pelo campo senoidal é:

$$Q(t) = 3\pi a^2 \varepsilon_0 E_{\max} \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

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

$$I(t) = 3\pi a^2 \varepsilon_0 \omega E_{\max} \cos(\omega t) \quad (5)$$

A equação (5) mostra que a corrente induzida nos hemisférios é uma função linear do campo elétrico, a menos de constantes que dependem da geometria, do meio onde se propaga o campo e da frequência angular. A dependência da frequência angular ( $\omega = 2\pi.f$ ), 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 independente da frequência, ou seja, proporcional a carga induzida, como mostra a equação (4).



## 2.2 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO SENSOR

A função do circuito eletrônico incorporado a esfera condutora é amplificar o sinal de corrente induzida na esfera, tornando-o 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:

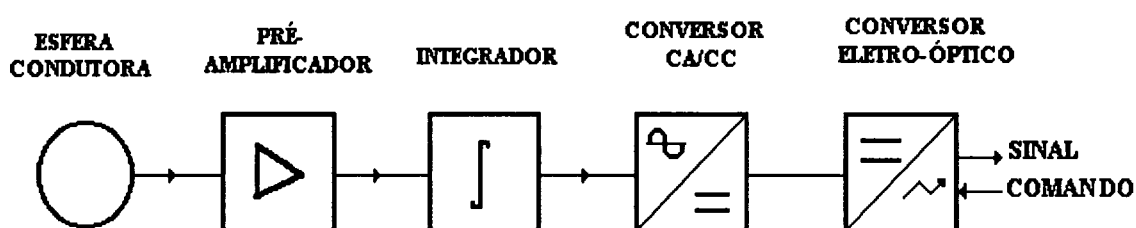


Figura 2

### 2.2.1 PRÉ-AMPLIFICADOR

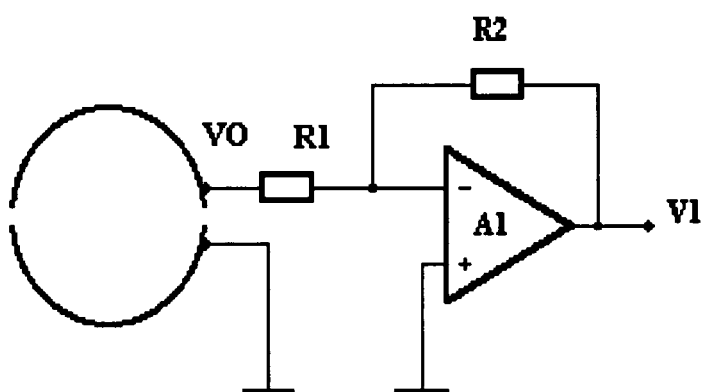
O primeiro estágio para tratamento do sinal de corrente induzida na esfera (equação 5), é um amplificador operacional com alta impedância de entrada e baixa corrente de polarização. A corrente de polarização do amplificador operacional deve ser muito menor que a corrente induzida a ser medida, senão, estaremos utilizando parte da corrente a ser medida para polarizar os componentes internos de entrada do amplificador operacional, gerando assim, um erro no sinal medido. 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.

Assim, 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:

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

O sinal negativo na equação (7) significa que o sinal de campo elétrico sofre uma inversão de fase, que é representado na equação (8) por um deslocamento de fase  $\pi$  na frequência angular.

### 2.2.2 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 retirar a dependência da frequência angular  $\omega$ . A função de transferência deste estágio é dada por:

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

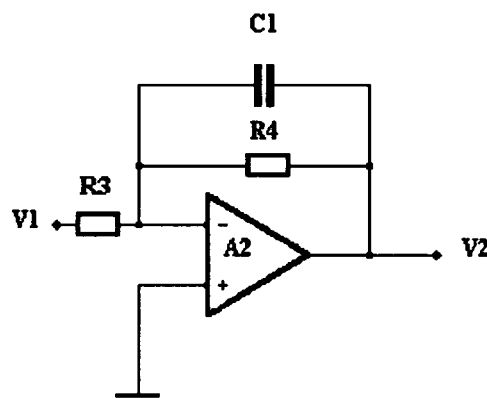


figura 4

Substituindo o valor de  $V_1$  da equação (8) na equação (9), e considerando novamente que o sinal negativo na equação (9) representa uma inversão de fase de  $\pi$ , e realizando a integração temos:

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

A equação (10) mostra que agora temos um sinal proporcional ao campo e com a mesma fase, e independente da frequência  $\omega$ . 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 de harmônicos na rede. 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.

### 2.2.3 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 igual ao valor médio quadrático (rms) do sinal de entrada.

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

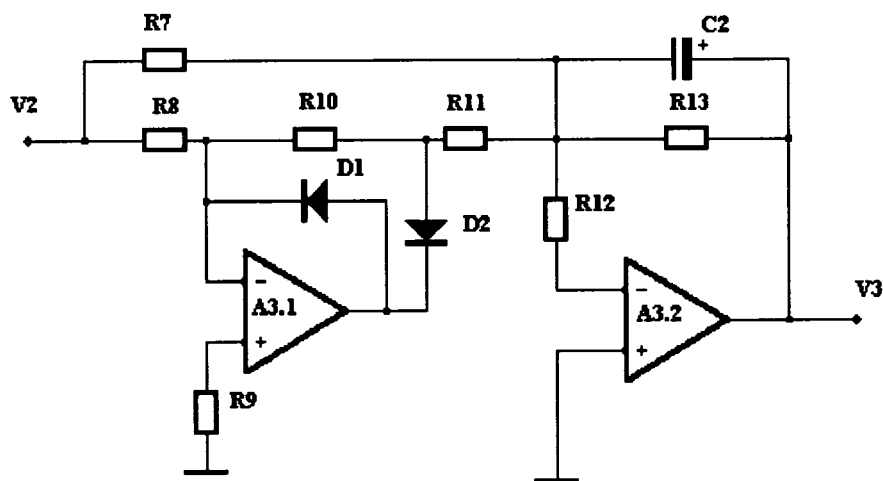


Figura 5

Para se obter uma conversão precisa, deve-se ajustar o ganho do primeiro amplificador operacional (A3.1), que é responsável pela amplificação e inversão do semi-ciclo positivo, de

forma que o segundo amplificador operacional (A3.2), que está na configuração somador, apresente os dois semi-ciclos com a mesma amplitude na saída.

#### 2.2.4 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 ( $V_3$ ) foi padronizado para uma faixa de 0 à 4V, para qualquer faixa de campo elétrico. Esse sinal padronizado 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 à uma fibra óptica plástica e transmitido para um outro dispositivo remoto que realizará a conversão dos pulsos óptico em indicação do campo elétrico.

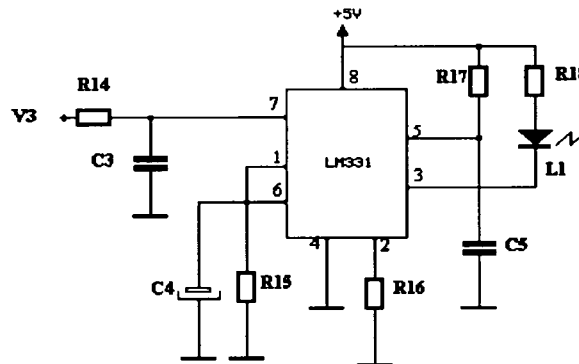


figura 6

A função de transferência que relaciona a frequência de saída em kHz, com o sinal contínuo na entrada ( $V_3$ ) em volts fornecida pelo fabricante, para o exemplo acima onde é utilizado o conversor LM331 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.

$$f_s = \frac{3\pi\epsilon_0 a^2 R_2 R_{16}}{KC_1 C_5 R_3 R_{15} R_{17}} E_{\max} \quad (13)$$

### 2.2.5 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, após o sinal passa 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. Assim podemos converter a leitura em frequência (kHz) no “display” do multímetro 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 a mesma só permaneça energizada durante a medição, isso é feito utilizando uma segunda fibra-óptica, e quando a unidade remota é energizada, a fonte da eletrônica no sensor é também ativada. A unidade remota é representada na figura 7 em diagrama de blocos:

