



**ABNT – Associação  
Brasileira de  
Normas Técnicas**

Sede:  
Rio de Janeiro  
Av. Treze de Maio, 13 28º andar  
CEP 20003-900 – Caixa Postal 1680  
Rio de Janeiro – RJ  
Tel.: PABX (021) 210-3122  
Fax: (021) 220-1762/220-6436  
Endereço eletrônico:  
www.abnt.org.br

Copyright © 2000,  
ABNT–Associação Brasileira  
de Normas Técnicas  
Printed in Brazil/  
Impresso no Brasil  
Todos os direitos reservados

## EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE 50 E 60 Hz

Palavra(s)-chave: Campos, magnéticos, elétricos, medições

40 páginas

### **Sumário**

Página	
<i>Prefácio</i> .....	3
Introdução.....	4
Cláusula	
1 Escopo.....	5

2	Referências normativas.....	5
3	Definições.....	6
3.1	Medidores .....	6
3.2	Características de medidores .....	7
3.3	Características dos campos .....	8
3.4	Medidas .....	9
4	Símbolos.....	9
5	Critérios para estabelecimento de valores de referência.....	11
5.1	Condições básicas.....	11
5.2	Valores de referência.....	11
5.3	Modelagem matemática.....	11
5.4	População ocupacional.....	12
5.5	Público em geral.....	12
6	Níveis de referência.....	12
7	Medição de campos magnéticos alternados.....	12
7.1	Especificações de instrumentos .....	12
7.2	Calibração.....	15
7.3	Incerteza da medição .....	15
7.4	Registrando e reportando os resultados de medições .....	16
7.5	Procedimento de medição .....	16
8	Medição de campos elétricos alternados .....	17
8.1	Especificações de instrumentos .....	17
8.2	Calibração.....	18
8.3	Incerteza de medição .....	18
8.4	Registrando e reportando resultados de medições .....	18
8.5	Procedimento de medição .....	19
<b>Anexos</b>		
A	(informativo) Características gerais de campos elétricos e magnéticos .....	21
B	(informativo) Medidor da densidade do fluxo magnético – Guia para medições .....	23
C	(informativo) Medidor de intensidade de campo elétrico – Guia para medições .....	31
D	(informativo) Instrumentação para medição de campo magnético estático.....	37
E	(informativo) Unidades.....	38
F	(informativo) Bibliografia.....	39

## Prefácio

A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB) e dos Organismos de Normalização Setorial

(ONS), são elaboradas por Comissões de Estudo (ABNT/CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Projetos de Norma Brasileira, elaborados no âmbito dos ABNT/CB e ONS circulam para Consulta Pública entre os associados da ABNT e demais interessados.

Anexos A, B, C, D, E e F são para informação.

### **Introdução**

O aumento do interesse em caracterizar a exposição humana a campos magnéticos e elétricos quase-estáticos em vários ambientes levou ao desenvolvimento e a comercialização de muitos medidores de campo com uma grande variedade de especificações. Fontes de campos quase-estáticos incluem dispositivos que operam na frequência industrial (50 e 60 Hz), e produzem os campos e suas harmônicas na frequência industrial, tais como aqueles próximos a linhas de potência e aparelhos domésticos.

A instrumentação, os métodos de medição e os valores de referência de exposição humana a campos produzidos por dispositivos que operam na frequência industrial (50 e 60 Hz) são o foco deste documento.

Os usuários dessa norma incluem fabricantes de instrumentação, concessionárias de energia nas áreas de geração, transmissão e distribuição, e grupos ou indivíduos interessados em caracterizar os campos magnéticos e elétricos quase-estáticos em relação à exposição humana. É necessário que usuários que pretendam fazer medições tenham algum conhecimento da instrumentação bem como das fontes dos campos e suas características. Se não houver tal conhecimento, é bastante recomendado que haja um treinamento. Esta Norma pode servir como um manual para o processo de treinamento devido à informação técnica fornecida nos anexos.

## 1 Escopo

**1.1** Esta Norma estabelece níveis de referência para exposição humana a campos elétricos e magnéticos de 50 Hz e 60 Hz, com o objetivo de nortear os projetos de instalações elétricas de geração, transmissão e distribuição e as medições destes campos.

Os níveis de referência desta Norma não invalidam aqueles estabelecidos por outras instituições para os demais objetivos.

**1.2** Esta Norma fornece um guia para medição dos valores eficazes do estado-permanente de campos elétricos e magnéticos quase-estáticos que têm componentes de frequência 50 e 60 Hz. Fontes de campos quase-estáticos incluem dispositivos que operam nas frequências industriais e produzem campos nessas frequências industriais e suas harmônicas. Os limites de magnitude abordados por esta Norma são de 100 nT a 100 mT e 1 V/m a 50 kV/m para campos magnéticos e campos elétricos, respectivamente. Quando medições fora desses limites são realizadas, a maioria das provisões dessa Norma ainda se aplicará, porém algumas provisões como especificação da incerteza e o procedimento de calibração podem precisar de modificações. Em especial, essa Norma:

- a) Define terminologia;
- b) Descreve os critérios para estabelecimento de valores de referência;
- c) Define os valores de referência;
- d) Identifica os requisitos de especificação do medidor de campo;
- e) Define os requisitos aplicáveis à incerteza da instrumentação;
- f) Descreve as características gerais dos campos;
- g) Descreve os princípios operacionais da instrumentação;
- h) Descreve os métodos de medição.

**1.3** Fontes de incerteza durante a calibração e a medição também são identificadas e um guia é fornecido a respeito de como devem ser combinadas a fim de determinar a incerteza total da medição. Com respeito à medição de campo elétrico, esta Norma considera apenas a medição da intensidade do campo elétrico não perturbado em um ponto no espaço (isto é, o campo elétrico antes da introdução do medidor de campo e do operador) ou em superfícies condutoras.

**1.4** Esta Norma aplica-se a todas as instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica operadas na frequência de 50 ou 60 Hz, envolvendo:

- a) Usinas geradoras de energia elétrica;
- b) Subestações de energia elétrica;
- c) Linhas de transmissão de energia elétrica;
- d) Circuitos de distribuição de energia elétrica.

## 2 Referências Normativas

Os seguintes documentos normativos contêm provisões que, através da referência neste texto, constituem provisões desta Norma. Na época de publicação, as edições indicadas foram válidas. Todos os documentos normativos são assuntos para revisão, e grupos que entram em acordos, baseados nesta Norma, são encorajados a investigar a possibilidade de aplicação das edições mais recentes de documentos normativos indicados.

IEC 61000-3-2:1995, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 3: Limites – Seção 2: Limites para emissão de corrente harmônica (corrente de entrada do equipamento  $\leq 16$  A, por fase).

IEC 61000-4-2: 1995, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 4:: Técnicas de teste e medição – Seção 2: Teste de imunidade à descarga eletrostática – Publicação EMC Básica.

IEC 61000-4-3: 1995, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 4: Técnicas de teste e medição – Seção 3: Teste de imunidade ao campo eletromagnético radiado de rádio frequência.

IEC 61000-4-4: 1995, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 4: Técnicas de teste e medição – Seção 4: Teste de imunidade a transientes rápidos – Publicação EMC Básica.

IEC 61000-4-6: 1996, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 4: Técnicas de teste e medição – Seção 6: Imunidade para distúrbios conduzidos, induzidos por campos de rádio frequência.

IEC 61000-4-8: 1993, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 4: Técnicas de teste e medição – Seção 8: Teste de imunidade a campo magnético a frequência industrial – Publicação EMC Básica.

IEC 61000-6-2: 2005, Compatibilidade Eletromagnética (EMC) – Parte 6: Padrão – Seção 2: Imunidade para ambientes industriais.

IEC 61786: 1998, Medição dos campos magnéticos e elétricos de baixa frequência considerando a exposição de seres humanos – Requisitos especiais para instrumentação e guia para medição..

CISPR 11:1990, Limites e métodos de medição das características dos distúrbios eletromagnéticos dos aparelhos industriais científicos e médicos (ISM) de rádio frequência

ISBN 92-67-01075-1: 1993, Vocabulário internacional de termos básicos e gerais em metrologia, Organização Internacional de Padronização.

ISBN 92-67-10188-9: 1995, ISO TAG, Grupo Técnico Consultivo de Metrologia ISO, Working Group 3, Guia para a expressão da incerteza na medição.

IEEE Std 539: 1990, Definições de normas de termos relacionados a efeitos Corona de Campo nas linhas de potência aérea.

NBR 5422/1985 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

NBR 5117/ 1984 - Maquinas síncronas.

NBR 5410/2004 – Instalações elétricas de baixa tensão.

NBR 5433/1982 – Redes de distribuição aérea rural de energia elétrica.

NBR 5434/1982 – Redes de distribuição aérea urbana de energia elétrica.

NBR 5456 /1986 – Eletrotécnica e eletrônica – Eletricidade geral – Terminologia.

NBR 5457/ 1980 - Eletrotécnica e Eletrônica – Maquinas girantes.

NBR 5460 /1992 – Sistemas elétricos de potência.

NBR 5464 /1981 – Eletrotécnica e eletrônica – Interferências eletromagnéticas – Terminologia.

NBR 6548 /Ano – Eletrotécnica e eletrônica – Transmissão de energia elétrica e corrente contínua de alta tensão – Terminologia.

NBR 9523/ 1995 - Subestação de Distribuição.

### **3 Definições**

Para os objetivos desta Norma, as seguintes definições se aplicam.

NOTA – Nesta Norma, as expressões “densidade do fluxo magnético” e “campo magnético” serão considerados sinônimos.

#### **3.1 Medidores**

##### **3.1.1 Medidor de intensidade do campo elétrico alternado**

Medidor projetado para medir campos elétricos alternados. Três tipos de medidor de intensidade de campo elétrico estão disponíveis: medidor de espaço livre, medidor de referência de terra e medidor eletro-óptico.

NOTA – Os medidores de campo elétrico consistem de duas partes: a sonda ou elemento sensível de campo, e um detector que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz do campo elétrico através de um mostrador analógico ou digital.

###### **3.1.1.1 Medidor de espaço livre**

Medidor que mede a intensidade do campo elétrico em um ponto acima do solo, suspenso no espaço sem um contato condutivo ligado a terra.

NOTA – Medidores de espaço livre são comumente construídos para medir a corrente elétrica induzida entre duas partes isoladas de um corpo condutor. Sabendo que a corrente elétrica induzida é proporcional à derivada no tempo da intensidade de campo elétrico, o circuito do detector do medidor contém freqüentemente um estágio integrador com a finalidade de recuperar a forma de onda da intensidade de um campo elétrico. A corrente da onda integrada também coincide com a corrente recarregada induzida. O estágio de integração é também desejado, particularmente para a medição dos campos elétricos harmônicos, pelo fato dele eliminar a carga excessiva das componentes harmônicas no sinal da corrente induzida.

###### **3.1.1.2 Medidor de referência de terra**

Medidor que mede o campo elétrico na superfície do solo ou próximo dela, freqüentemente usado para medir a corrente induzida ou a oscilação da carga entre um eletrodo isolado e o solo. O eletrodo isolado é geralmente uma placa localizada no mesmo nível ou um pouco abaixo da superfície do solo.

Estes medidores freqüentemente contêm um circuito integrador para compensar a relação da derivada entre a corrente induzida e o campo elétrico.

###### **3.1.1.3 Medidor eletro-óptico**

Medidor que mede a intensidade do campo elétrico através de mudanças na transmissão da luz por meio de uma fibra ou cristal sob o efeito do campo elétrico.

NOTA – Enquanto vários métodos eletro-ópticos podem ser usados para medir campos elétricos, por exemplo, o efeito Pockels, o efeito Kerr e técnicas interferométricas, esta Norma considera apenas medidores de campo eletro-óptico que utilizam o efeito Pockels.

### 3.1.2 Medidor da densidade do fluxo magnético

Medidor desenvolvido para medir a densidade do fluxo magnético, de baixo peso, operado por bateria, que fornece uma leitura em tempo real e pode ser convenientemente segurado pela mão a fim de fazer um mapeamento em diferentes localizações.

Os medidores de campos magnéticos consistem de duas partes: a sonda ou elemento campo-sensor e um detector que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz do campo magnético em mostrador analógico ou digital.

NOTA - Diferentes tipos de medidores são usados para a mesma coisa, como medidores de campo com sondas indutivas (bobinas), medidores com sondas de efeito Hall, medidores que combinam duas bobinas com um núcleo ferromagnético como em um magnetômetro de núcleo saturável.

#### 3.1.2.1 Magnetômetro de núcleo saturável

Instrumento desenvolvido para medir campos magnéticos através do uso das características magnéticas não lineares de uma sonda ou elemento sensível que possui núcleo ferromagnético.

#### 3.1.2.2 Bobina de indução

Sensor da densidade do fluxo magnético compreendido por uma bobina que produz uma tensão induzida proporcional à derivada no tempo de um campo magnético.

NOTA 1 - Visto que a tensão induzida é proporcional à derivada no tempo da densidade do fluxo magnético, o circuito detector do sensor necessita de um estágio integrador para recuperar a forma de onda da densidade do fluxo magnético.

NOTA 2 - Este sensor também pode ser usado para medir densidade do fluxo magnético estático (corrente contínua) se estiver em rotação.

#### 3.1.3 Sonda de efeito Hall

Sensor de densidade de fluxo magnético contendo um elemento que utiliza o efeito Hall para produzir uma tensão proporcional à densidade do fluxo magnético.

NOTA – Sondas de efeito Hall respondem a densidades de fluxos magnéticos estáticos ou variantes no tempo. Elas têm sido raramente usadas para medir campos magnéticos de linhas de corrente alternada, em razão de sua sensibilidade limitada e de problemas de saturação encontrados quando se tenta medir induções magnéticas de baixa intensidade a frequência industrial em presença de um campo geomagnético estático de intensidade apreciável.

## 3.2 Características de medidores

### 3.2.1 Fator de crista

Para funções periódicas, a relação do valor da crista da onda (pico, máximo) com o de seu valor eficaz.

### 3.2.2 Diafonia

Ruído ou sinal parasita gerado por sinais alternados ou sinais tipo pulso em circuitos adjacentes.

### 3.2.3 Resposta em frequência

Resposta (leitura) de um medidor de campo com um campo de amplitude constante, porém com diferentes frequências.

### 3.2.4 Banda passante

- (1) (transmissão de dados) uma faixa de espectro de frequência que pode passar com uma baixa atenuação.
- (2) (circuitos e sistemas) uma banda de frequências que passa por um filtro com uma pequena atenuação (relativamente a outras bandas de frequência fortemente atenuadas).