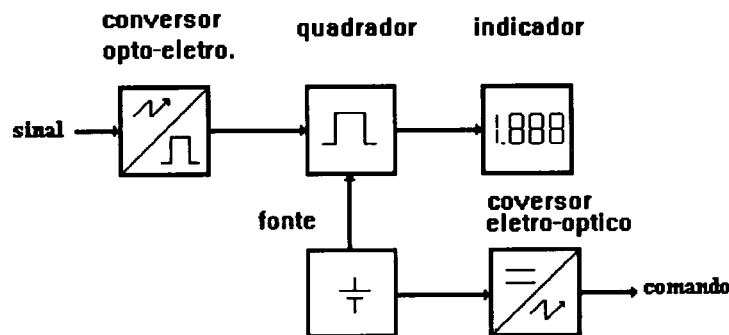


figura 7

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

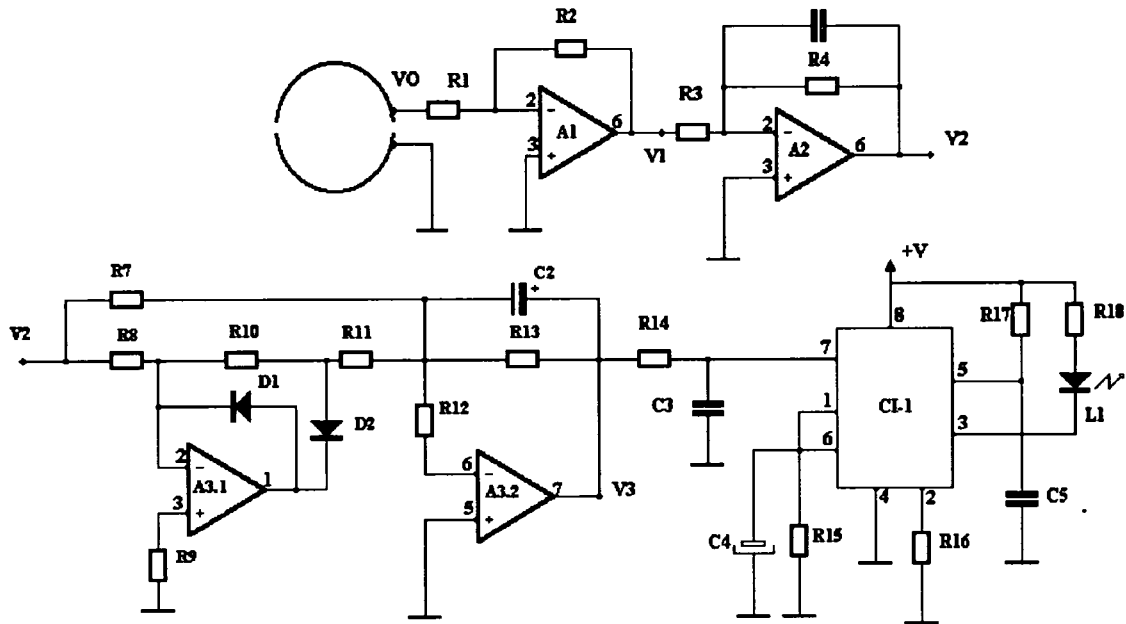


figura 8

### LISTA DE COMPONENTES

A1	-	CA3040E	R13	-	200 k $\Omega$
A2	-	CA3040E	R14	-	100 k $\Omega$
A3	-	CA1458	R15	-	100 k $\Omega$
CI-1	-	LM 331	R16	-	10 k $\Omega$
R1	-	510 $\Omega$	R17	-	3,2 k $\Omega$
R2	-	510 $\Omega$	R18	-	1 k $\Omega$
R3	-	2,2 M $\Omega$	C1	-	100 nF
R4	-	1,6 k $\Omega$	C2	-	1 $\mu$ F
R5	-	10 M $\Omega$	C3	-	100 nF
R6	-	2,2 M $\Omega$	C4	-	1 $\mu$ F
R7	-	200 k $\Omega$	C5	-	22 nF
R8	-	20 k $\Omega$	D1	-	1N4001
R9	-	15 k $\Omega$	D2	-	1N4001
R10	-	20 k $\Omega$	L1	-	SFH 750 SIEMENS
R11	-	100 k $\Omega$			
R12	-	1 k $\Omega$			

### 2.2.6 MONTAGEM DO SENSOR

A montagem mecânica do sensor consiste em duas semi-esferas de alumínio com 4,6 cm de raio separadas por uma placa isoladora circular de fenolite com espessura de 3mm. Esta placa, além de isolar os dois hemisférios, também possui um encaixe no qual é preso uma haste telescópica de fibra de vidro. A haste de fibra de vidro permite que o operador posicione o sensor no local onde deseja medir o campo elétrico sem que o corpo do mesmo interfira de forma apreciável no campo a ser medido e ainda proporciona uma isolação galvânica entre a esfera e o operador. Assim, se a esfera for encostada acidentalmente no equipamento energizado, por exemplo numa linha de alta tensão, não haverá riscos para o operador, logicamente respeitando os limites de isolação do material. O circuito eletrônico incorporado no sensor descrito nos sub-capítulos anteriores, foi montado em duas placas de circuito impresso circulares, sobrepostas e alojadas em um dos hemisférios. Na primeira placa foram montados os estágios de pré-amplificação, integrador, conversor CA/CC e o conversor de tensão em frequência. Na figura 9 é mostrado o sensor aberto onde se pode ver a primeira placa com os componentes eletrônicos.

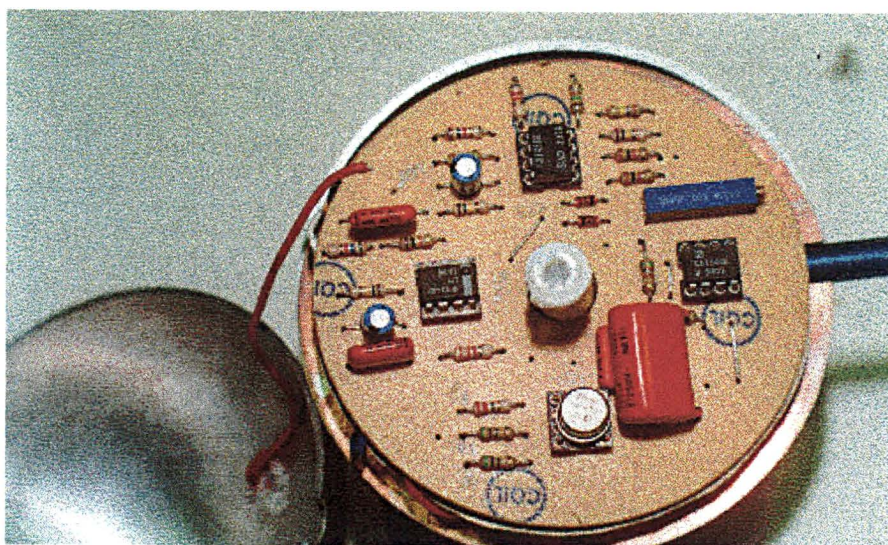
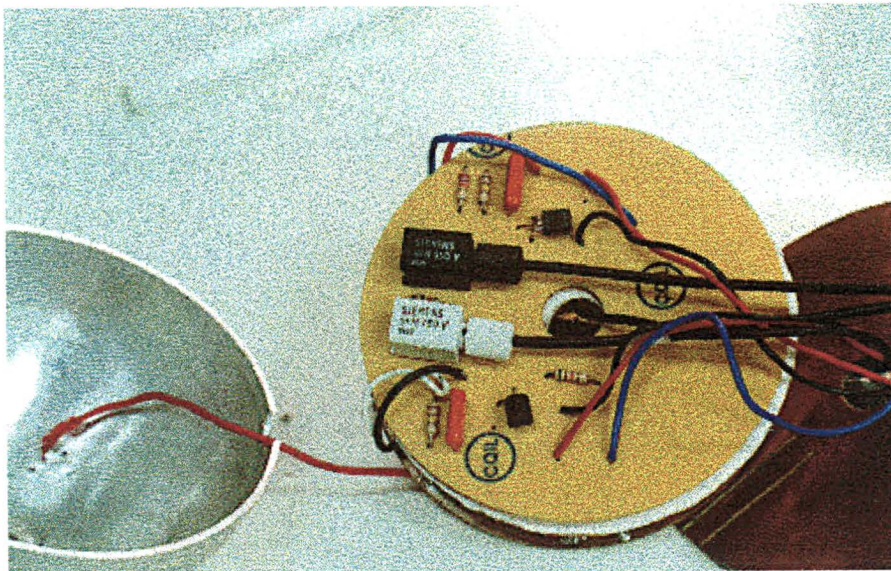


Figura 9

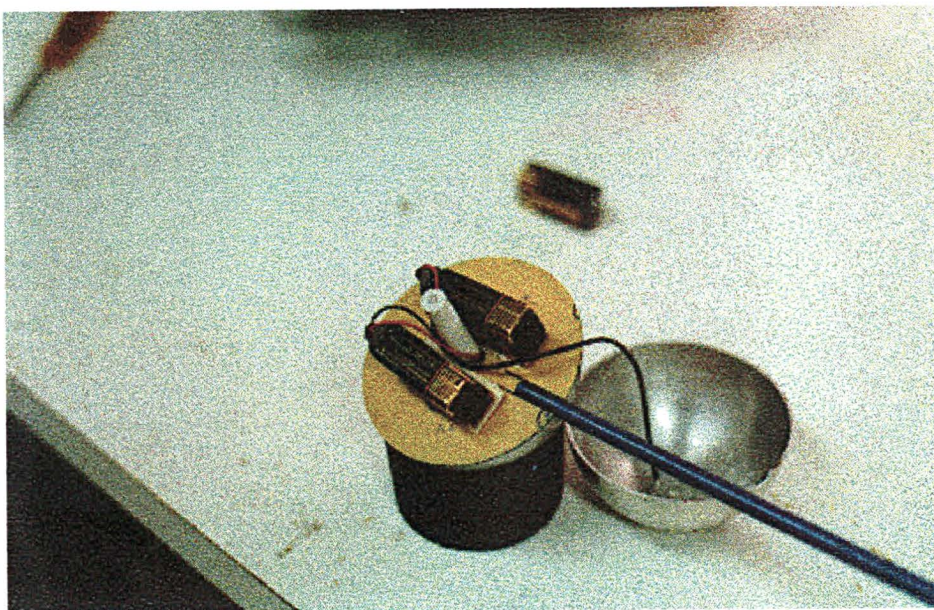


Na segunda placa, mostrada na figura 10, foram montados os circuitos de comando remoto da fonte de alimentação e os conversores de sinal elétrico em sinal óptico, que na verdade são conectores para fibra-optica plástica com o foto-transistor e o diodo emissor de luz (led).



**Figura 10**

O outro hemisfério do sensor, aloja as baterias que alimentam o circuito eletrônico. Na figura 11 vemos as baterias sobre a placa isoladora e também a haste telescópica encaixada.



**Figura 11**

Na figura 12 vemos o sensor montado e na figura 13 seus componentes.



**Figura 12**



**Figura 13**

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| 1 - hemisfério de alumínio onde fica alojada a eletrônica  | 6 - Placa de Circuito (1) |
| 2 - hemisfério de alumínio onde ficam alojadas as baterias | 7 - Placa de Circuito (2) |
| 3 - Placa isoladora de fenolite                            | 8 - Eixo de fixação       |
| 4 - Haste telescópica                                      | 9 - Unidade Remota        |
| 5 - Fibra-óptica   |                           |

### 2.3 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. Então, 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 a 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:

$$R_2 = \frac{4 C_1 R_3}{3 \pi \epsilon_0 a^2 E_{\max}} \quad (14)$$

Com o valor de  $R_2$  determinado para cada faixa de medição, e se utilizarmos um frequencímetro para leitura do sinal, 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 :

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

Com isso, podemos também 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 ótico através de uma terceira fibra-óptica.