### 3.2.5 Detector de média retificada (calibrado em valor eficaz) (ver 3.2.6)

Circuito detector que retifica o sinal da sonda e é calibrado para fornecer o valor correto eficaz de um campo senoidal em uma dada frequência.

NOTA - Se houver harmônicas no campo, um medidor com um detector de média retificada (eficaz) não indicará o seu verdadeiro valor eficaz se o sinal da sonda for proporcional à derivada no tempo. Se o detector contém um estágio de integração, o erro é reduzido. O erro também será uma função da relação de fase entre as componentes harmônicas e fundamental [36], [61].

### 3.2.6 Detector de valor eficaz verdadeiro (ver 3.2.5)

Detector que contém um componente de circuito que faz a operação matemática

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt}$$

(1)

para um sinal periódico  $v(t)$ , onde  $T$  é o período do sinal.

NOTA 1 – Se  $v(t)$  é proporcional à derivada do tempo do campo, o circuito detector também requer um estágio inicial de integração para a operação adequada a fim de recuperar a forma de onda da densidade do fluxo magnético [25], [61].

Esse tipo de detector fornece o valor eficaz verdadeiro de um campo contendo harmônicas, uma vez que a resposta em frequência do detector é plana na faixa de frequência de interesse.

NOTA 2 – Se níveis significativos de harmônicas estão presentes em  $v(t)$ , uma atenção particular deve ser dada à possibilidade de efeitos de saturação do amplificador se a integração segue um ou mais estágios de amplificação.

### 3.3 Características dos campos

#### 3.3.1 Valor eficaz máximo de campo elétrico (campo elétrico máximo)

Valor da medição de campos elétricos quase-estáticos elipticamente polarizados. Em um dado ponto, é o valor da raiz média quadrática (eficaz) do semi-eixo maior da elipse do campo elétrico.

#### 3.3.2 Valor eficaz máximo de campo magnético (campo magnético máximo)

Valor da medição de campos magnéticos quase estáticos elipticamente polarizados. Em um dado ponto, é o valor da raiz média quadrática (eficaz) do semi-eixo maior da elipse do campo magnético.

#### 3.3.3 Campo perturbado

Campo que é modificado em magnitude ou direção, ou ambos, pela introdução de um objeto.

NOTA - O campo elétrico na superfície do objeto é, geralmente, fortemente perturbado pela presença de um outro objeto. Nas frequências industriais, a densidade do fluxo magnético não é, em geral, muito perturbada pela presença de objetos que estão livres de materiais magnéticos. Exceções são feitas para regiões próximas da superfície de condutores elétricos espessos e regiões distantes de condutores espessos, se o condutor estiver próximo da origem de um campo magnético. As perturbações nesses casos devem-se à oposição de campos magnéticos produzidas por correntes de Foucault nos condutores.

#### 3.3.4 Campo não-perturbado

Campo que existiria sem a presença de pessoas ou objetos móveis.

#### 3.3.5 Campo quase-estático

Campo que satisfaz a condição  $f \ll c/l$ , onde  $f$  é a frequência do campo,  $c$  é a velocidade da luz, e  $l$  é uma dimensão característica de uma medida geométrica, por exemplo a distância entre a fonte do campo e o ponto de medição.

NOTA – Os campos magnéticos e elétricos das frequências industriais próximos às instalações elétricas são exemplos de campos quase-estáticos.

#### 3.3.6 Campo elétrico resultante

Campo elétrico fornecido pela fórmula

$$E_R = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2)$$

onde  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  são os valores eficazes das três componentes ortogonais de campo.

O **campo elétrico resultante** também pode ser fornecido pela fórmula

$$E_R = \sqrt{E_{\max}^2 + E_{\min}^2} \quad (3)$$

onde  $E_{\max}$  e  $E_{\min}$  são os valores eficazes do semi-eixo maior e do semi-eixo menor do campo elétrico elíptico, respectivamente. A resultante  $E_R$  é sempre  $\geq E_{\max}$ . Se o campo elétrico é linearmente polarizado,  $E_{\min} = 0$  e  $E_R = E_{\max}$ . Se o campo elétrico for circularmente polarizado,  $E_{\max} = E_{\min}$  e  $E_R \approx 1,41E_{\max}$ .

NOTA 1 – A definição de “intensidade eficaz de campo” na norma CENELEC em projeto ENV 50166-1 [5] é equivalente ao campo magnético resultante ou campo elétrico resultante, dependendo da situação.

NOTA 2 – Para sistemas polifásicos, o campo elétrico resultante pode ser aproximado de forma conservativa pela equação 2 e 3, uma vez que não se conhecem os ângulos de fase das componentes no momento da medição. Para sistemas monofásicos, essa equação fornece o valor correto do campo resultante.

#### 3.3.7 Campo magnético resultante

O campo magnético é fornecido pela fórmula

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4)$$

onde  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  são os valores eficazes das três componentes ortogonais de campo

O campo magnético resultante também é fornecido pela expressão

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (5)$$

onde  $B_{\max}$  e  $B_{\min}$  são os valores eficazes do semi-eixo maior e do semi-eixo menor do campo magnético elíptico, respectivamente. A resultante  $B_R$  é sempre  $\geq B_{\max}$ . Se o campo magnético é linearmente polarizado,  $B_{\min} = 0$  e  $B_R = B_{\max}$ . Se o campo magnético for circularmente polarizado,  $B_{\max} = B_{\min}$  e  $B_R \approx 1,41B_{\max}$ .

NOTA 1 – A definição de “intensidade eficaz de campo” na norma CENELEC em projeto ENV 50166-1 [5] é equivalente ao campo magnético resultante ou campo elétrico resultante, dependendo da situação.

NOTA 2 – Para sistemas polifásicos, o campo magnético resultante pode ser aproximado de forma conservativa pela equação 4 e 5, uma vez que não se conhecem os ângulos de fase das componentes no momento da medição. Para sistemas monofásicos, essa equação fornece o valor correto do campo resultante.

### 3.4 Medidas

#### 3.4.1 Fator de correção

Fator numérico pelo qual o resultado incorreto de uma medição é multiplicado a fim de compensar um erro conhecido.

NOTA – Sabendo que o erro não pode ser determinado perfeitamente, a compensação não pode ser completa.

#### 3.4.2 Fator de cobertura

Fator numérico usado como multiplicador da incerteza padrão total a fim de obter uma incerteza expandida.

NOTA – Para uma quantidade  $z$  determinada por uma distribuição normal com esperança matemática  $\mu_z$  e desvio padrão  $\sigma$ , o intervalo  $\mu_z \pm k\sigma$  abrange 68,27%, 95,45% e 99,73% da distribuição para o fator de cobertura  $k = 1, 2, \text{ e } 3$ , respectivamente.

#### 3.4.3 Fator de escala

Fator pelo qual a leitura do instrumento é multiplicada para se obter o valor da entrada.

#### 3.4.4 Medição pontual (medição em um ponto num dado instante de tempo)

Medição que é feita num dado instante e num dado ponto no espaço, que não fornece informações sobre as variações temporais ou espaciais do campo.

#### 3.4.5 Incerteza padrão

Incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão.

#### 3.4.6 Incerteza da medição

Parâmetro que, associado com o resultado de uma medição, caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos à medição.

NOTA – A incerteza da medição geralmente compreende muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados baseados em uma distribuição estatística de uma série de resultados de medição, e pode ser caracterizada por desvios padrões experimentais. Estimativas de outros componentes podem ser baseadas na experiência ou outra informação.

## 4 Símbolos

$a$	= raio da bobina sonda; raio da sonda esférica de campo elétrico
$B$	= vetor densidade do fluxo magnético
$B_f$	= densidade do fluxo magnético (frequência fundamental)
$B_j$	= densidade do fluxo magnético na $j$ -ésima frequência ( $j = 1$ para frequência fundamental)
$B_{RLj}$	= nível de referência da CENELEC para a densidade do fluxo magnético na $j$ -ésima frequência
$B_0$	= amplitude de campo magnético alternado
$B_R$	= campo magnético resultante
$B_z$	= densidade do fluxo magnético axial
$B_{x,y,z}$	= valores eficazes das componentes ortogonais da densidade do fluxo magnético
$B_{\max}, B_{\min}$	= valores eficazes do semi-eixo maior e do semi-eixo menor da elipse do campo magnético
$C$	= capacitância parasita de uma bobina sonda
$c_e$	= coeficiente eletro-óptico do cristal de Pockels
$d$	= distância de placas paralelas; distância da fonte de um campo eletromagnético
$D$	= vetor de deslocamento elétrico
$E$	= intensidade de campo elétrico
$E_i$	= campo elétrico na $i$ -ésima frequência ( $i = 1$ para frequência fundamental)
$E_R$	= campo elétrico resultante

$E_0$	= intensidade de campo elétrico uniforme
$E'$	= campo elétrico do cristal de Pockels
$E_{x,y,z}$	= valores eficazes das componentes ortogonais do campo elétrico
$E_{\max}, E_{\min}$	= valores eficazes do campo elétrico no semi-eixo maior e do semi-eixo menor da elipse
$I$	= corrente circulante na bobina de campo magnético
$I_i$	= luz incidente (medidor de campo eletro-óptico)
$I_t$	= luz transmitida (medidor de campo eletro-óptico)
$l$	= espessura do cristal de Pockels
$L$	= indutância da bobina sonda
$n$	= índice de refração
$N$	= número de espiras (sistema da bobina de campo magnético)
$Q$	= carga induzida
$r$	= distância entre a fonte do campo magnético e o local de medição; resistência da bobina sonda e de seus terminais condutores
$R$	= impedância aproximada do circuito detector de entrada (medidor de campo magnético)
$S$	= área da superfície do eletrodo (medidor de campo elétrico)
$t$	= tempo
$T$	= período do sinal periódico
$V$	= tensão
$v(t)$	= sinal elétrico periódico
$V_p$	= bobina sonda de tensão
$W$	= relação entre a tensão $V_p$ fornecida e a tensão $V$ induzida em uma bobina sonda
$\alpha_i$	= fração da $i$ -ésima harmônica do campo magnético
$\epsilon_0$	= permissividade do espaço livre
$\lambda$	= comprimento de onda da luz
$\mu_0$	= permeabilidade do espaço livre
$\phi$	= fluxo magnético
$\omega$	= frequência angular do campo alternado

## 5 Critérios para estabelecimento de valores de referência

Os valores de referência de campos elétricos e magnéticos para exposição humana estabelecidos pela ICNIRP (Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes), sucessora do IRPA (IAssociação Internacional de Proteção contra Radiações) e de seu Grupo de Trabalho denominado INIRC (Comitê Internacional para Radiação Não-ionizante) são reconhecidos e recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

### 5.1 Condição básica

Os critérios para estabelecimento dos valores de referência são baseados em efeitos biológicos comprovados, de caráter imediato com exposição de curto prazo, tais como, estimulação das células nervosas do cérebro, de nervos periféricos, de músculos, incluindo o coração, além de choques e queimaduras causadas por contato com objetos condutores, podendo envolver, em função da intensidade da corrente aplicada, dificuldades de respiração e fibrilação ventricular (batimento cardíaco desordenado). O principal mecanismo de interação é a indução de corrente elétrica e os efeitos ocorrem durante o período de exposição aos campos.

NOTA 1- Nos casos de efeitos em potencial em virtude de exposição a longo prazo, a ICNIRP concluiu que os resultados disponíveis das pesquisas são insuficientes para estabelecer valores de referência com base científica [29]. Os estudos que sustentariam a hipótese de efeitos de longa duração são contraditórios e não encontram sustentação nos mecanismos biológicos conhecidos de interação entre campos elétricos e magnéticos com os seres vivos, bem como em estudos laboratoriais *in vitro* ou em animais.

NOTA 2 - A NBR 5422 faz referência sobre a legislação brasileira que regulamenta o uso do interior da faixa das linhas de transmissão. Assim, conforme esta legislação, a população autorizada a utilizar o interior das faixas de linha de transmissão é aquela classificada como "população ocupacional" pela ICNIRP.

### 5.2 Valores de Referência

O corpo humano na presença de campos elétricos e magnéticos está sujeito a efeitos de tensões e correntes induzidas.

Os valores de referência para exposição humana a campos elétricos e magnéticos estão estabelecidos a partir de correlações entre grandezas físicas e seus efeitos biológicos da exposição.

A grandeza utilizada para especificar tais correlações é a densidade de corrente elétrica. O valor de 100 mA/m<sup>2</sup> foi estabelecido como referência, a partir do qual são excedidos os limiares para mudanças agudas na excitabilidade do

sistema nervoso central e para outros efeitos agudos, como a reversão do potencial evocado visualmente, conhecido como fosfeno.

Em função da pouca disponibilidade de dados relacionando as correntes transitórias com efeitos na saúde, a Organização Mundial de Saúde recomenda que os valores de referência para densidades de correntes induzidas por transitórios ou campos com picos de duração muito curta sejam tomados como valores instantâneos e não como médias temporais.

Os valores de referência para exposição são fornecidos para comparação com valores medidos nas grandezas físicas. A concordância com os valores de referência apresentados nesses critérios, assegura o atendimento da condição básica.

Os valores de referência são estabelecidos a partir da condição básica, através de modelagem matemática e por extrapolação de resultados de investigações de laboratório em frequências específicas. Os valores são fornecidos para a condição de acoplamento máximo do campo com o indivíduo exposto.

NOTA – Os valores de referência podem ser excedidos. Nestes casos, uma análise mais detalhada se faz necessária de modo a verificar que as densidades de correntes estabelecidas não são excedidas.

### 5.3 Modelagem Matemática

Enquanto os campos elétricos estão associados à presença de cargas elétricas, os campos magnéticos estão associados ao movimento físico destas cargas elétricas (corrente elétrica), nas baixas frequências.

Os modelos matemáticos disponíveis permitem verificar os níveis de campo elétrico e magnético para a exposição respeitando a densidade de corrente do valor de referência.

Os valores de referência para campos elétricos e magnéticos devem ser considerados separadamente e não aditivamente.

Para o estabelecimento de valores de referência, as densidades de correntes induzidas por cada um destes campos são calculadas separadamente através de modelos matemáticos adequados, de forma a atender às condições básicas.

### 5.4 População ocupacional

As populações ocupacionais expostas a condições conhecidas e pré-estabelecidas, devem ser treinadas convenientemente para exercer de forma adequada as suas atividades.

O valor de referência para exposição ocupacional corresponde a campos com densidades de corrente inferiores a 10 mA/m<sup>2</sup>, adotando-se um fator de segurança igual a 10.

### 5.5 Público em geral

O público em geral é constituído por pessoas de todas as faixas etárias e condições distintas de saúde. Na maioria dos casos, este público não tem consciência de sua exposição aos campos elétricos e magnéticos. Assim, adota-se valores de referência mais conservadores em relação à população ocupacional.

O valor de referência para o público em geral corresponde a campos com densidades de corrente inferiores a 2 mA/m<sup>2</sup>, adotando-se um fator de segurança igual a 50.

## 6 Níveis de Referência

Na tabela 1 estão mostrados os níveis de referência para campo elétrico e magnético que atendem às condições básicas.

**Tabela 1: Níveis de referência de exposição a campos elétricos e magnéticos**

Frequência	50 Hz		60 Hz	
	Elétrico (kV / m)	Magnético (μT)	Elétrico (kV / m)	Magnético (μT)
População Ocupacional	10	500	8,3	416,5
Público em Geral	5	100	4,16	83,3

## 7 Medição de campos magnéticos alternados

### 7.1 Especificações dos instrumentos

Os vários tipos de instrumentos disponíveis para caracterizar campos magnéticos quase-estáticos são descritos em B.1. Os instrumentos devem estar acompanhados de informação adequada incluindo suas especificações e manual de instrução claramente redigidos, para habilitar os usuários a determinar a conformidade desta Norma, ajudando-os a operar corretamente o medidor de campo, e para avaliar a utilidade de aplicação do dispositivo para o usuário. Procedimentos de operações complexas devem ser evitados. As especificações que devem ser fornecidas e/ou satisfeitas são dadas abaixo.

NOTA – Instrumentos que não obedecem às especificações abaixo podem ser usados se demonstrado que, dentro das condições em que os mesmos forem utilizados, os resultados obtidos não sejam significativamente diferentes. Por exemplo, para um medidor com um detector de média retificada, com ou sem um estágio integrador, pode ser mostrado que as harmônicas no campo são desprezíveis se o instrumento for calibrado na frequência fundamental do campo.

#### 7.1.1 Incerteza dos instrumentos (Exatidão)

O sistema de medição para campos magnéticos alternados deve indicar o valor eficaz do campo magnético uniforme, com uma incerteza menor que 10% da leitura mais 20 nT, para mais ou para menos, após os fatores de correção terem sido aplicados, se for apropriado.

NOTA 1 – A incerteza de um instrumento é determinada por várias componentes, como incerteza da calibração, variação da eletrônica com a temperatura, estabilidade e fontes de ruído externo. A incerteza acima é associada com o projeto e o funcionamento de um medidor de densidade de fluxo magnético em um campo praticamente uniforme. O valor 10%

refere-se à incerteza durante a calibração na faixa de frequência especificada e inclui aquelas no valor da densidade do fluxo magnético e as adicionais do processo de calibração (ver 7.2). O fator de cobertura vale 2. A inclusão de 20 nT antecipa as incertezas instrumentais durante a calibração da escala mais sensível e quando os campos da ordem de 0,1  $\mu\text{T}$  são medidos.

NOTA 2 – Outras fontes da incerteza de medição e diretrizes para o seu tratamento são dadas na cláusula B.1 e 7.3, respectivamente.

### **7.1.2 Escala de magnitude**

A escala de magnitude na qual o instrumento opera com uma incerteza especificada deve ser claramente indicada.

### **7.1.3 Banda passante**

O instrumento deve ser fornecido com os dados de calibração ou especificações que habilitam o usuário a estimar a incerteza em determinados níveis de campo quando estiver usando o instrumento em campos que contenham diferentes frequências. A informação também deve incluir a sensibilidade do instrumento para frequências além da faixa utilizável pretendida, por exemplo os pontos de -3dB. A resposta de frequência do instrumento deve ser tal que o requisito da incerteza instrumental (ver 7.1.1) é preenchido na faixa de frequência pretendida.

NOTA – A incerteza instrumental permitida associada com a resposta da frequência é aumentada para  $\pm 20\%$  (fator de cobertura 2) para pequenos medidores de exposição pessoal, dispositivos que podem ser carregados no corpo, e que periodicamente gravam o campo magnético resultante na frequência industrial e as suas harmônicas (ver cláusula B.1).

### **7.1.4 Faixas de operação de temperatura e de umidade**

As faixas de temperatura e de umidade relativa nas quais o instrumento opera com incertezas especificadas deve ser pelo menos de 0 °C a 45 °C e de 5% a 95%, respectivamente. Mudanças repentinas de temperatura que possam causar a condensação no instrumento devem ser evitadas.

### **7.1.5 Fontes de potência**

Se baterias forem usadas, é conveniente prever um meio para indicar se a condição da bateria esta adequada para uma operação apropriada do medidor de campo. Instrumentos usados para registrar exposição pessoal devem ser capazes de operar pelo menos oito horas dentro dos limites especificados da incerteza antes de serem trocados ou quando for necessário recarregar as baterias. Se baterias recarregadas forem usadas, é recomendado que a instrumentação não seja operada enquanto estiver conectada à rede de alimentação. Quando tal conexão for necessária, deve ser demonstrado que os campos parasitas do carregador de bateria, os distúrbios conduzidos através da rede, e os acoplamentos eletromagnéticos via os fios de conexão (do carregador de bateria) não afetem a medição (ver 7.1.8).

NOTA – Se baterias com coberturas ferromagnéticas são usadas nos medidores, cuidados devem ser tomados para que isso não influencie significativamente nas leituras feitas pelo instrumento.

### **7.1.6 Legibilidade da escala**

A marcação analógica ou o mostrador digital de um medidor de campo magnético deve ser bastante grande para ser facilmente lido na distância de um braço. Se mais de uma faixa de sensibilidade for fornecida, o valor máximo da escala na faixa selecionada deve ser indicado e as unidades devem ser de fácil interpretação. Para instrumentação com seleção de escala automática, a faixa de magnitude deve ser indicada em outro lugar, por exemplo, no manual do usuário. A instrumentação deve fornecer uma indicação clara das unidades que estão sendo mostradas.

NOTA – Recomenda-se que para atender esta norma, a instrumentação produzida antes da sua publicação e que não indica as unidades deve ser fornecida com uma etiqueta apropriada para tanto. Isso pode ser feito pelo usuário que pode aplicar a etiqueta ao corpo do medidor.

### **7.1.7 Dimensões do instrumento**

As dimensões do involucro que contém o circuito detector e qualquer cabo de conexão devem ser fornecidas. O tamanho das sondas ou elementos sensores deve ser apropriado para a variação espacial do campo medido. Os elementos sensores devem ter uma área de 0,01 m<sup>2</sup> ou menor. Com instrumentos de três eixos, os três elementos sensores devem ser centralizados (isto é bobinas sondas que têm um ponto central em comum) ou, se os elementos sensores não forem maiores que 0,05 m, eles têm que estar o mais próximo possível uns dos outros. A dimensão máxima do volume contendo as três bobinas sondas combinadas não deve exceder 0,2 m. As bobinas sondas podem ter seções retas circulares ou quadradas. Pequenos desvios dessas formas, como, por exemplo, onde bobinas concêntricas se cruzam, são permitidos.

As localizações e orientações das sondas que estão contidas dentro da caixa dos medidores de campo magnético devem ser claramente indicadas no instrumento ou no manual de instrução.

### **7.1.8 Compatibilidade eletromagnética**

#### **7.1.8.1 Imunidade**

##### **a) Campo elétrico na frequência industrial**

A instrumentação usada nas vizinhanças de equipamentos operando em alta tensão nas frequências industriais não deve ser afetada significativamente pelo campo elétrico ambiente até 20kV/m, i.e. a influência do campo elétrico na leitura do campo magnético deve ser menor que 20nT. Se necessário este requisito de imunidade pode ser aumentado para alguns ambientes extremos onde campos elétricos tão fortes quanto 100kV/m podem existir, por exemplo, próximos aos condutores de linhas de transmissão de alta-tensão.

NOTA 1 – Testes de imunidade a campos elétricos na frequência industrial podem ser feitos usando sistemas de placas paralelas.

NOTA 2 – O efeito da proximidade do usuário ao instrumento pode blindar ou aumentar o campo elétrico, dependendo da geometria do campo e da localização do medidor do campo magnético em relação ao usuário.

##### **b) Campos eletromagnéticos radiados**



O peso da instrumentação deve ser fornecido. O peso de instrumentação portátil deve ser o mais baixo e o mais prático para permitir uma operação manual sob condições restritas, por exemplo, em alguns ambientes industriais.

## 7.2 Calibração

Os sistemas de medição de campo devem ser submetidos à calibração periodicamente durante toda sua vida. Os testes de calibração devem seguir os procedimentos descritos na Norma IEC 61786.

## 7.3 Incerteza da medição

A fim de determinar a incerteza total associada com a medição do valor eficaz da densidade do fluxo magnético em ambientes de medições diferentes, devem ser levadas em consideração de forma apropriada todas as fontes de incerteza. As possíveis fontes de incerteza são as seguintes:

- Incerteza de calibração;
- Efeitos de mediação da bobinas durante a medição de um campo não uniforme;
- Posicionamento da sonda em campos não-uniformes;
- Resposta em frequência ou limitações da banda passante;
- Blindagem inadequada do campo elétrico;
- Interferência eletromagnética do ambiente;
- Ortogonalidade das bobinas de três eixos;
- Diafonia;
- Constante de tempo do instrumento;
- Temperatura.

Algumas fontes de incertezas podem ser reduzidas a níveis desprezíveis. Por exemplo, uma blindagem apropriada pode reduzir a suscetibilidade a campos elétricos nas frequências industriais e a interferência eletromagnética [24]. Semelhantemente, suportes fabricados com materiais isolantes podem ser usados para um posicionamento preciso da sonda do medidor de campo em campos altamente não-uniformes.

NOTA – Pode haver ambientes de medição extremos para os quais uma blindagem adequada contra interferência eletromagnética seja difícil, por exemplo, próximo de estações transmissoras de rádio e TV de frequências muito alta (VHF) e ultra alta (UHF).

Fatores de correção conhecidos devem ser aplicados nas leituras obtidas com medidores de densidade de fluxo magnético. Se for impraticável aplicar fatores de correção, a influência dos fatores de correção deve ser tratada como uma incerteza de medição adicional.

Uma análise é necessária quando se faz um cálculo de incerteza. Se, por exemplo, um campo magnético contém harmônicas, o valor eficaz real da densidade do fluxo magnético é dado pela fórmula.

$$B = B_f \sqrt{1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \dots}$$

(6)

onde

$B_f$  é o valor de eficaz de uma componente do campo fundamental;

$\alpha_i$  é a fração do  $i$ -ésimo harmônico.

Se as harmônicas diminuem em amplitude nas frequências mais altas e a banda passante do medidor de campo é insuficiente, o valor eficaz real da densidade do fluxo magnético pode ainda não ser fortemente afetado pela resposta de frequência, limitada devido ao resultado dado na equação (6).

A avaliação das incertezas deve ser feita de acordo com a ISO TAG 4, WG 3 que exige que o desvio padrão associado com cada quantidade que influencia a medição deve ser determinado com base nas medições feitas ou com base na experiência. O desvio padrão combinado deve ser obtido pela a raiz quadrada da soma das variâncias (i.e. a raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios padrões). A incerteza expandida (total) deve ser  $k$  vezes o desvio padrão combinado, onde  $k$  é o fator de cobertura. O fator de cobertura deve ser 2 o qual, para distribuições Gaussianas, irá corresponder a um intervalo de confiança de aproximadamente 95%.

## 7.4 Registrando e reportando os resultados de medições

A informação que é requerida quando os resultados das medidas são registrados e reportados pode variar dependendo dos objetivos das medições. Uma indicação clara dos objetivos das medições deve ser fornecida desde o início. As informações a seguir também devem ser fornecidas em todos os casos:

- Identificação do fabricante;
- Identificação do modelo do instrumento;
- Tamanho/geometria da sonda;
- Banda passante do instrumento;

- Data do teste da última calibração/verificação;
- Valores eficazes de tensão e corrente da instalação durante a medição, se possível;
- Localizações da medição; identificação das fontes;
- Desenhos que descrevem a área e as localizações onde as medições foram feitas;
- Data e hora das medições;
- Duração das medições;
- Temperatura ambiente e umidade relativa do ar;
- Incerteza total da medição;
- Uma identificação clara de qual quantidade de campo está sendo reportada, por exemplo o campo magnético máximo, o campo magnético resultante, a componente do campo vertical, a média ponderada no tempo, o valor eficaz., etc. (unidades do sistema devem ser usadas; unidades comuns podem ser expressas entre parênteses).

Outras informações podem ser fornecidas, quando apropriadas, incluindo:

- Frequência de amostragem;
- Descrição das atividades humanas quando dados relativos à exposição humana são apresentados;
- Informação estatística, por exemplo, os valores de campo maiores e menores, médios, média geométrica, etc;
- Resolução da frequência de espectro para campos contendo frequências múltiplas;

## 7.5 Procedimento de medição

### 7.5.1 Generalidades

A medição da densidade do fluxo magnético deve ser feita com instrumentos de três eixos e deve ser do campo magnético resultante, exceto onde existe uma razão particular para o uso de instrumentos de um eixo. Razões para usar instrumentos de um eixo compreendem a necessidade de saber a direção do campo e o campo magnético máximo, investigar a orientação e forma da elipse do campo magnético, e em casos quando a direção de um campo linearmente polarizado já é conhecida.

NOTA – Certos instrumentos de três eixos também podem determinar esses parâmetros de campo (ver cláusula B.1).

Instrumentos de eixo único também podem ser usados para determinar o campo magnético resultante usando as equações (3) ou (4) quando o nível de campo permanecer estável. Nesse caso, o uso de um suporte feito de materiais isolantes para orientar a sonda nas direções ortogonais irá apressar o processo de medição.

O tamanho da sonda ou dos elementos sensores deve ser apropriado para variações espaciais do campo que está sendo medido. É recomendado que os elementos sensores possuam uma área de 0,01 m<sup>2</sup> ou menor (ver 7.1.7).

A banda passante do instrumento deve ser apropriada ao conteúdo da frequência do campo que está sendo medida. Onde o campo é tal que a banda passante do instrumento pode afetar significativamente a leitura (i.e. onde mais de uma frequência está presente no campo), a banda passante deve ser registrada e reportada com os resultados.

Quando o campo magnético é produzido por um sistema de potência, as frequências apresentadas serão, normalmente, as fundamentais (50 Hz ou 60 Hz), mais as primeiras harmônicas. A mínima banda passante usada para medir tais campos deve ser estendida até 500 Hz. Uma banda passante mais estreita pode ser usada somente se puder ser demonstrado que o conteúdo harmônico é suficientemente pequeno para que a diferença no resultado da medição seja desprezível.