## 2.4 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 corrente induzida em função do campo elétrico é determinada pela equação (5).

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

Agrupando as constantes da equação (5) temos variação da corrente induzida por unidade de campo elétrico.

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

onde:

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

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

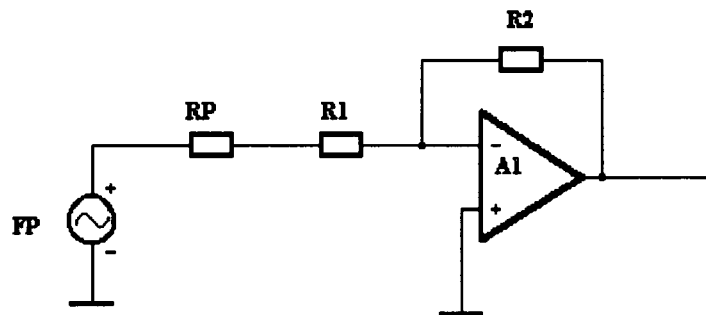
$$a = 4,6 \text{ cm}$$

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 14. Utilizando um resistor padrão de  $100\text{k}\Omega$  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 14**

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

**RP** - Resistor Padrão  $100\text{k}\Omega$  TETEX exatidão 7 ppm.

**R1** - Resistor de Entrada do Sensor

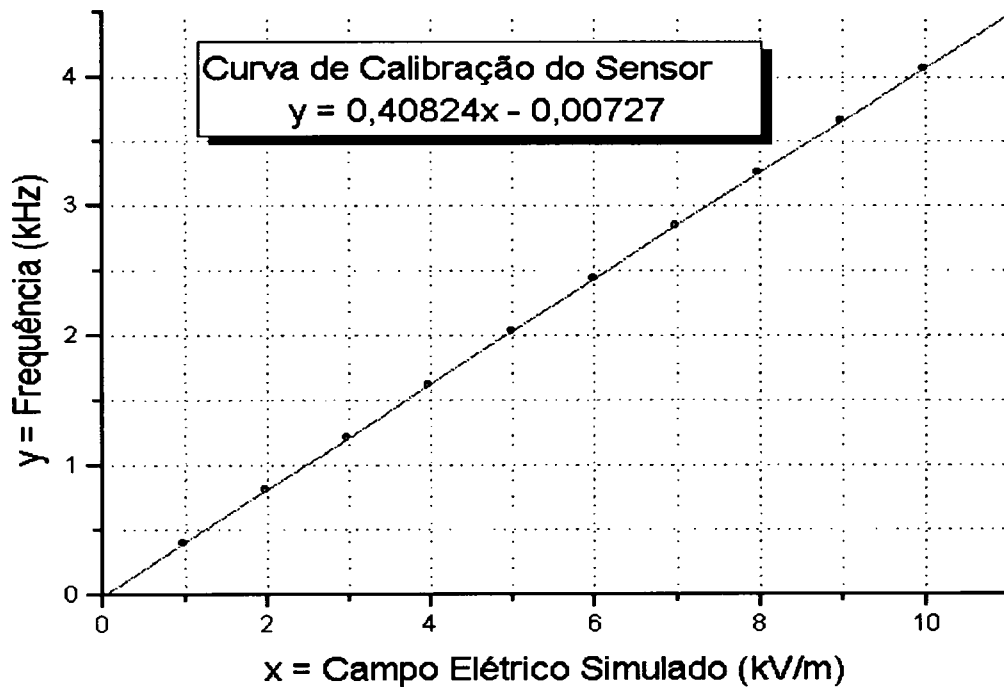
Com os valores do sinal de frequência do sensor obtidos para cada valor de campo simulado por injeção de corrente foi realizado uma regressão linear computacional e obtido os seguintes parâmetros para a curva de calibração do sensor:

Parâmetros da reta ajustada:  $y = A + B.x$

$A = -0,00727$        $sd = 0,00124$       (kHz)

$B = 0,40824$        $sd = 0,0002$       (Hz.m/V)

$R = 1$      $N = 10$        $sd = 0,00182$



**Figura 15**

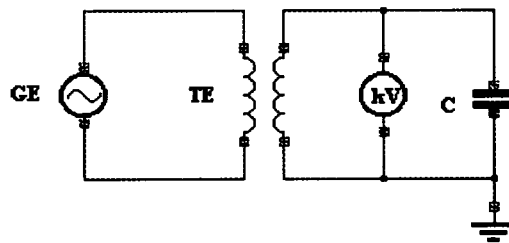
Os parâmetros de ajuste da reta obtidos representam um bom ajuste, onde o parâmetro  $R = 1$ , que é o coeficiente de correlação linear, indica um bom alinhamento dos pontos experimentais em relação a reta ajustada.

### CAPÍTULO 3

#### MONTAGEM DO GERADOR DE CAMPO ELÉTRICO

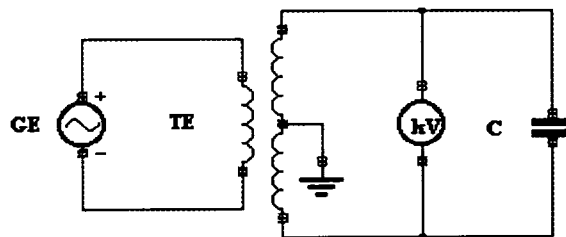
Para aferir o sensor de campo elétrico é necessário gerar um campo elétrico homogêneo com incerteza conhecida. A montagem recomendada pela norma IEC Public. 833 [9], consiste em duas placas quadradas condutoras planas e paralelas, na posição horizontal, separadas por uma distância  $d$  e suportadas por isolantes, formando um capacitor de placas planas e paralelas. Teoricamente, se as dimensões das placas são suficientemente grandes para tratar o problema como um capacitor de placas planas e paralelas de dimensões infinitas e, se aplicarmos uma tensão  $U$  sobre as placas, teremos no centro do capacitor um campo uniforme que será dado por  $E_z = U / d$ . Na prática as dimensões finitas das placas geram efeitos de borda que distorcem o campo no interior das mesmas, de forma que somente no centro do volume entre as placas encontramos a melhor condição de campo homogêneo [9]. Para minimizar os efeitos de borda e as influências de outros fatores, como a proximidade das paredes do laboratório e do plano terra, isto é o piso do local, é recomendado que as placas possuam as bordas arredondadas e sejam montados cinco anéis formando uma grade ao redor do capacitor, e que a esses anéis devem ser aplicados potenciais diferentes usando um divisor resistivo. As dimensões do sensor e o tipo de material utilizado para a construção do mesmo também influenciam na distorção do campo gerado e conseqüentemente na exatidão da medida do campo [8]. Por isso a norma recomenda que a distância entre as placas seja no mínimo vinte vezes maior que o raio da esfera do sensor. Outro fator importante que determina o comportamento do campo elétrico no interior do capacitor é a configuração da alimentação

das placas. Se alimentarmos as placas com o secundário de um transformador simples, sem derivação central e aterrarmos a placa inferior do capacitor, teremos uma distribuição de potencial assimétrico, cujo diagrama elétrico é mostrado na figura 16a:



**Figura 16a**

Por outro lado, se alimentarmos as placas do capacitor com um transformador cujo secundário possui derivação central, e aterrarmos a derivação central, teremos uma distribuição de potencial simétrica no interior do capacitor, mostrado na figura 16b:



**Figura 16b**

**GE - Gerador de Tensão Alternada**

**TE - Transformador Elevador de Tensão**

**kV - Sistema para Medir Alta-Tensão**

**C - Capacitor Gerador de Campo Elétrico**



O comportamento do campo vertical no interior do capacitor de placas paralelas para as duas configurações de alimentação possíveis, simétrica e assimétrica, é mostrado na figura 17 [11]. A curva *a* representa os valores de campo medido com um sensor esférico em função da altura do sensor no interior do capacitor. A curva *b* é a função calculada sem a introdução do sensor. As curvas *a* e *b* são para a configuração de potencial assimétrico (placa inferior aterrada). As curvas *c* e *d* são os resultados correspondentes à configuração simétrica.