Equipamentos portáteis que irradiam campos eletromagnéticos (por exemplo, telefones celulares) devem ser desligados ou não ser usados quando estiverem sendo feitas medições de campo magnético.

Quando medindo campos produzidos por fontes diferentes de sistemas de potência, a banda passante precisará ser escolhida precisamente. Campos produzidos por um sistema de tração possuem uma frequência fundamental mais baixa, enquanto aquecedores de indução, terminais de vídeo, aviões comerciais, chips, e harmônicas produzidas por diferentes motores de velocidade podem produzir campos em frequências mais altas. Quando estendendo a banda passante para frequências mais baixas, deve-se tomar cuidado a fim de evitar erros causados pelo movimento das sondas bobinas em campos estáticos. Tais erros podem geralmente ser evitados segurando a bobina fixamente.

### 7.5.2 Medição da exposição humana

Considera-se que as medições de campos magnéticos praticamente uniformes correspondem a expor todo o corpo humano dos que estão presentes no local e hora da medição. Medições de campo magnético em campos não uniformes têm uma interpretação mais restrita ao determinar a exposição humana, i.e. a medição do campo representa a exposição humana apenas para aquela porção de anatomia humana a qual coincidiria com o local da medição. A escolha do(s) local (ais) da medição pode variar dependendo em parte das fontes do campo e da posição relativa do ser humano.

Como parte do processo para desenvolver o protocolo de medição para determinar a exposição humana a campos magnéticos, os objetivos de medição e métodos para alcançá-los devem ser claramente indicados para determinar os requisitos de instrumentação e calibração, por exemplo a banda passante, escala de magnitude, e pontos de frequência de calibração. O protocolo de medição deve indicar quais parâmetros de campo devem ser medidos, quando as medições serão feitas e como as medições devem ser feitas. Em geral, um único protocolo de medição pode não ser suficiente para atender todas as situações. Discussões adicionais dos objetivos e métodos usados para caracterizar campos magnéticos são fornecidos em B.3.

## **8 Medição de campos elétricos alternados**

### **8.1 Especificações de instrumentos**

Os vários tipos de instrumentos disponíveis para caracterizar campos elétricos quase-estáticos são descritos em C.1. Os instrumentos devem estar acompanhados de informação adequada incluindo suas especificações e manual de instrução claramente redigidos, para habilitar os usuários a determinar a conformidade desta Norma, ajudando-os a operar corretamente o medidor de campo, e para avaliar a utilidade de aplicação do dispositivo para o usuário. Procedimentos de operações complexas devem ser evitados. As especificações que devem ser fornecidas e/ou satisfeitas são dadas abaixo.

NOTA – Instrumentos que não obedecem às especificações abaixo podem ser usados se demonstrado que, sob as condições em que o instrumento for usado, os resultados obtidos não diferiam significativamente daqueles obtidos com um medidor que atenda esta norma. Por exemplo, um medidor com um detector de retificador de média, como ou sem um estágio integrador, pode ser usado se puder mostrar que as harmônicas em um campo são desprezíveis, e se o instrumento for calibrado para a frequência fundamental do campo.

#### **8.1.1 Incerteza dos instrumentos**

O sistema de medição para campos elétricos alternados deve indicar o valor eficaz do campo elétrico uniforme com uma incerteza menor que 10% da leitura mais 2 V/m, para mais ou para menos, após os fatores de correção terem sido aplicados, se for apropriado.

NOTA 1 – A incerteza de um instrumento é determinada por várias componentes, como incerteza da calibração, variação da eletrônica com a temperatura, estabilidade e fontes de ruído externo. A incerteza acima é associada com o projeto e o funcionamento de um medidor de campo elétrico em um campo aproximadamente uniforme. O valor 10% refere-se à incerteza durante a calibração na faixa de frequência especificada e inclui aquelas no valor do campo magnético e as adicionais do processo de calibração (ver 8.2.). O fator de cobertura vale 2. A inclusão de 2 V/m antecipa a incerteza instrumental durante a calibração das escalas mais sensível e quando os campos da ordem de 10 V/m são medidos.

NOTA 2 – Para campos elétricos entre 1 V/m e 5 V/m, a incerteza deve ser menor do que  $\pm 40\%$  (fator de cobertura 2) depois que o fator de cobertura tiver sido aplicado, se for apropriado.

NOTA 3 – Outras fontes de incerteza de medição e diretrizes para o tratamento de incerteza são dadas em 8.3, respectivamente.

#### **8.1.2 Escala de magnitude**

A escala de magnitude na qual o instrumento opera com uma incerteza especificada deve ser claramente indicada.

#### **8.1.3 Banda passante**

O instrumento deve ser fornecido com os dados de calibração ou especificações que habilitam o usuário a estimar a incerteza em determinados níveis de campo quando estiver usando o instrumento em campos que contenham diferentes frequências. A informação também deve incluir a sensibilidade do instrumento para frequências além da faixa utilizável pretendida. A resposta de frequência do instrumento deve ser tal que o requisito da incerteza instrumental (ver 8.1.1) é preenchido na faixa de frequência pretendida.

#### **8.1.4 Variações de temperatura e umidade na operação**

As variações de temperatura e umidade para as quais o instrumento opera juntamente com a incerteza especificada deve ser não menos que 0 °C a 45 °C e 5% a 95%, respectivamente. Mudanças repentinas de temperatura que podem causar condensação no instrumento e/ou no suporte isolante deve ser evitado.

#### **8.1.5 Fontes de potência**

Se baterias forem usadas, é conveniente prever um meio para indicar se a condição da bateria esta adequada para uma operação apropriada do medidor de campo. Instrumentos usados para registrar exposição pessoal devem ser capazes de operar pelo menos oito horas dentro dos limites especificados da incerteza antes de serem trocados ou quando for necessário recarregar as baterias. Se baterias recarregadas forem usadas, é recomendado que a instrumentação não seja operada enquanto estiver conectada à rede de alimentação. Quando tal conexão for necessária, deve ser demonstrado que os campos parasitas do carregador de bateria, os distúrbios conduzidos através da rede, e os acoplamentos eletromagnéticos via os fios de conexão (do carregador de bateria) não afetem a medição (ver 7.1.8).

#### **8.1.6 Legibilidade da escala**

A marcação analógica ou o mostrador digital de um medidor de espaço livre de campo elétrico deve ser bastante grande para ser facilmente lido a distância para evitar perturbações significantes do campo elétrico devido aos efeitos de proximidade do observador. O uso de medidores de espaço livre com mostradores remotos (ver C.2.1) evitam as dificuldades associadas com a leitura. Se mais de uma faixa de sensibilidade for fornecida, o valor máximo da escala da faixa selecionada deve ser indicado e as unidades devem ser de fácil interpretação. Para instrumentação com seleção de escala automática, a faixa de magnitude deve ser indicada em outro lugar, por exemplo, no manual do usuário. A instrumentação deve fornecer uma indicação clara das unidades que estão sendo mostradas.

#### **8.1.7 Dimensões do instrumento**

As dimensões para medidores de campo elétrico devem ser dadas de acordo com o tipo de medidor:

#### **8.1.8 Compatibilidade eletromagnética**

##### *Campo magnético na frequência industrial*

A instrumentação usada nas vizinhanças de equipamentos operando em alta tensão nas frequências industriais não deve ser afetada significativamente pelo campo magnético do ambiente até 1 mT, i.e. a influência do campo magnético na leitura do campo elétrico deve ser menor que 1 V/m... A instrumentação deve ser ensaiada de acordo com os métodos descritos na IEC 61000-4-8.

NOTA – Ensaios de imunidade para campos magnéticos na frequência industrial podem ser feitos usando os sistemas de bobinas.

Ver 7.1.8 para outros requisitos sobre imunidade e emissão.

### 8.1.9 Durabilidade

O medidor e os outros componentes do sistema devem ser fortes o bastante para resistir a vibração e choques resultantes do transporte. Uma maleta para carregar o medidor é recomendada.

#### 8.1.10 Peso

O peso da instrumentação deve ser fornecido. O peso do medidor de espaço livre de campo elétrico deve ser mantido o mais baixo e prático para permitir uma operação manual com um suporte isolante de 2m.

### 8.2 Calibração

Os sistemas de medição de campo devem ser submetidos à calibração periodicamente durante toda sua vida. Os testes de calibração deve seguir os procedimentos descritos na Norma IEC 61786.

### 8.3 Incerteza da medição

A fim de determinar a incerteza total associada com a medição do valor eficaz. do campo elétrico em ambientes de medições diferentes, devem ser levadas em consideração de forma apropriada todas as fontes de incerteza. As possíveis fontes de incerteza estão identificadas em 8.2 . Muitas fontes de incerteza podem se tornar desprezíveis ou, dependendo do tipo de medidor de campo, podem não se aplicar a uma dada situação de medição. As discussões em 7.3 sobre banda passante, medições de campos com harmônicas e medições que se aproximam dos níveis de campo de fundo são aplicáveis nesse caso.

Fatores de correção conhecidos devem ser aplicados nas leituras obtidas com medidores de intensidade de campo elétrico. Se for impraticável aplicar fatores de correção, a influência dos fatores de correção deve ser tratada como uma incerteza de medição adicional.

A avaliação das incertezas deve ser feita de acordo com a ISBN 92-67-01075-1, que exige que o desvio padrão associado com cada quantidade que influencia a medição deve ser determinado com base nas medições feitas ou na experiência. O desvio padrão combinado deve ser obtido pela raiz quadrada da soma das variancias (i.e. a raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios padrões). A incerteza expandida (total) deve ser k vezes o desvio padrão combinado, onde k é o fator de cobertura. O fator de cobertura deve ser igual a 2 o qual, para distribuições Gaussianas, irá corresponder a um intervalo de confiança de aproximadamente 95%.

### 8.4 Registrando e reportando os resultados de medições

A informação que é requerida quando os resultados das medidas são registrados e reportados pode variar dependendo dos objetivos das medições. Uma indicação clara dos objetivos das medições deve ser fornecida desde o início. As informações a seguir também devem ser fornecidas em todos os casos:

- Identificação do fabricante;
- Identificação do modelo do instrumento;
- Tamanho/geometria da sonda;
- Banda passante do instrumento;
- Data do teste da última calibração/verificação;
- Valores eficazes de tensão e corrente da instalação durante a medição, se possível;
- Localizações da medição; identificação das fontes;
- Desenhos que descrevem a área e as localizações onde as medições foram feitas;
- Data e hora das medições;
- Duração das medições;
- Temperatura ambiente e umidade relativa do ar;
- Incerteza total da medição;
- Uma identificação clara de qual quantidade de campo está sendo reportada, por exemplo o campo elétrico máximo, o campo elétrico resultante, a componente do campo vertical, a média ponderada no tempo, o valor eficaz., etc. (unidades do sistema devem ser usadas; unidades comuns podem ser expressas entre parênteses).

Outras informações podem ser fornecidas, quando apropriadas, incluindo:

- Frequência de amostragem;
- Descrição das atividades humanas quando dados relativos à exposição humana são apresentados;
- Informação estatística, por exemplo os valores de campo maiores e menores, médios, média geométrica, etc;
- Resolução da frequência de espectro para campos contendo frequências múltiplas;

### 8.5 Procedimento de medição

#### 8.5.1 Generalidades

A medição de campo não perturbado deve ser feita com uma instrumentação que indique a magnitude e direção do campo elétrico, por exemplo, medidores de eixo único de espaço livre, medidores de três eixos de espaço livre que indicam a orientação do campo, medidores eletro-ópticos, e medidores de referência de terra (ver item C.1). O tamanho da sonda ou dos elementos sensores deve ser apropriado para variações espaciais do campo e a proximidade de áreas planas condutoras que estiverem perto.

A banda passante do instrumento deve ser apropriada ao conteúdo da frequência do campo que está sendo medido. Quando o campo é tal, que a banda passante do instrumento pode afetar significativamente a leitura (i.e. onde mais de uma frequência está presente no campo), a banda passante deve ser registrada e reportada com os resultados.

Quando campos elétricos são produzidos por sistemas de potência, as frequências apresentadas serão, normalmente, as fundamentais (50 Hz ou 60 Hz). Um instrumento com banda passante mais estreita, centrado na frequência industrial será conveniente nos casos de medição do valor eficaz do campo elétrico.

Equipamentos portáteis que emitem campos eletromagnéticos (por exemplo, telefones celulares) devem ser desligados ou não ser usados quando estiverem sendo feitas medições de campo elétrico.

Durante a medição de campo elétrico deve ser evitada a proximidade de pessoas e objetos estranho nos arredores da sonda. podendo ocorrer perturbação significativa no campo sendo capaz de introduzir erros inaceitáveis na medição.

### **8.5.2 Medindo a exposição humana**

Considera-se que as medições de campos elétricos praticamente uniformes correspondem a expor todo o corpo humano dos que estão presentes no local e hora da medição. Medições de campo elétrico em campos não uniformes têm uma interpretação mais restrita ao determinar a exposição humana, i.e. a medição do campo representa a exposição humana apenas para aquela porção de anatomia humana a qual coincidiria com o local da medição. A escolha do(s) local (ais) da medição pode variar dependendo em parte das fontes do campo e da posição relativa do ser humano.

Diferentemente de campos magnéticos, campos elétricos serão perturbados pelo corpo humano. Devido aos valores de referência de exposição serem expressos em termos de campo elétrico não perturbado, e por outras razões (ver item C.3), o esta Norma se preocupa em fornecer a caracterização de um campo elétrico não perturbado.

Como parte do processo para desenvolver o protocolo de medição para determinar a exposição humana em campos elétricos, os objetivos de medição e métodos para alcançá-los devem ser claramente indicados para determinar os requisitos de instrumentação e calibração, por exemplo a banda passante, escala de magnitude, e pontos de frequência de calibração. O protocolo de medição deve indicar quais parâmetros de campo devem ser medidos, quando as medições serão feitas e como as medições devem ser feitas. Em geral, um único protocolo de medição pode não ser suficiente para atender todas as situações. Discussões adicionais dos objetivos e métodos usados para caracterizar campos elétricos são fornecidos em C.3.

## **Anexo A (informativo)**

### **Características gerais de campos elétricos e magnéticos**

Os campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão e distribuição, subestações e geração de energia elétrica, podem ser caracterizados de acordo com sua magnitude, frequência, forma de onda, grau de polarização, variação espacial e variação temporal. Essas características são aqui sumarizadas devido a sua importância nos requisitos da especificação da instrumentação usada para medir os campos.

NOTA – Esta Norma não considera as variações temporais transitórias, isto é, acontecimentos que ocorrem em um curto período de tempo comparados ao período dos campos elétricos e magnéticos em regime permanente.

Vários parâmetros de campo citados acima podem ser introduzidos considerando o caso de campos magnéticos produzidos por linhas de potência trifásica. Alguns dos mesmos parâmetros também são usados para caracterizar campos elétricos. No geral, o campo magnético em certo ponto no espaço pode ser representado por um vetor girante que desenha uma elipse para cada ciclo das correntes nos condutores como mostrado esquematicamente na figura A.1a

[10]. A magnitude eficaz e a direção do semi-eixo maior da elipse do campo magnético, dado por  $M$  na figura A.1a, indica a magnitude e direção do campo magnético máximo. Similarmente, a magnitude eficaz e direção do eixo semi-menor, dado por  $m$  na figura A.1a descreve a magnitude e direção do campo magnético mínimo. Tais campos são chamados de elipticamente polarizados.

Uma vez que campos magnéticos em ambientes distantes de linhas de potência também podem ser gerados por fontes de corrente múltiplas que não estão necessariamente em fase, campos magnéticos elipticamente polarizados podem ocorrer em diversos ambientes (por exemplo, em casa, local de trabalho, etc). Dependendo da área geométrica e corrente nos condutores, o grau de polarização do campo magnético em um dado ponto pode variar de linear ( $m = 0$ ) para circular ( $m = M$ ) como mostrado nas figuras A.1b e A.1c. Essa discussão de campos polifásicos assume que não existem harmônicas no campo. O estado de polarização dos campos com conteúdo harmônico significativo é mais complexo [61], [40].

Próximo do nível do solo a magnitude do campo magnético de uma linha de transmissão trifásica varia lentamente em função da altura do ponto de medição acima do solo. Por exemplo, para uma linha aérea típica de 500 kV, a variação da magnitude do campo magnético a uma altura de aproximadamente 1 m acima do nível do solo, sob a linha, é menor do que 2% para uma variação de 10% em relação a esta altura. A uniformidade aumenta em pontos mais distantes. Para locais distantes da linha, a magnitude do campo magnético de uma linha trifásica de circuito único, com correntes balanceadas ou quase balanceadas, diminui aproximadamente com  $1/r^2$ , onde  $r$  é a distância lateral da linha ( $r$  é suposto ser muito maior do que o espaçamento entre fases) [54]. Se o desequilíbrio da corrente aumenta, a diminuição da magnitude no campo magnético muda de uma dependência de  $1/r^2$  para  $1/r$  [54], [68]. O campo magnético de um circuito duplo de uma linha trifásica balanceada com uma fase de baixa reatância (isto é, em carregamento de correntes idênticas ou quase idênticas para ambos os circuitos) diminui aproximadamente com  $1/r^3$  onde  $r$  é novamente muito maior do que o espaçamento do condutor. A variação do campo magnético de uma linha de transmissão é função da variação do carregamento desta, por exemplo, durante o período de carga pesada, as correntes aumentam e produzem campos magnéticos maiores (a conseqüente flecha dos condutores também pode contribuir para níveis de campos magnéticos maiores).

NOTA – Enquanto o campo magnético próximo do nível de solo debaixo de uma linha de potência polifásica pode ser representado como um vetor girante ou campo elíptico, o campo elétrico torna-se linearmente polarizado no nível do solo.

Outras fontes de campos magnéticos comumente encontrados são os condutores retos (por exemplo, conexões de sistemas/eletrodos à terra) e as espiras aproximadamente circulares (por exemplo encontradas em transformadores, motores, terminais de vídeo) com correntes monofásicas. As linhas e vetores de campo magnético em pontos representativos de tais fontes são mostrados esquematicamente nas figuras A.2a e A.2b. Os campos magnéticos são normalmente polarizados linearmente e a dependência no tempo de um vetor oscilante depende da forma de onda das correntes. Correntes senoidais produzem campos magnéticos senoidais livres de harmônicas, e correntes não senoidais produzem campos magnéticos não senoidais que podem ser ricos em harmônicas [25]. As magnitudes dos campos magnéticos gerados por correntes em um fio infinitamente longo e numa bobina circular diminuem com  $1/r$  [20] e  $1/r^3$  [63], respectivamente, onde  $r$  é a distância à fonte do campo (no último caso assume-se que  $r$  é muito maior do que o raio da bobina circular).

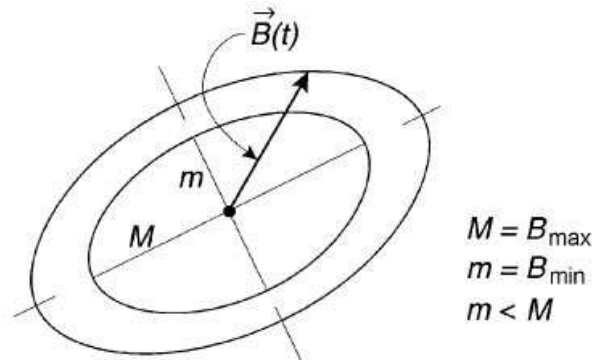


Figura A.1a - Características da polarização elíptica,  $m < M$

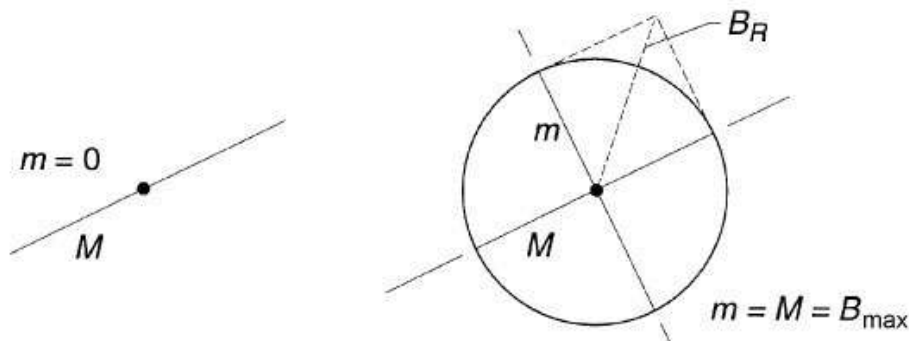


Figura A.1b - Características da polarização linear,  $m = 0$

Figura A.1c - Características da polarização circular,  $m = M$

A resultante  $B_R$  e o campo magnético máximo  $M$  são iguais apenas para os casos de polarização linear. A maior diferença entre o resultado e o campo magnético máximo ocorre da polarização circular, isto é,  $B_R$  excede  $M$  em 41%.

Figura A.1 – Amplitudes de campo magnético oscilante e girante para os casos de polarização elíptica, polarização linear, e polarização circular

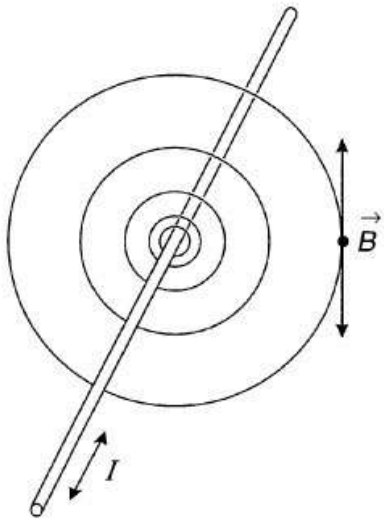


Figura A.2a – Corrente em condutor reto

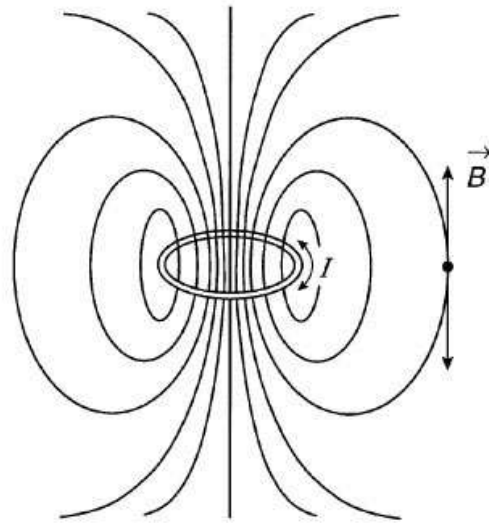


Figura A.2b – Corrente em condutor circular

Figura A.2 – Campo magnético para corrente de condutores retos e circulares

## Anexo B

(informativo)

### Medidores de densidade de fluxo magnético (medidores de campo magnético) – Instruções para medições

#### B.1 Características gerais de medidores de campo magnético

Medidores de campos magnéticos consistem de duas partes, a sonda ou elemento sensor de campo, e o detector, que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz do campo magnético com display digital ou analógico. Sondas de campo magnético, constituindo de uma bobina de fio eletricamente blindada (isto é, uma sonda de “eixo único”), têm sido usadas juntamente com um voltímetro como detector para medições de tipo mapeamento de campos magnéticos a frequência industrial das linhas de potência [27]. Um diagrama deste tipo de instrumentação, que é um exemplo de medidor de mapeamento, é mostrado na figura B.1. Quando não indicados na figura B.1 os componentes do circuito detector são as vezes incorporados na sonda. Medidores de campo magnético medem a componente do vetor de campo magnético oscilante (linearmente polarizado) ou girante (elipticamente ou circularmente polarizado) que é perpendicular à área da sonda(s). A direção normal para a área da sonda coincide com o eixo sensível da sonda.

Para medições em ambientes onde as componentes harmônicas no campo magnético podem não ser desprezíveis (como em locais residenciais e industriais, sistemas de transporte), um estágio de integração (ativo ou passivo) transforma-se em parte do circuito detector com a finalidade de preservar a forma da onda do campo magnético (ver item B.2). Para caracterizar o conteúdo harmônico no campo magnético, o sinal do detector (que reflete a forma da onda do campo magnético) pode ser examinado através do uso de analisadores espectros disponíveis comercialmente para obter as

amplitudes da componente fundamental e harmônicas. Medidores de campo magnético de três eixos também estão disponíveis, os quais podem ser chaveados ou sintonizados para indicar os valores eficazes da frequência industrial ou uma ou mais componentes de campo harmônico.

Durante as medições do mapeamento do campo magnético, a sonda pode ser segurada manualmente sem nenhuma perturbação significativa do campo devido à proximidade do observador. Efeitos de proximidade de dielétricos que estiverem perto também são insignificantes. Efeitos de proximidade de pequenos condutores não ferrosos são geralmente fracos e localizados próximo da superfície do condutor, isto é, campos magnéticos associados com correntes de Foucault induzidas no condutor por um campo magnético variante no tempo irá perturbar o campo local. Grandes estruturas de metais não ferrosos podem perturbar significativamente o campo sobre uma extensa região, como o interior de algumas casas móveis. Campos magnéticos próximos de objetos ferrosos são significativamente perturbados.

Para aplicações de medição de longo período e/ou mais compreensivas, utiliza-se uma instrumentação que registra as leituras do campo em um sistema de armazenamento de dados [25], [61]. Os registros do campo podem ser feitos automaticamente em intervalos com tempo pré-determinado, iniciado pelo usuário, ou por alguma outra fonte, tal como um equipamento detector de posicionamento.

Os valores de campo registrados podem ser transferidos freqüentemente para um computador em outra hora mais tarde para análises subseqüentes. Alternativamente, uma análise simples pode ser feita pelo próprio instrumento.

Os medidores mapeadores e os instrumentos de registro podem ser de eixo único ou de três eixos (embora os instrumentos de registro sejam geralmente de três eixos). Os instrumentos de três eixos podem ter três bobinas sondas ou elementos sensores (como por exemplo, bobinas circulares com eixos ortogonais) que detectam o campo que segue as três direções ortogonais. O sinal de cada elemento sensor dos medidores de três eixos pode ser processado pelo detector em um ou dois modos. Em um modo o detector determina o valor eficaz de cada componente espacial elevando ao quadrado e somando elas, e depois calcula a raiz quadrada da soma. Em outro modo, o detector eleva ao quadrado o sinal de cada sensor, calcula a raiz quadrada da soma dos quadrados, e depois determina o valor eficaz da raiz quadrada. Ambos os métodos dão o mesmo resultado, que é o campo magnético resultante  $B_R$ , como determinado pela equação (4). Em geral, o campo magnético resultante não é igual ao campo magnético máximo, variando de 100% (para campos linearmente polarizados) a 141% (para campos circularmente polarizados) do valor do campo magnético máximo.

Medidores de eixo único podem ser usados para medir o valor máximo do campo magnético orientando a sonda até que uma leitura máxima seja obtida. Medidores de eixo único também são utilizados para determinar o campo magnético resultante através da medição dos valores eficazes das componentes espaciais tri-ortogonal combinando-as de acordo com a equação (4). Assume-se que durante este procedimento não ocorrem mudanças significantes dos valores eficaz das componentes espaciais.

Também são disponíveis medidores de campo magnéticos com sondas de efeito Hall que podem ser usadas para medir as densidades de fluxo magnético de zero hertz a algumas centenas de hertz. Entretanto, devido a sua baixa sensibilidade e problemas de saturação por causa do campo da terra, eles não são adequados para ambientes de campos alternados de baixa intensidade, como nas vizinhanças de linhas de potência e em residências.

## B.2 Teoria de operação (bobinas)

O princípio de operação do medidor de campo magnético mostrado na figura B.1 é baseado na lei de Faraday que prevê que uma voltagem  $V$  é gerada no terminal de um laço de fio aberto colocado em um campo magnético variável. Especificamente, a voltagem é igual ao valor negativo de tempo da taxa de variação do fluxo  $\phi$  em relação ao tempo através do laço, como dado pela fórmula:

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[ \int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dA \right] \quad (7)$$

onde

$B$  é a densidade do fluxo magnético;

$n$  é o vetor unitário perpendicular a área do laço;

$dA$  é um elemento da área  $A$  do laço.

$V$  é expresso em unidades de volts quando  $A$  e  $B$  forem expressos em metros quadrados e tesla, respectivamente.

Se o campo magnético for livre de harmônicas, como  $B = B_0 \sin \omega t$ , e perpendicular a área da sonda, então:

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t \quad (8)$$

onde a frequência angular  $\omega$  é igual a  $2\pi$  vezes a frequência.

Para  $N$  voltas dos fios no laço, a voltagem dada pela equação (8) irá se desenvolver em cada volta e a voltagem total será  $-N\omega B_0 A \cos \omega t$ . A equação (8) mostra que a sensibilidade aumenta com a área da sonda.