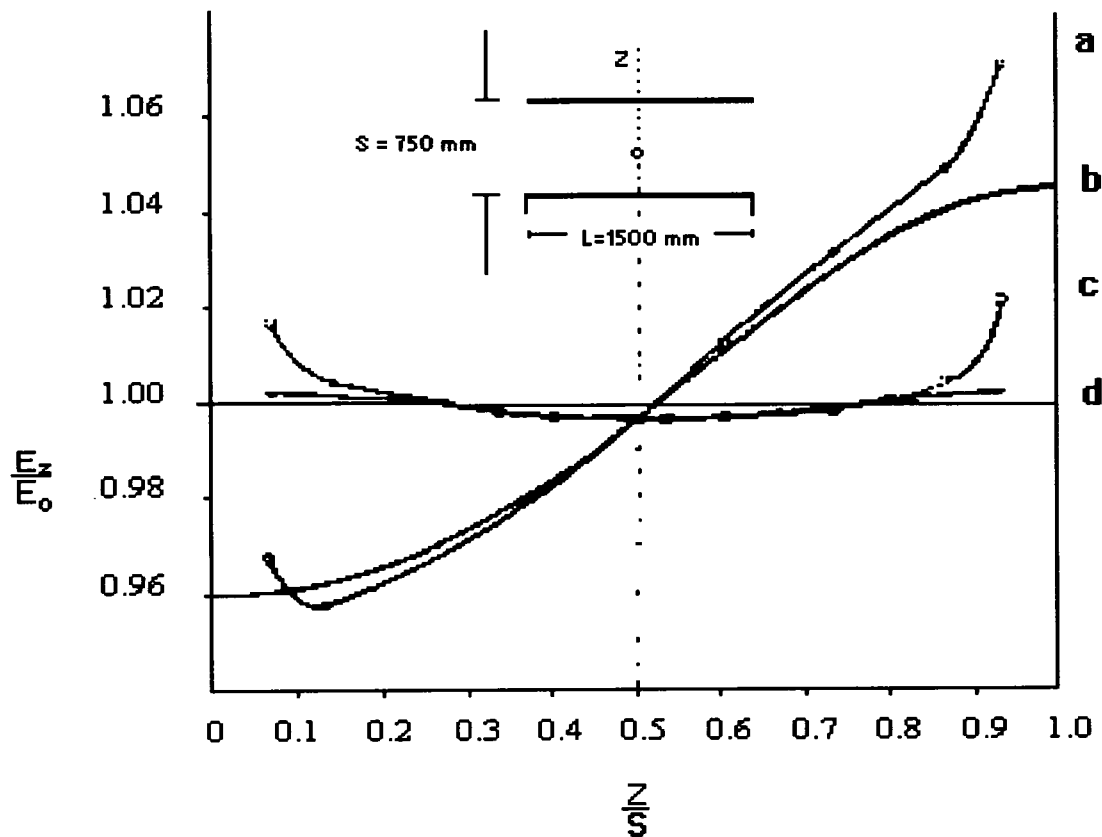


Figura 17

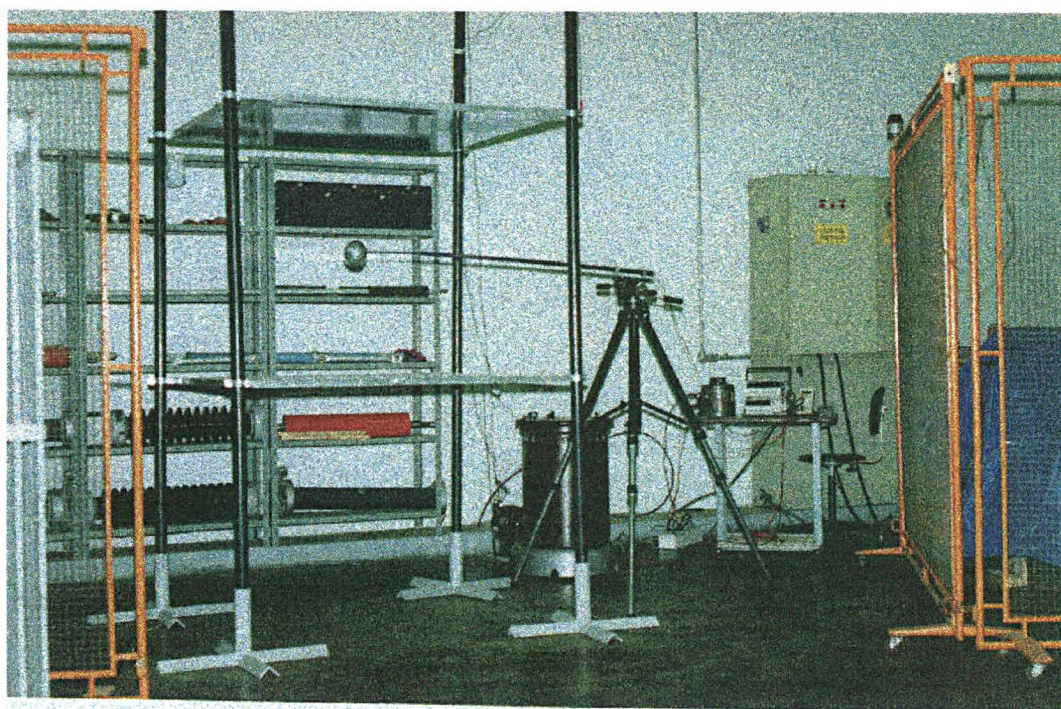
Analisando as curvas da figura 17, e considerando a dificuldade de obter transformadores elevadores de alta-tensão com derivação central no secundário, foi optado pela montagem da configuração assimétrica, assumindo que na região central poderemos ter uma diferença de 1% do campo elétrico vertical teórico dado pela diferença de potencial entre as placas dividido pela distância entre as mesmas.

### **3.1 CONSTRUÇÃO DO CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS**

Foram utilizadas para a montagem descrita anteriormente duas placas de alumínio de 1,25m x 1,25m com espessura de 2mm, suportadas por um quadro de cantoneiras de ½ polegada para garantir a planicidade das mesmas e suporta-las nos isolantes. Para suportar as placas na posição horizontal e deixa-las isoladas eletricamente, foram utilizados quatro tubos de PVC de 2 polegadas de diâmetro, montados na posição vertical e fixados ao solo por sapatas metálicas. As placas foram fixadas ao tubos de PVC utilizando-se braçadeiras metálicas, as quais possibilitam um fácil ajuste da distância entre as placas.

Como o sensor esférico possui um diâmetro de 9,2 cm, é recomendado que a distância entre as placas seja no mínimo dez vezes o diâmetro do sensor, por isso foi ajustado a distância entre as placas em 1m com incerteza de 1mm. No entanto, a norma IEC 833 [9] recomenda que as dimensões das placas sejam duas vezes maior que a distância entre as mesmas, assim, deveríamos ter placas com dimensões de 2m x 2 m. Como a maior dimensão para placas de alumínio disponível em nosso mercado foi de 1,25 m x 1,25 m, e também deveríamos ter as bordas das placas arredondadas e anéis em volta do capacitor para homogenizar o campo na região periférica diminuindo os efeitos de borda. Estes fatores comprometem a exatidão do campo gerado, por outro lado, este assunto já foi explorado por Oriano Bottauscio, Gabiella

Crotti [12] e por A.Braun, E. Brzostek [11], se considerarmos o campo gerado como padrão, a exatidão do sensor dependerá da geometria do sensor, da constante dielétrica do material do sensor e do método de calibração utilizado. Assim, usaremos esta montagem para avaliar as características particulares do sensor desenvolvido, as quais dependem do circuito eletrônico incorporado como a linearidade, repetitividade e o desvio com a temperatura e para comparar com o método de calibração utilizado.



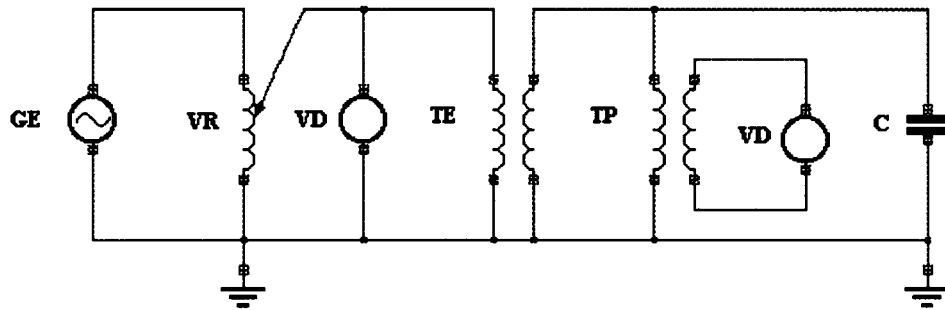
**Figura 18**

Na figura 18 podemos ver a montagem do gerador de campo elétrico com o sensor de campo elétrico posicionado na região central do capacitor de placas planas e paralelas.

### 3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DO SENSOR COM CAMPO ELÉTRICO

Com o objetivo de obter campos elétricos para aferir o sensor nas duas faixas de trabalho, que são 0 à 2 kV/m para a faixa 1 e 0 à 10kV/m para a faixa 2, foi montado um sistema cujo diagrama elétrico esquemático é mostrado na figura 19. Para alimentar o capacitor de placas paralelas **C** com tensão alternada variando seu valor médio quadrático (rms) em uma faixa de 0 à 12 kV, foi utilizado um transformador elevador **TE**, com uma relação de transformação de 1 para 120. Seu primário por sua vez, foi alimentado com a saída de um transformador variável **VR**, assim, variando a saída de **VR** numa faixa de 0 à 100V, obtemos entre as placas do capacitor uma diferença de potencial de 0 à 12 kV, para controlar a saída do varivolt com maior segurança, foi conectado um voltímetro digital **VD**. A placa inferior do capacitor foi ligada ao terra, obtendo assim um gerador de campo classificado como assimétrico [11], com relação ao comportamento do campo em relação à altura do sensor no seu interior. Desta forma, ajustando a distância entre as placas para 1m, obtivemos o campo elétrico na faixa de 0 à 12 kV/m. Para medir a alta tensão aplicada no capacitor, foi utilizado transformadores de potencial **TP1** e **TP2** com classe de exatidão de 0,1% do valor nominal. Esses transformadores possuem vários enrolamentos primários, sendo que a exatidão citada é garantida pelo fabricante para uma faixa de 0,8 à 1,2 da tensão nominal de cada enrolamento. O transformador de potencial **TP1** foi utilizado para medir tensões nominais de 1kV, 2kV, 3kV, 4kV e 5kV e o transformador de potencial **TP2** para as tensões nominais de 5kV e 10 kV. O secundário fornece uma tensão padrão de 100V para cada valor nominal do enrolamento de entrada, a qual foi medida usando um voltímetro digital **VD** de valor (rms) verdadeiro modelo HP 3466A com exatidão de 0,3%.

Inicialmente o sensor foi ajustado para uma faixa de medição de 0 á 10 kV/m. Utilizando uma haste telescópica montada em um tripé ajustável, o sensor foi colocado na região central do capacitor (ver figura 18). O sinal transmitido pelo sensor foi medido com um freqüencímetro modelo HP 5315A conectado à saída da unidade remota. Variando a saída do transformador variável foi ajustado para que o voltímetro indicasse um valor de tensão na saída do transformador de potencial correspondente a tensão nominal do enrolamento selecionado. Assim, para cada valor de tensão aplicada ao capacitor, foi medido o sinal de freqüência transmitido pelo sensor com uma incerteza de 1 Hz.