Se houver harmônicas no campo magnético, existirá um termo adicional no lado direito da equação (8) para cada harmônica. Devido à operação de diferenciação (ver equação (7)), cada um dos termos adicionais serão ponderados pelo número da harmônica associada. Por exemplo, se houver 10% da terceira harmônica no campo, o termo  $-3(0,1)\omega B_0 A \cos 3\omega t$  seria adicionado no lado direito da equação (8). Por causa da ponderação do termo harmônico, a forma da onda final não irá mais refletir a forma da onda do campo. Conseqüentemente, o valor eficaz indicado pelo voltímetro-detector (ver a figura B.1) não irá representar exatamente o valor eficaz do campo. A forma da onda dá, entretanto, uma boa aproximação da variação da voltagem no tempo ou corrente induzida em materiais condutores.

Para recuperar a forma da onda do campo magnético é necessário que o detector faça uma operação matemática inversa, chamada integral. Isso pode ser alcançado introduzindo um estágio de integração no detector<sup>1</sup>. Por exemplo, o estágio integração pode ser combinado com a sonda na forma de componentes passivos, ou um amplificador operacional integrador pode ser incorporado ao detector. A resposta em frequência da combinação do detector integrador e sonda deve ser plana na faixa de frequência de interesse. Filtros e blindagem de campo elétrico devem fazer parte do circuito detector projetado para excluir sinais indesejáveis.

Além da consideração de como o detector responde a campos com diferentes frequências, também é necessário considerar a resposta em frequência da sonda. Devido a inerente indutância, resistência e capacitância da sonda, a relação entre a voltagem induzida na bobina [ver equação (8)] e a voltagem que entra no detector  $v_p$  deve ser considerada em função da frequência. Uma visão esquemática simplificada do circuito equivalente para a bobina sonda é mostrada na figura B.2. A relação  $|W|$  da voltagem da sonda  $v_p$  para voltagem induzida  $V$  é dada por [2]:

$$|W| = \left| \frac{v_p}{V} \right| = \left[ \left[ \frac{R+r}{R} - \omega^2 LC \right]^2 + \left[ \omega \left( \frac{L}{R} + Cr \right) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

onde

$L$  e  $r$  correspondem a indutância e resistência da bobina e seus terminais;

$C$  é a capacitância parasita;

$R$  é a impedância de entrada aproximada do detector.

O valor de  $|W|$  deve se manter perto da unidade e não no pico antes de desaparecer com o crescimento frequência. Valores altos de  $R$  podem causar um pico próximo da frequência de ressonância da sonda, seguido de uma rápida queda em  $|W|$ . Valores baixos de  $R$  permitem que o valor de  $|W|$  caia suavemente quando a frequência cresce. Um valor muito baixo, entretanto, causa uma queda mais rápida e uma redução desnecessária na resposta em frequência [18].

A teoria de operação de medidores de campo magnético com sondas contendo núcleos ferromagnéticos é mais complicada do que o caso de núcleo de ar devido à permeabilidade do material do núcleo que pode variar com a frequência e magnitude do campo. Discussões examinando operações de medidores de campo magnético com sondas contendo núcleos ferromagnéticos são abordadas em [25] e [55].

### B.3 Metas e métodos de medição

Como observado no anexo A, campos elétricos e magnéticos podem ser caracterizados por certo número de parâmetros, isto é, magnitude, frequência, polarização, etc.. A caracterização de um ou mais desses parâmetros e como eles podem estar relacionados à exposição humana pode servir como possíveis metas de um programa de medição. Como um guia para os leitores interessados em desenvolver um procedimento de medição de campo, este item fornece uma lista de possíveis metas e métodos de medição para atender os objetivos.

É extremamente importante que as metas do programa de medição como as considerações abaixo, sejam claramente definidas no início. Uma clara definição das metas é exigida para determinação dos requisitos da instrumentação e calibração, isto é, banda passante instrumentação, limite de magnitude, pontos de calibração da frequência, etc. Uma vez que as metas sejam identificadas e que a instrumentação apropriada seja adquirida, um estudo piloto no ambiente de medição de interesse pode ser desejável antes das decisões serem tomadas com relação aos protocolos finais de medição e método associado. No protocolo será descrito o procedimento a ser seguido passo a passo, usando os possíveis métodos indicados para cumprir as metas de medição. O protocolo deve indicar especificamente coisas tais como os requisitos do instrumento (como banda passante, dimensão da sonda, variação de magnitude), locais de medição e duração das medições. Deve ser possível depois, usando o mesmo protocolo, comparar, com confiança, os resultados de medição obtidos com ambientes elétricos similares.

Esta norma não é tão explícita nas suas recomendações considerando métodos de medição e protocolos devido a sua dependência nas metas e por causa das diferenças significantes que serão encontradas em diversos ambientes de medição. Quando se desenvolver um método e protocolo de medição, as seguintes fontes e itens dos campos magnéticos devem ser considerados quando aplicados:

- As fontes elétricas existentes no ambiente de medição;
- Tipos e locais dos transformadores;
- Locais de cabos principais e disjuntores;
- Magnitude da voltagem de suprimento e períodos máximos de uso;
- Frequências (incluindo 0 Hz), da alimentação da potência e dispositivos elétricos;
- Localização de pessoas relacionadas às fontes de campo conhecidas;
- Localização da medição relacionada ao corpo humano, como cabeça, tronco, região pélvica;
- Presença de qualquer motor ou gerador;
- Presença de pequenos aquecedores;

<sup>1</sup> Se o sinal é um digital, a integração pode ser feita por computação.

- Sistemas de aterramento e conexões.

Decisões devem ser feitas considerando a incerteza total permitida durante medições (os requisitos de incerteza instrumental são dados em 8.1). Esboços são freqüentemente necessários para descrever adequadamente as áreas onde as medições serão feitas. Diagramas elétricos de construções podem ajudar a identificar fontes de campos em escritórios ou prédios similares, embora uma confiança excessiva em tal documentação deva ser evitada devido a mudanças não registradas no sistema elétrico do prédio. Enquanto muitas fontes de campos magnéticos são visíveis (como postes de iluminação, e ferramentas elétricas), outras não são (como equipamento elétrico em quartos adjacentes ou em andares acima e abaixo). Durante um estudo piloto, decisões podem ser tomadas considerando o espaçamento entre as medições, alturas de medições, tamanho da amostra, formatos de placas de informação, questionários para classificação do trabalho/tarefa etc. Se determinar a exposição humana é a meta das medições, exames dos procedimentos de medição, são descritos nos estudos epidemiológicos citados acima, são fortemente recomendados como parte do processo para desenvolver um protocolo final de medição.

A meta primordial dessa Norma é fornecer instruções para determinar ou estimar a exposição humana para um ou mais parâmetros de campo magnético.

Uma lista de possíveis metas de medição e possíveis métodos é dada abaixo. Esta lista não deve ser considerada exaustiva uma vez que pode existir uma ampla variedade de metas e métodos. Para cada meta a banda passante de freqüência da instrumentação é escolhida para a freqüência ou as freqüências de interesse (ver meta (g)). Mesmo fora do escopo dos parâmetros do campo considerados nesta Norma, a caracterização de campos magnéticos estáticos pode também ser de interesse.

Meta (a): caracterização de níveis de campo magnético

Os níveis de referência de campo magnético em função da freqüência citados no item 6 desta Norma ou em outros documentos [5], [29] necessitam da determinação dos níveis máximos de campo em áreas específicas. Os locais de medição podem coincidir com pontos no espaço ocupado pela cabeça de uma pessoa, tronco ou área pélvica.

Método: medidores de eixo único e três eixos podem ser usados para fazer medições pontuais para os campos magnéticos máximos e resultantes, respectivamente. Existem instruções para tais medidas próximas de linhas de potência [27] estão correlacionadas com a corrente de carga. Devem-se fazer estimativas de campos magnéticos para diferentes correntes de carga.

Em ambientes distantes das linhas de potência e de aparelhos elétricos, onde não é fácil correlacionar as fontes de correntes de campos magnéticos, medições pontuais representam uma caracterização grosseira de níveis de campo [25]; [26]. Se medições mais definitivas do campo magnético forem exigidas, medidores de campo magnético com capacidade de gravação podem ser usados em locais de interesse para horas consideradas representativas quando produzem a variação completa dos valores de campo. Por exemplo, em residências isso pode envolver diversos registros 24 h repetidamente durante cada estação do ano (ver meta (c)).

Meta (b): caracterização das variações espaciais

A distribuição espacial de campos magnéticos em ambientes longe das linhas de potência ou de fontes elementares é normalmente desconhecida devido à dificuldade de determinação e caracterização de suas fontes. Por exemplo, a figura B.3 mostra a dispersão das medições efetuadas no centro de uma sala (campo magnético vertical, altura do peito) versus as medições em outros locais, em salas e cozinhas durante o mapeamento de 77 residências [62]. Uma vez que os níveis de campo em diferentes locais não foram determinados no mesmo instante, as informações são indicativas das possíveis variações no mesmo quarto das residências. Campos magnéticos alternados na maioria dos ambientes não serão uniformes devido à dependência espacial dos campos das correntes das fontes (ver anexo A). É importante observar que campos magnéticos estáticos também apresentam variabilidade considerável em residências [64].

Método: As medições da variação espacial demandam o registro das componentes do campo magnético em função da coordenada da posição. As Normas existem para realizar tais medições próximas de linhas de potência [27]. Uma vez que tais medições podem ser feitas com os medidores mapeadores.

O software fornecido com tal instrumentação permite a geração de traçados do perfil do campo magnético, e análises estatísticas dos níveis do campo, etc. Pela meta (a), tal informação não irá captar as variações temporais do perfil do campo sem repetidas medições.

Meta (c): caracterização da variação temporal

Desde que os campos magnéticos são produzidos por correntes de carga e correntes que retornam pela terra que podem variar consideravelmente com o tempo, as variações temporais dos campos magnéticos podem facilmente exceder 100%. Por exemplo, A figura B.4 mostra registros de 24 h do campo magnético resultante de fundo no centro de uma sala numa área urbana, durante dois dias, onde as correntes de carga variaram significativamente devido às condições atmosféricas [26]. Os dados foram registrados por um medidor mapeador a cada 15 s a e uma altura de 1 m acima do solo, e a banda passante foi escolhida adequadamente para caracterizar a freqüência fundamental e as harmônicas da rede de potência. A figura B.4a mostra as medições realizadas durante um dia quente e úmido onde os condicionadores de ar presumidamente estavam sendo usados a pleno regime. As medições de campo no mesmo local em um dia frio menos úmido, mostradas na figura B.4b, revelam uma distribuição diferentemente significativa nos valores de campo com a média de campo sendo a metade do que foi observado no dia quente úmido. A informação é particular de um determinado evento porém indica o que pode existir quando ocorrem mudanças significantes nas correntes de carga. Um mecanismo que pode produzir variações temporais de curto prazo no campo magnético é a movimentação de objetos ferromagnéticos, como carros e caminhões passando pelos locais da medição.

Método: Medidores de campo magnético de eixo único e de três eixos são disponíveis com conexões de saídas que podem ser usadas juntamente com os registradores de dados, disponíveis comercialmente, para registrar as variações dos níveis do campo magnético em um ou mais locais, em função de tempo. Medidores de exposição de três eixos e instrumentação de captação da forma da onda de campos magnéticos (ver item B.1) também podem ser usados para

registrar periodicamente níveis de campo. Devido à dependência dos níveis de campo magnético em relação as correntes de carga, que podem variar diariamente, semanalmente, sazonalmente etc., O desafio é determinar o intervalo de tempo para o registro das medições que captarão variações suficientes do campo para obter uma descrição estatística válida. A condução um estudo piloto inicial no ambiente de medição de interesse pode ser útil para definir a questão do tempo de amostragem da medição.

Considerações adicionais deverão ser levadas em conta, quando as medições são feitas em sistemas elétricos de transporte de massa e outras áreas onde há motores de velocidade variável. Por exemplo, em túneis de metrô, o campo magnético pode estar relacionado com a velocidade da composição [13].

Meta (d): caracterização do campo magnético médio ponderado no tempo

Um número de estudos epidemiológicos sobre câncer relativo ao trabalho ocupacional e câncer infantil, que examinam a possibilidade de efeitos de exposição relacionados à saúde na frequência industrial de campos magnéticos, tem considerado o campo magnético médio ponderado no tempo como a “dosagem” ou “valor” de exposição de referência [15], [38], [59], [67]. Esses e outros estudos têm sido feitos para a determinação do campo magnético médio ponderado no tempo ser uma relevante meta da medição.

Método: Pequenos medidores de exposição de três eixos que são presos ao corpo e medem a integral com relação ao campo magnético podem ser usados para medir diretamente o campo magnético médio ponderado no tempo [32]. Outros medidores de exposição de três eixos que registram periodicamente o campo magnético (ver item B.1) podem ser usados para determinar o campo magnético médio ponderado no tempo através da análise dos valores registrados do campo. Combinações de instrumentos menos portáteis com capacidade de registro também podem ser usados para medir o médio ponderado no tempo nos locais de interesse. Estimativas anuais do campo magnético médio ponderado no tempo têm sido calculadas para residências através dos registros das correntes de carga de linhas de transmissão e dos locais onde as residências acompanham o corredor da linha de transmissão [15].

Meta (e): caracterização da intermitência dos campos magnéticos

Existem relatórios na literatura técnica que indicam que a exposição intermitente na frequência industrial de campos magnéticos pode ser mais efetiva em explicar certas respostas biológicas do que exposição a campos estáveis [7]. Tais relatórios sugerem que algum índice dos níveis “altos” e “baixos” do campo magnético pode ser uma característica do campo a ser quantificada.

Método: Medidores de campo que podem periodicamente medir e registrar o campo magnético deve ser usado para alcançar essa meta. O que não é claro é com que frequência os valores de campo devem ser registrados com que intervalo de tempo eles devem ser medidos. Por exemplo, medições registradas a cada 15 s (ver figura B.4) irão , geralmente, mostrar mais flutuações do que se medidas em cada hora forem usadas para caracterizar as flutuações [41].

Meta (f): Caracterizando a incidência e duração dos níveis de campo excedendo o valor percentual de referência

Modelos que presumem efeitos biológicos freqüentemente assumem que existe algum valor percentual de um agente abaixo do qual, se aplicado, não causa efeito. Esse modelo tem sua analogia para possíveis efeitos de exposição de campos magnéticos.

Método: Medidores de campo que registram periodicamente o campo magnético podem ser usados para alcançar essa meta. Como na meta (e), a disponibilidade de dados registrados permite a determinação de quantas vezes os valores de campo medidos excederam um ou mais valores da porcentagem de referência. Também, como na meta (e), os resultados podem depender da frequência de registro dos níveis do campo magnético.

Meta (g): caracterização do conteúdo de frequência no campo magnético

Visto que campos magnéticos de equipamentos elétricos muitas vezes contem harmônicas de frequência industrial ou frequências não relacionadas à frequência industrial, e os níveis de referência de campo magnético foram estabelecidos em função da frequência [5], [29], a caracterização do conteúdo de frequência pode ser uma meta importante. Um exemplo de campo magnético que é rico em harmônicas é aquele gerado por um equipamento elétrico comum como mostrado na figura B.5. A figura B.5a mostra a medição pontual da frequência extremamente baixa da forma da onda do campo magnético a 0,60m do centro frontal de uma tela de televisão a cores de 26 polegadas em funcionamento [18]. As componentes harmônicas do campo são indicadas na figura B.5b, a qual mostra um display de um analisador de espectro da forma da onda da figura B.5a.

As componentes harmônicas, da segunda (120 Hz) até a décima nona, podem ser vistas. É importante observar que a medição do valor eficaz desse campo com o medidor de campo que apenas detecta a componente fundamental será muito baixo, menor que 20%.

Método: Medidores de campo magnético de eixo único e três eixos, disponíveis comercialmente, são às vezes fornecidos com conectores de saída que dão o sinal integrado da sonda.

Tal instrumentação, juntamente com os analisadores de espectro disponíveis comercialmente, pode ser usada para caracterizar as componentes de frequência do campo magnético. Como alternativa, existem instrumentações de captação de onda que possuem softwares que permitem a determinação do conteúdo da frequência a partir dos dados registrados. Medidores de campo magnético que podem ser sintonizados para indicar valores eficazes da frequência industrial do campo e uma ou mais frequências harmônicas também são disponíveis.

Deve ser observado que o conteúdo da frequência de campos magnéticos gerados por equipamentos elétricos como motores de velocidade variável, sistemas elétricos de transporte de massa, podem mudar em função da velocidade [13].

Meta (h): caracterização da polarização do campo magnético

Uma caracterização completa do campo magnético requer uma determinação da sua polarização (ver anexo A) para uma dada frequência. A polarização do campo magnético pode ser de interesse dentro do contexto da exposição humana. Por exemplo, campos magnéticos com polarizações diferentes, porém com o mesmo valor resultante podem induzir campos

elétricos e correntes em sistemas biológicos que são significativamente diferentes em termos de suas propriedades temporais e geométricas [45].

Método: Medidores de campo de eixo único, medidores de campo de três eixos (que fornecem leituras de um eixo individual), e sistemas de captação de onda de três eixos podem ser usados para medir os valores eficazes dos semi-eixos maior e menor da elipse do campo magnético para determinar sua polarização em um ponto no espaço. Como observado no anexo A, esse procedimento assume que apenas uma única componente da frequência do campo magnético está sendo medida. Na presença de outras frequências, o vetor girante do campo magnético não traça mais uma simples elipse [61], [40]. Variações da polarização em função do tempo e da localização deveriam ser antecipadas.

Meta (i): Caracterização da exposição humana em campos magnéticos

Essa importante meta foi colocada no final da lista de metas com a finalidade de primeiro descrever os parâmetros do campo magnético que podem ser interessantes do ponto de vista da exposição humana.

Método: Uma distinção clara deve ser feita entre a caracterização de um ou mais parâmetros do campo magnético e a exposição a tais parâmetros. A exposição é melhor determinada usando um medidor de campo em miniatura que periodicamente registra o(s) parâmetro(s) do campo que interessam em um local de interesse no corpo. Estimativas de exposição humana para um dado parâmetro de campo, em uma área específica, podem ser feitas por uma combinação de medições de variações espaciais e temporais do parâmetro e informação que descreve padrões de atividade humana na área de interesse (ver [12] para discussão do caso de campos elétricos). Esta abordagem falha em não considerar as exposições fora das áreas de caracterização do campo.

Medidores de exposição de três eixos comercialmente disponíveis que podem ser presos ao corpo podem ser usados para medir exposições efetivas dos parâmetros do campo identificados nas metas (a) até (f) para diversas bandas passantes. Tal instrumentação periodicamente registra o valor do campo magnético resultante por períodos de tempo extensos em vários dias, dependendo da frequência de amostragem do campo magnético, de capacidade de armazenamento de memória, e da vida útil da bateria. A taxa de amostragem dependerá, em parte, do modelo assumido para a interação do campo e a pessoa (por exemplo, ver metas (e) e (f)). Os dados coletados podem ser transferidos para um computador, e um software fornecido junto com a instrumentação, ou especialmente desenvolvido, é usado para determinar a exposição para os parâmetros descritos nas metas de (a) a (f).

Exposições humanas passadas em áreas específicas podem ser estimadas tendo um hospedeiro portando medidores de exposição, fazendo atividades que eram conduzidas no passado em áreas específicas [59], [60], [67]. Esta abordagem assume que as fontes de campo magnético não mudam significativamente através do tempo.

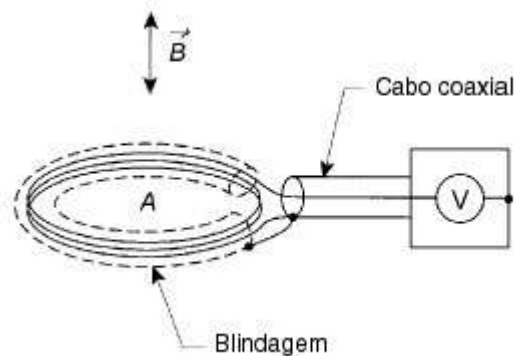
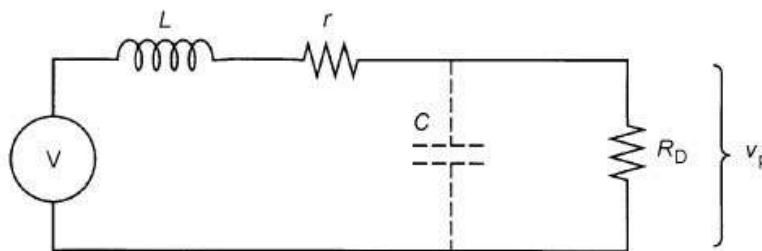


Figura B.1 – Vista esquemática do medidor simples de campo magnético com sonda do tipo bobina



Legenda

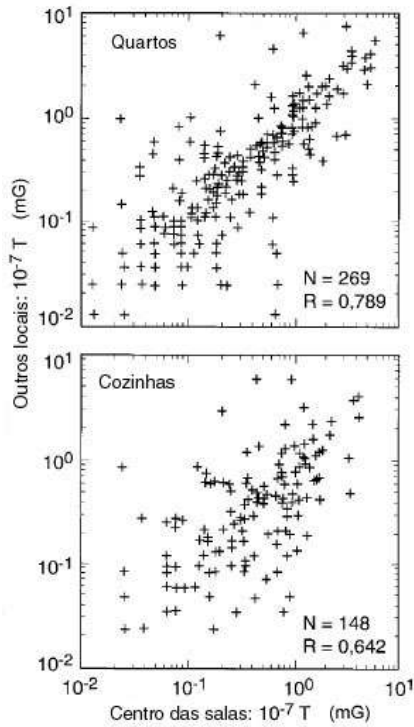
$L$  indutância da bobina

$R$  resistência do fio

$C$  capacitância parasita

$R_D$  impedância de entrada do detector

Figura B.2 – Circuito equivalente aproximado de uma bobina sonda quando conectada ao detector



Cada ponto dado representa as medições em dois locais no mesmo quarto. Uma medição é feita no centro do quarto (abscissa) e a outra medição é feita em outro lugar (ordenada) com a localização não especificada. Os coeficientes de correlação são 0,789 e 0,642 para os quartos e cozinhas, respectivamente. Todos os pontos de informação estão na mesma linha diagonal para um coeficiente de correlação igual a 1.

Figura B.3 – Pontos de dispersão mostrando o campo magnético no centro de um quarto verso outros pontos no mesmo local em salas e cozinhas durante o mapeamento de 77 casas, depois [62]

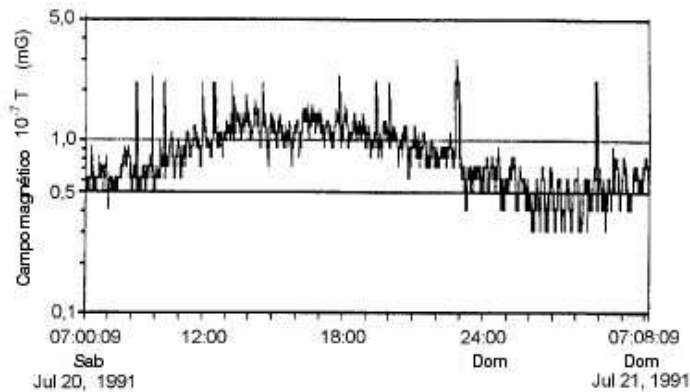


Figura B.4a – Medições durante tempo quente e úmido

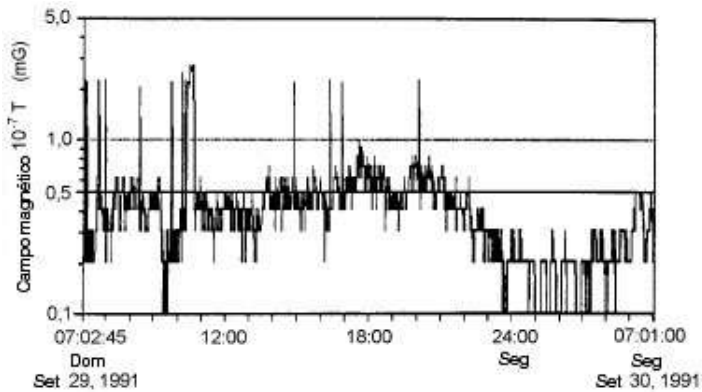
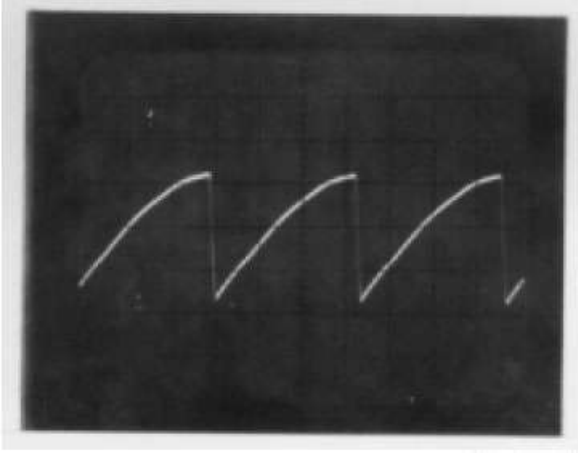
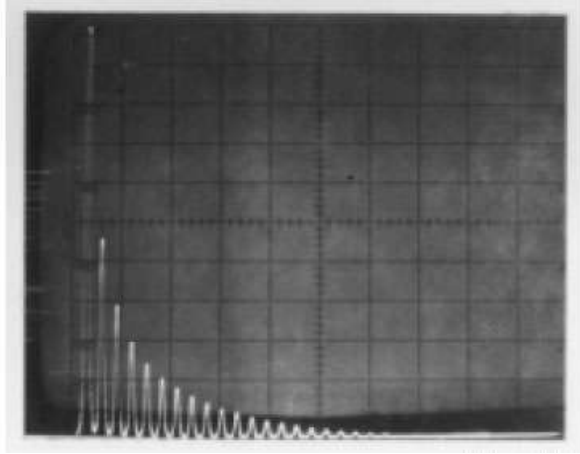


Figura B.4b – Medições durante tempo frio e seco

Figura B.4 – Medições 24 h do campo magnético no centro de um quarto



**Figura B.5a – Display do osciloscópio da forma da onda do campo magnético; valor eficaz =  $0,17 \mu\text{T}$  (escala vertical =  $0,2 \mu\text{T} / \text{div}$ ; escala horizontal =  $5 \text{ms}/\text{div}$ )**



**Figura B.5b = Display do analisador de espectro normalizado para a forma da onda mostrada na figura ( $200 \text{ Hz}/\text{div}$ )**

Figura B.5 – Display do osciloscópio da forma da onda do campo magnético a uma distância de  $0,60 \text{ m}$  do centro frontal de uma tela de televisão em cores de 26 polegadas em funcionamento, e display do analisador espectral associado

## Medidor de intensidade de campo elétrico (medidores de campo elétrico) – Instruções para medições

### C.1 Características gerais de medidores de campo elétrico

Os medidores de intensidade de campo elétrico consistem em duas partes, a sonda ou elemento sensor de campo, e o detector, que processa o sinal da sonda e indica o valor eficaz da intensidade do campo elétrico em unidades de volts por metro usando um display digital ou analógico. Os seguintes três tipos de medidores de campo elétrico são considerados nesta Norma:

- O medidor de espaço livre;
- O medidor de referência de terra;
- O medidor eletro-óptico.

Quando são feitas medições de intensidade de campo elétrico, o observador deve ficar distante da sonda para evitar uma perturbação significativa do campo onde está localizada a sonda, figura C.1. Medidores de espaço livre e eletro-óptico devem ser suficientemente pequenos para que a dimensão da sonda não perturbe significativamente as distribuições da carga nos limites da superfície que geram o campo elétrico, isto é, superfícies energizadas e aterradas. Embora os medidores de campo sejam calibrados em campos elétricos praticamente uniformes, o campo que é medido não precisa ser muito uniforme. Medidores de campo elétrico medem a projeção do vetor do campo elétrico oscilante (linearmente polarizado) ou girante (elipticamente ou circularmente polarizado) nos eixos elétricos de sonda (o eixo da maior sensibilidade do campo elétrico). Medidores de campo elétrico de espaço livre, de três eixos, são disponíveis para medir o campo elétrico resultante.

### C.2 Teoria de operação

#### C.2.1 Medidores de espaço livre

Medidores de espaço livre determinam a intensidade do campo elétrico medindo a corrente induzida permanente ou a carga oscilante entre as duas partes condutoras (eletrodos) de uma sonda isolada eletricamente, depois da sonda ser introduzida no campo elétrico. Nos medidores de espaço livres comercialmente disponíveis, o detector é geralmente contido dentro ou é parte integrante da sonda. A sonda e o detector são mantidos no campo elétrico pela extremidade isolante [11], [27]. O medidor de espaço livre é adequado para medições de mapeamento porque é portátil, permitindo medições acima do plano da terra, e não requer uma referência de potencial de terra. Medidores de espaço livre de eixo único e três eixos são comercialmente disponíveis. Medidores de espaço livre são normalmente alimentados por bateria.

Também existem medidores de espaço livre projetados para ter um display remoto da intensidade do campo elétrico. Nesse caso, uma porção do circuito processador de sinal está contida na sonda e o resto do detector está em uma parte separada com um display analógico ou digital. Uma conexão por fibra-óptica conecta a sonda à unidade de display [19], [34].