**GE - Gerador de Tensão Alternada (rede)**

**VR - Transformador Variável (Varivolt) Tipo VM 115**

**VD - Voltímetro Digital HP modelo 3466A**

**TE - Transformador Elevador de Tensão Osaki Eletric CO Ltd.**

**TP - Transformador de Potencial de Precisão Messwandler-Bau VUZT5 classe 0,1%.**

**C - Capacitor Gerador de Campo Elétrico**

**Figura 19**

## **CAPÍTULO 4**

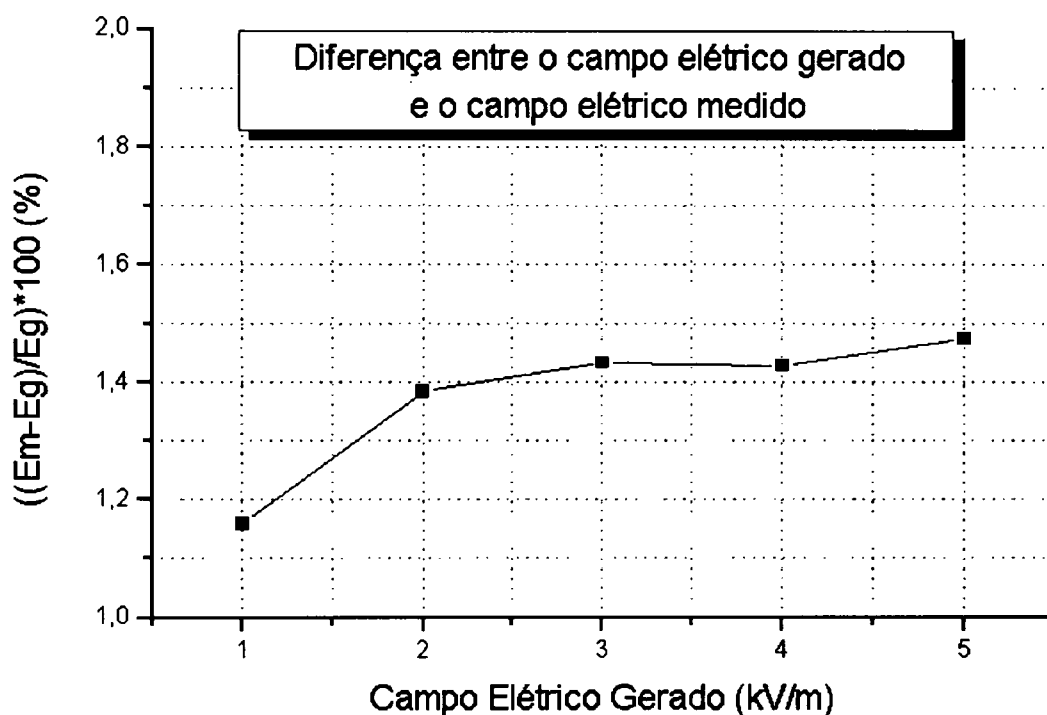
### **RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O SENSOR**

Quando desejamos realizar uma medida de uma determinada grandeza física, utilizando um instrumento de medição ou um processo de medição mais complexo, precisamos algumas informações a mais do que o valor da grandeza, ou seja, precisamos saber qual é o nível de confiança da informação que estamos recebendo. Uma primeira informação importante que deve acompanhar o resultado de uma medição, é a exatidão da medida, a qual define o grau de concordância entre o valor medido e o valor verdadeiro do mensurando, e também, outras informações importantes como linearidade, repetitividade e o desvio com a temperatura ambiente. Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados com o sensor de campo elétrico, com o objetivo de determinar alguns dos parâmetros citados acima. Neste trabalho, procuraremos adotar a terminologia usada em metrologia sugerida pela portaria número 029 de 10 de março de 1995 pelo Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo [13], a qual visa padronizar a terminologia metrológica brasileira.

#### **4.1 EXATIDÃO**

Como foi comentado anteriormente, a exatidão de uma medida é definida como sendo “Grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando”[13]. O valor verdadeiro, na prática, não é conhecido. No nosso caso definiremos o campo elétrico gerado no centro do capacitor de placas paralelas como padrão, o qual é determinado pela razão entre a tensão aplicada e a distância entre as placas. A tensão aplicada foi medida com um transformador de potencial com classe de exatidão de 0,1% e um

voltímetro digital com exatidão de 0,3 % do valor medido. A distância entre as placas foi ajustada com uma trena em 1 metro com incerteza de 1mm. Fazendo a propagação de erros obtemos uma incerteza de 0,14% para o valor de campo elétrico gerado como padrão. Para definir a exatidão do sensor foi comparado os valores gerado de campo elétrico com os valores de frequência fornecidos pelo sensor, convertidos em campo elétrico através da curva de calibração da figura 15. A diferença em porcentagem entre o campo elétrico medido e o campo elétrico gerado em função do campo elétrico gerado foi plotado na figura 20.



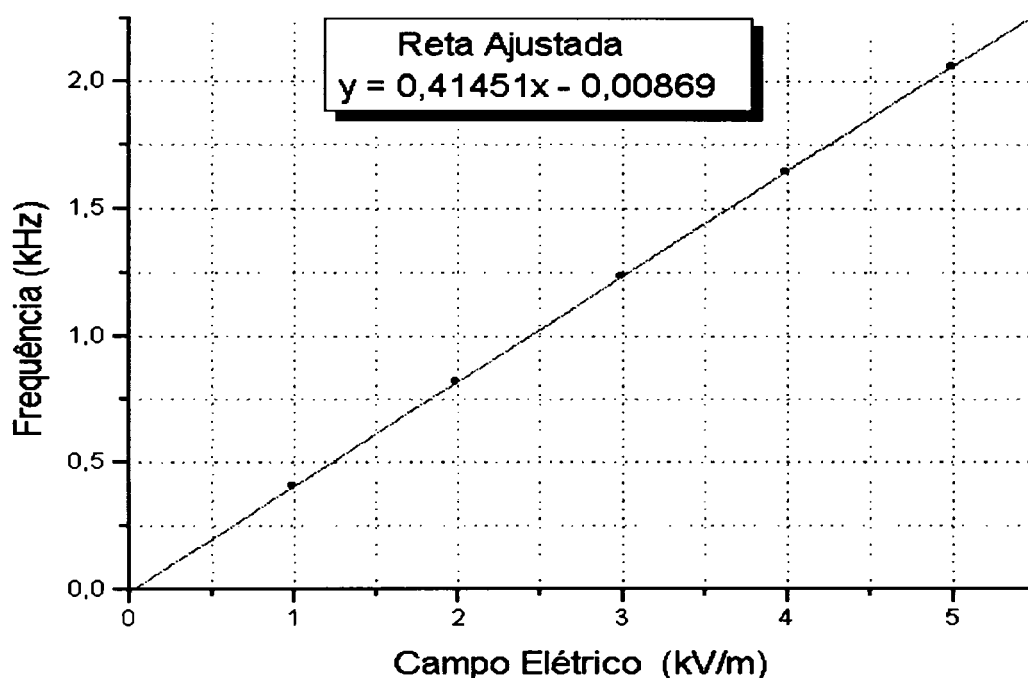
**Figura 20**

Pelo gráfico da figura 20, podemos verificar que a diferença 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. A máxima diferença encontrada, de 1,5%, define a exatidão deste processo de medida.

## 4.2 PRECISÃO

A precisão é uma outra qualidade da medição e está relacionada às dispersões das medidas, ou seja, está relacionada ao desvio padrão de uma sequência de medidas [14]. Para este processo em particular, inicialmente foram realizadas repetidas medições do sinal do sensor para cada um dos valores de tensão aplicada ao capacitor, obtendo assim um valor médio para cada medida, utilizando sempre a tensão nominal de cada enrolamento do transformador de potencial. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 21.



**Figura 21**

No gráfico o campo elétrico foi considerado como referência e a frequência foi medida com uma exatidão de 0,05%.



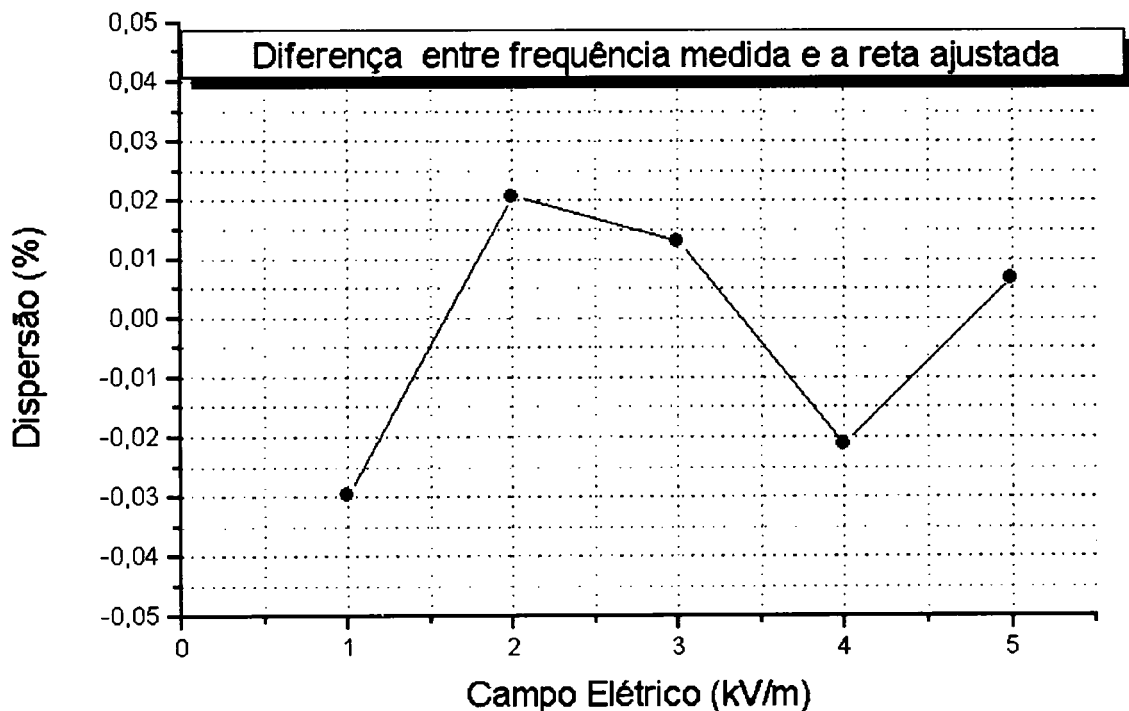
Com os valores médios obtidos foi realizado uma regressão linear, obtendo uma reta com bons parâmetros de ajuste, a qual foi usada como valor médio de referência.

Parâmetros da reta ajustada  $y = A + B.x$

$A = -0,00869$  (kHz)       $B = 0,41451$  (Hz.m/V)       $R = 1$      $N = 5$

$sd = 0,00028$  (kHz)       $sd = 0,00008$  (Hz.m/V)       $sd = 0,00027$

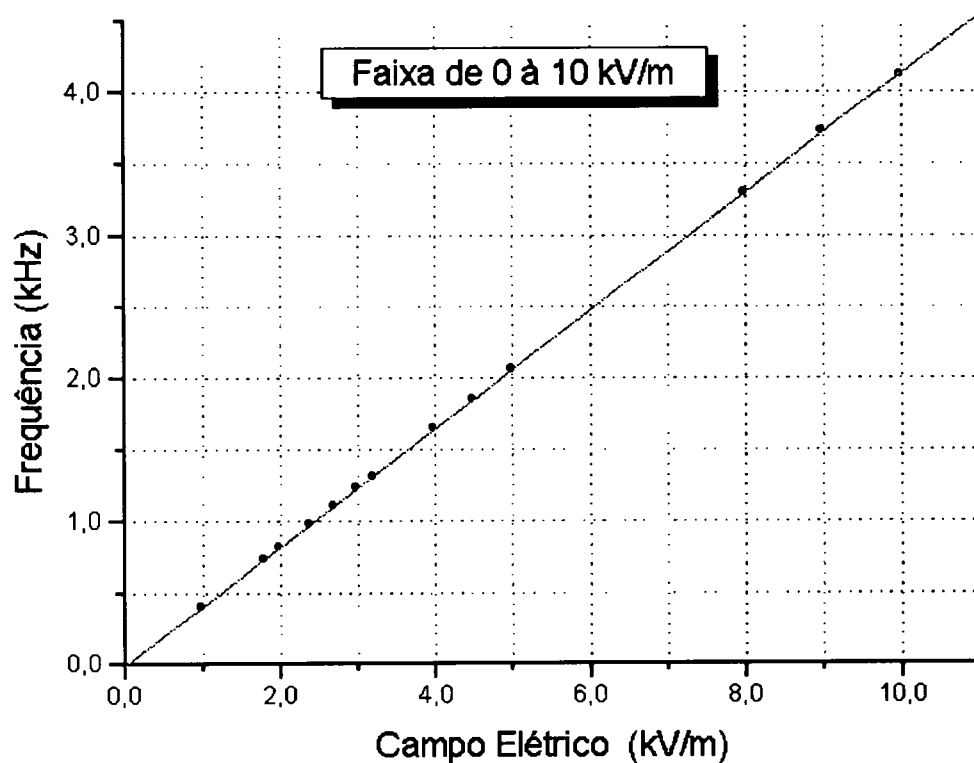
Para o parâmetro A obtemos um desvio padrão de 3,2% e para o parâmetro B um desvio padrão de 0,02%. O parâmetro R é o coeficiente de correlação da regressão linear e o resultado  $R=1$  indica um bom alinhamento dos pontos experimentais em relação a reta ajustada. Fazendo a diferença em porcentagem, entre os valores medidos e a reta ajusta, temos a dispersão para este conjunto de medidas.



**Figura 22**

O gráfico da figura 22, confirma os bons resultados obtidos nos parâmetros de ajuste da reta. Podemos observar uma dispersão máxima de 0,03% dos valores medidos em relação a reta ajustada.

Para obter um valor de precisão mais representativo deste processo de medição, foram realizadas diversas medidas do campo elétrico gerado, em diversos pontos da faixa de trabalho do sensor. Os resultados foram plotados no gráfico da figura 23 .



**Figura 23**

Com o objetivo de abranger toda a faixa de trabalho do sensor, foram gerados os valores de tensão permitidos para cada enrolamento do transformador de potencial padrão de medida, dentro da faixa garantida pelo fabricante do mesmo, que é de 0,8 à 1,2 da tensão nominal do enrolamento.

Na figura 24 é representada a dispersão para todos os valores de campo elétricos gerados, cobrindo a faixa de trabalho do sensor de 0 à 10 kV/m. Com esses dados podemos tirar conclusões a respeito da precisão do método.

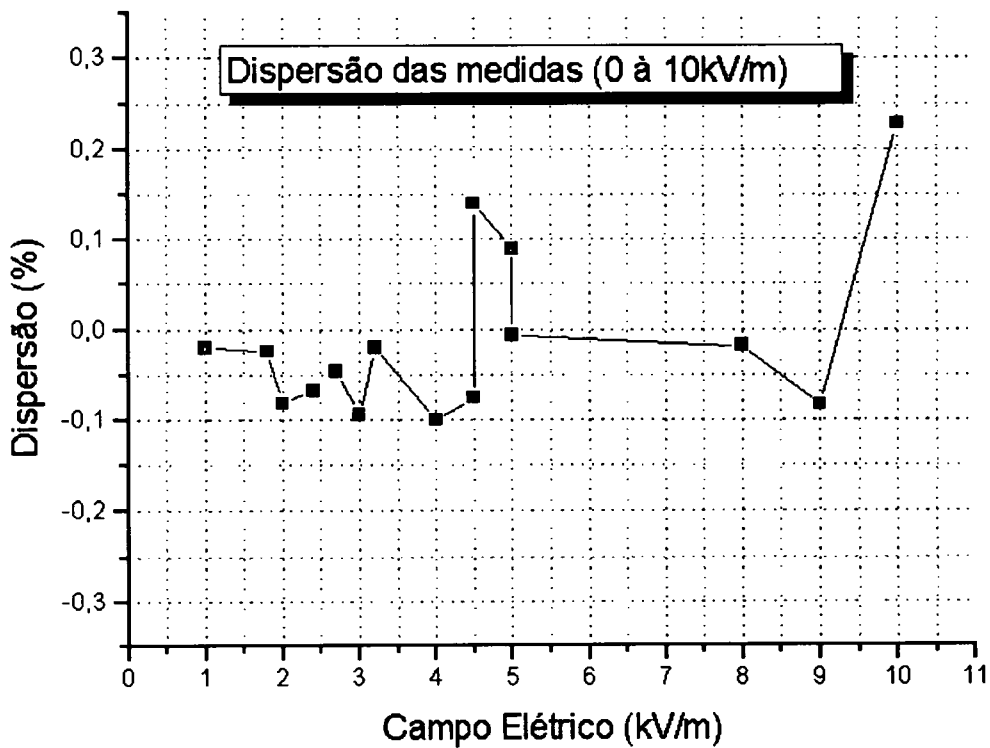


Figura 24

Logicamente para especificar a precisão de um instrumento de medida comercial, teríamos que acompanhar a dispersão de diversas medidas ao longo de períodos de tempo pré-determinados. Considerando os valores máximos de dispersão observados podemos estabelecer a precisão do processo de medição em 0,25%

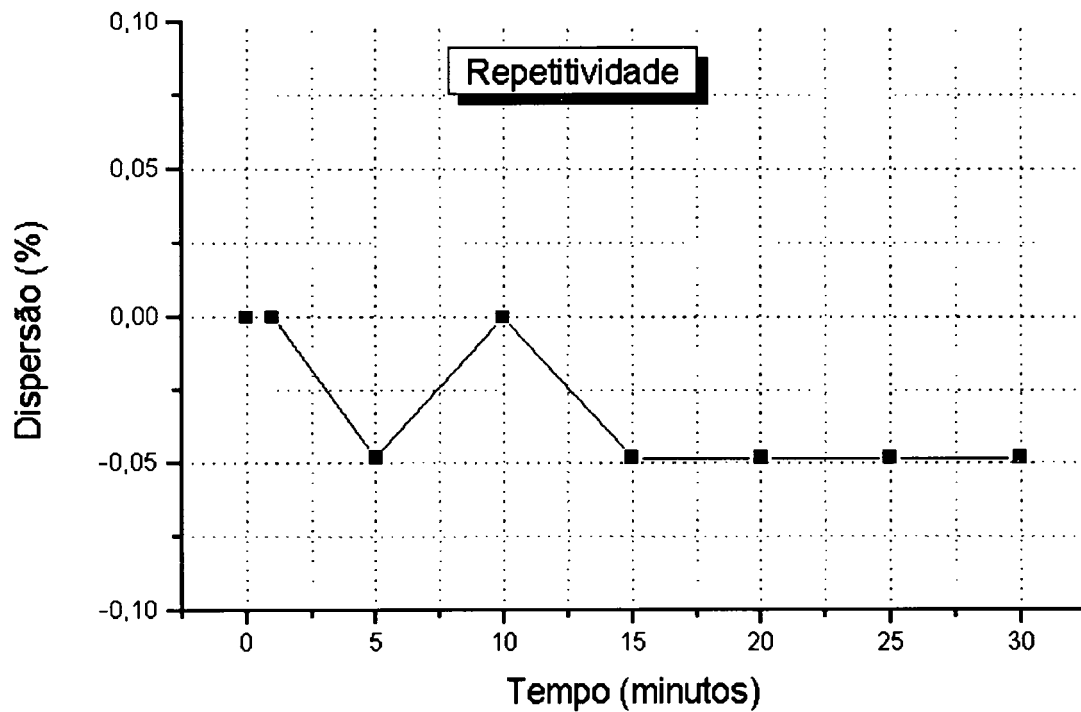
### **4.3 REPETITIVIDADE**

A repetitividade de um instrumento ou de um processo de medição é definido como sendo “Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição” [13]. Estas condições denominadas de condições de repetitividade incluem:

- mesmo procedimento de medição;
- mesmo observador;
- mesmo instrumento de medição;  
utilizado nas mesmas condições e mesmo local;
- repetição em curto período de tempo;

A repetitividade pode ser expressa quantitativamente em função das características da dispersão dos resultados. Para esse ensaio, inicialmente foram ligados os demais equipamentos e instrumentos de medição, como o voltímetro, o frequencímetro e os transformadores de potencial, e ajustado o valor de alta tensão para o ensaio em 5 kV, aguardando tempo para aquecimento dos mesmos. Após o tempo de aquecimento foi ligado o sensor e realizada a primeira leitura somente após um período de 1 minuto para aquecimento do sensor. Este procedimento foi repetido a cada 5 minutos, totalizando um tempo total do ensaio em 30

minutos. As variações percentuais em relação a primeira medida, ou seja as dispersões das medidas, foram plotadas em função do tempo de cada medida na figura 25.



**Figura 25**

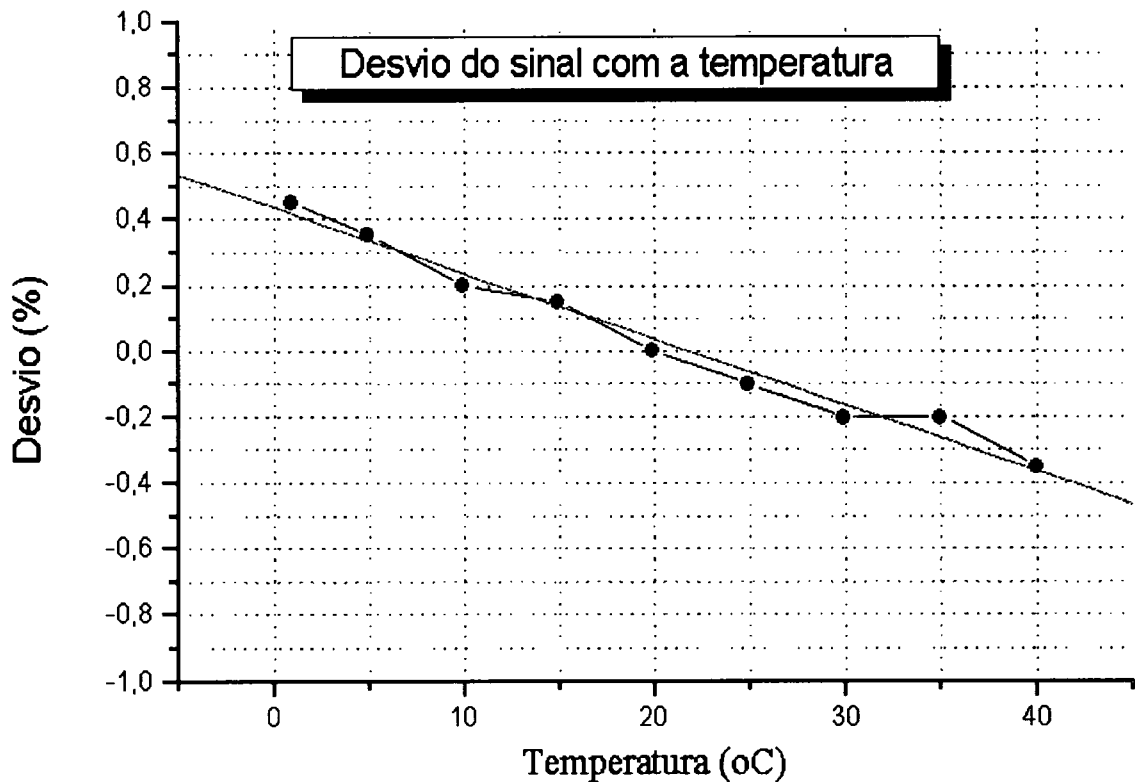
Analisando o gráfico da figura 25, podemos observar que o processo apresentou uma boa repetitividade, onde o valor da diferença observada de 0,05%, corresponde a flutuação na medida da frequência do sensor, a qual corresponde à variação de 1Hz em 2.064 Hz.

#### **4.4 LINEARIDADE**

O resultado da regressão linear realizada nos dados das medidas na faixa de 0 à 10 kV/m, mostrada na figura 23, apresentou um coeficiente de correlação R 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, que na verdade representa a não linearidade das medida como sendo menor que o valor determinado para a precisão da medida, ou seja, menor que 0,25%.

#### **4.5 DESVIO COM A TEMPERATURA**

Com o objetivo de avaliar o comportamento do sensor com as variações da temperatura ambiente, foi elaborado um ensaio em laboratório descrito a seguir. Como não é possível simular variações da temperatura ambiente no local da montagem do gerador de campo elétrico, foi utilizado o método de injeção de corrente, mostrado no capítulo 2, para simular um campo elétrico de 5 kV/m, correspondente a 50% da faixa de trabalho do sensor. O sensor foi colocado em um banho térmico, inicialmente à temperatura de 1°C, e após aguardar um período para estabilização foi feita a leitura do sinal. Esse procedimento foi repetido elevando-se a temperatura do banho em passos de 5°C até a temperatura máxima de 40°C. A variação do sinal de saída do sensor em função da temperatura foi convertido em porcentagem em relação ao sinal fornecido a temperatura de 20°C. Os resultados são apresentados na figura 26.



**Figura 26**

Parâmetros da reta ajustada  $y = A + B \cdot x$

A = 0,436	sd = 0,025	(%)
B = -0,020	sd = 0,001	(%/°C)
R = -0,991	sd = 0,040	

Utilizando o parâmetro B 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.

## CAPÍTULO 5

### DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A seguir faremos uma análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o protótipo do sensor desenvolvido:

- **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 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. Em uma comparação utilizando o medidor de campo elétrico comercial da Electric Field Measurements, Modelo 160, o qual possui especificação de exatidão de 1,5%, obtivemos uma diferença de 3% da indicação do medidor em relação ao campo gerado. Com isso podemos concluir que se desconsiderarmos os erros sistemáticos devido à geometria do gerador de campo 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  $0,02\%/^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de variação da temperatura ambiente, isso significa que num caso extremo de variação de temperatura durante o dia de  $10^{\circ}\text{C}$ , teremos uma variação de  $0,2\%$  na calibração do sensor.

- Custo estimado - O custo estimado em componentes eletrônicos do sensor foi de US\$ 50,00, mas este custo pode ser reduzido, considerando que os componentes foram comprados em pequena quantidade nas lojas de revenda local.

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 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.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O protótipo do sensor de campo elétrico mostrou um bom desempenho nos ensaios em laboratório. Para desenvolver um instrumento comercial ainda são necessários alguns desenvolvimentos de engenharia sugerido a seguir:

1 - Desenvolver uma esfera de material polimérico com eletrodos metálicos depositados na sua superfície de forma a possibilitar a medida das três componentes do campo elétrico simultaneamente e também reduzir o seu volume e peso.

2 - Desenvolver um circuito eletrônico mais compacto ou com maior grau de integração, reduzindo o volume ocupado e com a possibilidade de utilizar três canais de transmissão de dados para a medida das três componentes do campo. Também seria interessante um sistema de mudança de faixa de trabalho automático ou por comando remoto via fibra-óptica.

3 - Aprimorar a montagem mecânica do sensor, aumentando o comprimento da vara telescópica e acoplando a unidade remota com o indicador local.

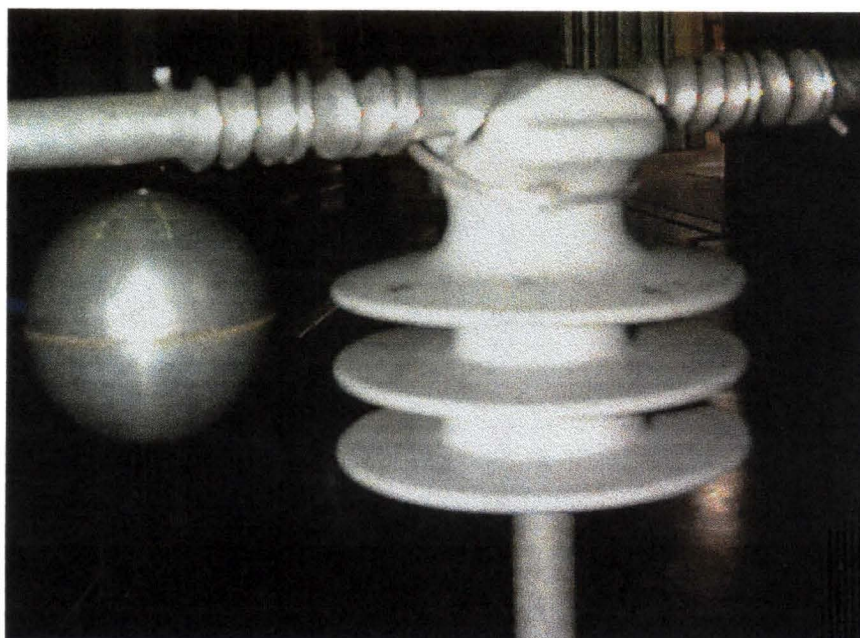
4 - Otimizar a construção do gerador de campo elétrico, utilizando anéis para diminuir os efeitos de borda, visando garantir uma melhor exatidão.

## APÊNDICE

### DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS EM ISOLADORES DE PINO

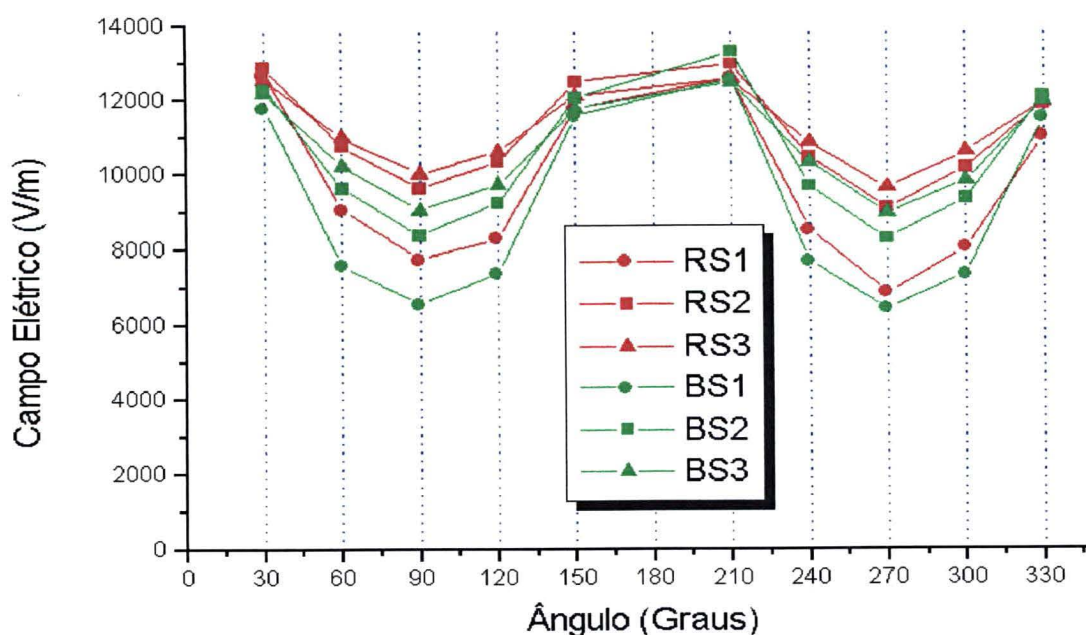
#### UTILIZANDO SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO

Uma aplicação interessante para o sensor de campo elétrico consiste na localização de defeitos em isoladores de pino poliméricos e de porcelana empregados em sistemas de alta tensão. Em um ensaio desenvolvido no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento da (LAC-UFPR/COPEL) pelos pesquisadores Marcelo A. Ravaglio e Luis A. Gamboa, com a utilização do sensor de campo elétrico desenvolvido, descrito neste trabalho, verificou-se que é possível localizar perfurações ou vazamentos em isoladores através da diferença do perfil do campo elétrico entre posições simétricas em relação ao condutor horizontal energizado, próximas a superfície do isolador. Na figura A1 é mostrado o isolador polimérico com o sensor posicionado para medida do perfil do campo elétrico.



**Figura A1**

A técnica consiste em construir uma superfície cilíndrica imaginária envolvendo o corpo do isolador. Em seguida utilizando o sensor de campo elétrico, mede-se a componente vertical do campo elétrico paralela à superfície imaginária, estando o isolador energizado em sua tensão nominal fase-terra (7,6 kV). O ideal seria fazer uma varredura completa de todo o perfil do campo na superfície do cilindro imaginário, mas para reduzir o número de medidas, foram realizadas medidas a cada 30 graus de rotação em torno do isolador, e para cada ângulo de rotação foi variada a altura do sensor em três pontos distintos coincidentes com as três saias do isolador. O ensaio foi realizado utilizando um isolador bom e em seguida utilizando um isolador ruim com um furo visível. A componente vertical do campo elétrico obtido em função do ângulo de rotação e da altura são apresentados na figura A2:



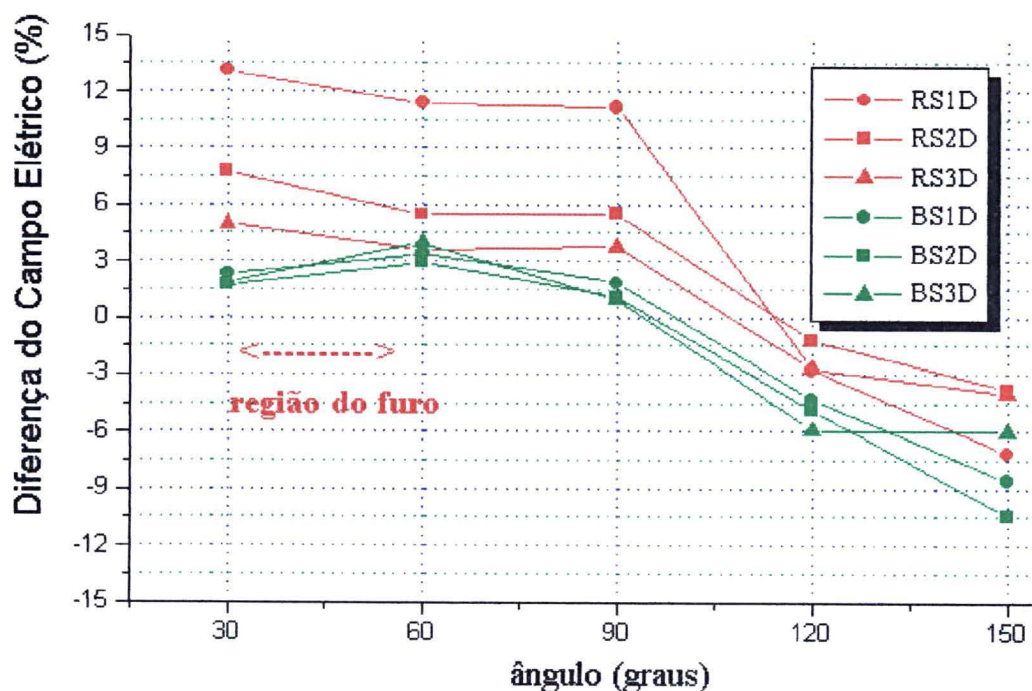
Notação: **RS1,2,3** - Isolador Ruim Saia 1,2,3

**BS1,2,3** - Isolador Bom Saia 1,2,3

**Figura A2**

Analisando o gráfico da figura A2, podemos verificar que existe uma periodicidade da intensidade de campo em função do ângulo de rotação. Essa periodicidade é devida à existência de uma simetria espacial em relação ao plano vertical que divide o isolador e que contém o cabo condutor. Desta forma, para o caso do isolador bom, devemos ter intensidades de campo muito próximas para os ângulos  $\varphi$  e  $\varphi'$  que satisfaçam a condição  $\varphi' = 2\pi - \varphi$ .

Para uma melhor visualização no gráfico da figura A3, plotamos a diferença em porcentagem do campo elétrico entre as posições simétricas em relação ao condutor horizontal energizado do isolador em função do ângulo  $\varphi$ .



Notação: **RS1,2,3** - Isolador Ruim Saia 1,2,3

**BS1,2,3** - Isolador Bom Saia 1,2,3

**Figura A3**

Analisando o gráfico da figura A3, verificamos primeiramente que para o isolador bom (linha verde), a diferença de campo elétrico para cada uma das saias, tendem a valores próximos. Para o isolador ruim (linha vermelha), o qual possui um furo em cima da saia 1 entre 300 e 330 graus, vemos que a diferença de campo elétrico aumenta na direção da região do defeito.

Estes resultados mostram que esta técnica utilizando o sensor de campo elétrico mostrou-se eficiente para a determinação de furos ou defeitos em isoladores nas condições do laboratório, e que, com uma aprimoração do sensor de campo elétrico pode ser possível desenvolver um instrumento para determinar defeitos em isoladores no campo, ou seja, fazer uma avaliação do comportamento do isolador sem retirá-lo do local de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HAFEMEISTER, D. **Biological Effects of Low-Frequency Electromagnetic Fields.** Am. J. Phys., v. 64, n. 8, p. 974 - 981, 1996.
- 2 SAHL, J D.; KELSH, M. A.; GREENLAND, S. **Cohort and Nested Case-Control Studies of Hematopoietic Cancers and Brain Cancer Among Electrical Utility Workers.** Epidemiology, v.4, p. 104-114, 1993.
- 3 WORD HEALTH ORGANIZATION GENEVA. **Environmental Health Criteria 35 Extremely Low Frequency (ELF) Fields.** 1984.
- 4 GAMBOA, L. R. A.; MELO, C. F. **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 MILD, K. H.; SANDSTRÖM, M.; JOHANSSON, A. **Measured 50 Hz Electric and Magnetic Fields in Swedish and Norwegian Residential Buildings.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 45, n.3, p. 710-713, 1996.
- 6 GOCKENBACH, E.; GANZMANN, P.; BROGLI, E. **Some Applications of an Electric Field Sensor in the High Voltage Technique.** Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orlean, LA, USA, 40.06, 1989.
- 7 ROBERT, R.; CHANG, G. L. **Transdutor piezelétrico-óptico para medida de alta tensão.** Revista de Física Aplicada e Instrumentação, v. 7, n. 1, p. 18-24, 1992.
- 8 HUI, Z.; FEIYU, Y. **The influence of Probe on the Measuring Accuracy of Electric Field.** Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. no. 8326 Graz Convention Center Austria, Europe, 1995.

- 9 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC PUBLIC. 833) .  
**Measurement of power frequency electric fields, 1987.**
- 10 MISAKIAN, M.; FULCOMER, P. M. **Measurement of Nonuniform Power  
Frequency Electric Fields.** IEEE Transactions on Electrical Insulation v. EI-18 n.6,  
p. 657-661, 1983.
- 11 BRAUN, A.; BRZOSTEK, E.; KIND, D. 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 BOTTAUSCIO, O.; CROTTI, G.; D'EMILIO, S., et. al. **Generation of Reference  
Electric and Magnetic Fields for Calibration of Power-Frequency Field Meters.**  
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 42, n.2, p. 547-552, 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.