A figura C.2 mostra exemplos de geometrias do medidor de espaço livre de eixo único. A teoria de operação dos medidores de espaço livre pode ser entendida considerando um corpo condutor descarregado com partes ou eletrodos separados, introduzidos em um campo elétrico uniforme  $E$ . A carga induzida em um dos eletrodos é.

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dA \quad (10)$$

onde

$D$  é o deslocamento elétrico;

$n$  é um vetor unitário perpendicular a superfície do eletrodo;

$dA$  é um elemento de área na metade do corpo com superfície total  $S$ .

O caso de uma geometria esférica como mostrado na figura C.2a fornece o seguinte resultado:

$$Q = 3\pi a^2 \epsilon_0 E \quad (11)$$

onde

$\epsilon_0$  é a permissividade de espaço livre;

$a$  é o raio da esfera [58].

NOTA – A densidade da carga da superfície é dada por  $3\epsilon_0 E \cos \theta$ . A integração nos hemisférios fornece a equação (11) (ver [58]).

Para geometrias menos simétricas, o resultado pode ser expresso por.

$$Q = k \epsilon_0 E \quad (12)$$

Onde  $k$  é uma constante dependente da geometria da sonda.

Eletrodos sensores que usam cubos e placas paralelas (ver figura C.2b), têm sido empregados. Se a intensidade do campo elétrico tem uma dependência no tempo senoidal, por exemplo,  $E_0 \sin \omega t$ , onde  $\omega$  é a frequência angular, a carga induzida oscila entre as duas partes, e a corrente é dada por.

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega\epsilon_0 E_0 \cos\omega t \quad (13)$$

A constante  $k$  pode ser considerada uma constante de medidor de campo e é determinada pela calibração. A influência do suporte manual, representando uma impedância de fuga, e a perturbação introduzida pelo observador é tida como desprezíveis na discussão acima.

Se houver harmônicas no campo elétrico, existirá um termo adicional no lado direito da equação (13) para cada harmônica. Por causa da operação de diferenciação na equação (13), cada um dos termos adicionais será ponderado pelo número da harmônica associada. Como no caso do medidor de campo magnético (ver item B.2) é necessário que o detector faça uma operação matemática inversa, chamada integral. Por exemplo, um amplificador integrador ou um circuito passivo integrador, ambos combinados com um voltímetro podem ser usados como um detector. A resposta em frequência da combinação da sonda e do circuito integrador deve ser plana na faixa de frequência de interesse. Filtros devem ser usados para excluir os sinais que estiverem fora da faixa de frequência de interesse.

### C.2.2 Medidores de referência de terra

Medidores de referência de terra determinam a intensidade do campo elétrico medindo a corrente ou carga da superfície sensora de uma sonda plana. Tais medidores são normalmente usados para medir o campo elétrico no nível do solo ou em superfícies condutoras planas que estão no potencial de terra. Duas sondas projetadas têm sido empregadas. Um projeto usa de um único condutor plano com uma seção central isolada que serve como uma superfície sensora. Pequenas versões desse tipo de sonda têm sido feitas com uma placa de circuito coberta por uma dupla face como mostrado na figura C.3a. Um segundo projeto consiste de duas placas paralelas separadas por uma lâmina fina de isolamento, com a placa superior agindo como a superfície sensora como mostrado na figura C.3b. Na lei de Gauss, a carga  $Q$ , induzida em uma superfície sensora com área  $A$ , é dada por.

$$Q = \epsilon_0 EA \quad (14)$$

onde

$E$  é a média da intensidade do campo elétrico na área sensora;

$\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre.

Assumindo que  $E$  varia senoidalmente com a frequência angular  $\omega$  (i.e.  $E = E_0 \sin\omega t$ ), a corrente induzida resultante é dada por:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \epsilon_0 E_0 A \cos\omega t \quad (15)$$

Se existem harmônicas no campo elétrico, existirá novamente um termo adicional do lado direito da equação (15) para cada harmônica. Como em C.3.1, devido a operação de diferenciação, cada um dos termos adicionais será ponderado pelo número da harmônica associada. Para recuperar a forma da onda do campo elétrico é necessário fazer uma operação matemática inversa, chamada integral. Uma combinação do circuito integrador/voltímetro que produz uma resposta em frequência plana na faixa de frequência de interesse pode ser usada como um detector. Filtros também devem fazer parte do circuito detector para excluir sinais que estiverem fora da faixa de frequência de interesse. Medidores de referência de terra podem funcionar com bateria ou na rede elétrica.

Medidores de campo elétrico com sondas planas podem ser usados para medir a intensidade do campo elétrico em superfícies planas energizadas eletricamente se o detector é operado no mesmo potencial que a superfície energizada. Em tais casos, o display analógico ou digital do detector deve ser observado remotamente, por exemplo, visualmente, a uma distância, ou usando uma conexão de fibra-óptica.

### C.2.3 Medidores eletro-ópticos

O medidor de campo eletro-óptico considerado nesta norma emprega uma sonda que exhibe o efeito de Pockels quando introduzido no campo elétrico. Este tipo de medidor de campo é similar ao medidor de espaço livre que é apropriado para medições de mapeamento, permite medições na maioria dos pontos acima do plano da terra, e não requer uma referência do potencial de terra. A sonda, que é separada do detector, pode ser apoiada no campo isolante. A sonda e o detector são conectados com fibras ópticas através da qual a luz do detector é enviada da e para a sonda. Em geral, as sondas são pequenas em dimensão (~0,02 m) comparadas com as sondas dos medidores de espaço livre e isso permite que medições feitas sejam próximas de superfícies condutoras devido a pequenas interações com as distribuições de carga na superfície. Entretanto, mesmo pequenas nas dimensões, as sondas de efeito Pockels têm menos sensibilidade a campos elétricos (~5 kV/m e maiores) quando comparadas aos medidores de espaço livre (~1 V/m e maiores) e são mais caras para fabricar.

A figura C.4 mostra um esboço da sonda de efeito Pockels e seus componentes constituintes. A luz originária do detector é enviada da e para a sonda via fibras ópticas. O campo elétrico  $E$  induz uma refração dupla em um cristal (Pockels) dielétrico adequadamente orientado que causa a modulação da intensidade de uma luz polarizada linearmente de acordo com [21]:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{[1 + \sin(E' / F)]}{2} \quad (16)$$

onde

$I_t$  é a luz transmitida;

$I_i$  é a luz incidente;

$E'$  é o campo elétrico no cristal;

$F$  é igual a  $\lambda / 2\pi n^3 c_e I$ ;

$\lambda$  é o comprimento de onda da luz;

$n$  é o índice de refração;

$l$  é a espessura do cristal;

$c_e$  é o coeficiente eletro-óptico do cristal.

Para a equação (16) ser válida, assume-se que o cristal não tem uma atividade óptica intrínseca.

A equação (16) mostra que a amplitude da modulação da luz é uma função do campo elétrico no cristal que, por sua vez, é dependente de um campo externo  $E$ . Devido a transmissão de a luz rastrear a forma de onda do campo elétrico, um estágio de integração é desnecessário no detector para processar apropriadamente sinais devido às harmônicas que podem estar presentes no campo elétrico. O cristal Pockels é às vezes revestido com eletrodos transparentes para permitir medições de voltagem usando o efeito Pockels. Medidores eletro-ópticos podem funcionar ligados à rede ou à bateria.

### C.3 Metas e métodos de medição

Como uma ajuda para os leitores interessados em desenvolver um protocolo de medição de campo, essa item fornece uma lista de possíveis metas e métodos de medição para serem alcançados. O leitor deve também se referir ao item B.3 nos detalhes para desenvolver um plano de medição de campo magnético que são aplicáveis a medições de campo elétrico. Por exemplo, os requisitos em que metas de medição devem ser definidos anteriormente e a possibilidade de conduzir um estudo piloto deve ser adotada pelos mesmos motivos previamente declarados.

As medições diretas da exposição humana a campos elétricos são mais complicadas do que determinar a exposição a campos magnéticos, pois medidores de exposição de eixo único em miniatura que medem e registram o campo elétrico na superfície do corpo [6], não são disponíveis com facilidade. Também, devido às perturbações no campo elétrico pelo corpo, os valores de campo registrados são muito sensíveis à localização do medidor de campo no corpo, e para a orientação do corpo. Tal instrumentação tem sido usada para determinar “fatores de aprimoramento” do campo elétrico em localizações específicas na superfície do corpo, isto é, a proporção do campo elétrico perturbado na superfície do corpo em relação ao campo elétrico não perturbado, para diferentes localizações e orientações do corpo em um campo elétrico vertical [6].

NOTA – Um sistema de medição de exposição que emprega uma capa condutora elétrica como a sonda que sente um campo médio na região do corpo acima da cintura também é descrita no livro [12].

Fatores de aprimoramento para seres humanos e animais em campos elétricos verticais também têm sido reportados por outros pesquisadores [11], [66]. Os fatores de aprimoramento têm sido usados para o escalonamento de campos elétricos em animais de diferentes espécies quando exposições são planejadas para estudos biológicos *in vivo*. Caracterização do campo elétrico não perturbado, seguidas de escalas de campos apropriadas para estudos biológicos *in vivo* (e *in vitro*) tem sido um padrão para investigação dos possíveis efeitos de exposição a campos na frequência industrial. Medições de um campo elétrico não perturbado também são requeridas por documentos que definem valores de referência de exposição para campos elétricos [5], [29]. Assim, a caracterização do campo elétrico não perturbado tem sido o foco primário dessa Norma.

Deve ser observado que campos elétricos de interesse no passado foram principalmente campos elétricos verticais produzidos por linhas de potência e equipamentos de alta-voltagem associados. Os campos elétricos de tais fontes podem atingir a 10 kV/m [1] e são muito maiores do que campos elétricos tipicamente encontrados em residências. Em residências, os campos elétricos podem variar no valor de algumas centenas de volts por metro (como próximo a um cobertor elétrico) para menos do que poucos volts por metro distante de equipamento elétrico [4].

Abaixo é apresentada uma lista de metas e possíveis métodos de medição para o alcance dessas metas. Para a caracterização de campos magnéticos (ver item B.3), a lista não deve ser considerada completa porque pode haver uma grande variedade de metas e métodos. Para cada meta a banda de passagem da frequência da instrumentação é escolhida para a frequência ou frequências de interesse (ver meta (g)).

*Meta (a): caracterização dos níveis de campo elétrico*

Valores de referência de níveis de campo elétrico em função da frequência têm sido indicados em vários documentos [5], [29]; esses valores requerem a determinação dos níveis de campo com a maior magnitude assim como suas direções em áreas específicas.

*Método:* medidores de espaço livre e eletro-ópticos podem ser usados para fazer medições pontuais em campos elétricos máximos ou resultantes. Medidores de referência de terra devem ser usados para medidas no plano de terra ou em superfícies no potencial de terra. Instruções existem para medir predominantemente a vertical do campo elétrico da frequência industrial próxima do nível do solo nas vizinhanças das linhas de potência [22], [27]. O campo elétrico vertical é freqüentemente medido porque essa quantidade pode ser usada para calcular efeitos de indução em objetos próximos do nível do solo [9]. Diferentemente das medições pontuais de campos magnéticos de linhas de potência, os valores medidos não mudarão muito porque as tensões se mantêm quase constantes (a flecha dos condutores devido ao aquecimento provocado por altas correntes de carga pode levar os níveis maiores de campo).

Algumas instruções são dadas para medir a frequência industrial de campos elétricos longe de linhas de potência onde a área geométrica do campo é bem menos definida [22]. Um arranjo similar, aquele usado para determinar efeitos de

proximidade também pode ser usado para realizar medições. Estimativas da variação dos níveis do campo elétrico podem ser obtidas fazendo medições pontuais com todas as ferramentas elétricas e equipamentos ligados e desligados na área de interesse [4].

*Meta (b): caracterização de variações espaciais*

A distribuição espacial de campos elétricos distantes das linhas de potência é tipicamente desconhecida. Campos elétricos alternados na maioria dos ambientes serão não uniformes devido às dependências espaciais das fontes dos campos (condutores energizados) serem as mesmas em alguns casos como aqueles em campos magnéticos.

*Método:* Medições de variação espacial requerem o registro das componentes do campo elétrico em função da posição física. As Normas existem para realizar tais medições próximas de linhas de potência [22], [27]. Tais medições podem ser feitas com os medidores mapeadores. O software fornecido com tal instrumentação permite a geração de registros sobre o perfil da intensidade do campo elétrico, equipotenciais de campo, análises estatísticas dos níveis do campo, etc. Tais dados não irão captar as variações temporais do perfil do campo sem que haja medições repetidas. Variações no campo podem ocorrer se a sonda for movimentada, passando pelas superfícies com carga elétrica, tais como plásticos e roupas sintéticas.

*Meta (c): caracterização da variação temporal*

As variações temporais dos campos elétricos, em geral, não podem ser maiores que as variações dos campos magnéticos. Campos elétricos são produzidos por condutores que são energizados eletricamente. O campo elétrico em certo ponto será a soma das contribuições vetoriais de todos os condutores energizados nas vizinhanças do local de medição. Efeitos de blindagem fornecidos por materiais de construção, que podem depender das condições do tempo (como estruturas molhadas em um tempo chuvoso), podem contribuir para essa variação. Variações de curto prazo irão ocorrer se houver o movimento de objetos condutores (como carro e caminhões) que estiverem passando pelos locais de medição.

*Método:* Instrumentação de espaço livre que registra periodicamente o campo elétrico em um ponto no espaço e que pode ser usada em uma análise posterior, para determinar as variações temporais (ver meta (b)), é disponível. Medidores de referência de terra que podem ser usados com registradores de dados, disponíveis comercialmente, para registrar o campo elétrico nas superfícies do solo para uma análise posterior. A banda passante de frequência da instrumentação deve ser adequada para a frequência ou frequências de interesse (ver meta (g)).

*Meta (d): caracterização da média ponderada no tempo do campo elétrico*

*Meta (e): caracterização da intermitência do campo elétrico*

*Meta (f): Caracterização dos níveis de campo excedendo um valor específico*

*Método:* Esses parâmetros podem ser determinados para intervalos de tempo de interesse pela análise dos dados coletados com os medidores de campo elétrico que tem capacidade de registro (ver metas (b) e (c)).

*Meta (g): caracterização do conteúdo da frequência no campo elétrico*

Devido aos valores de referência do campo magnético ser colocados em função da frequência [5], [29], a caracterização do conteúdo da frequência pode ser uma meta importante.

*Método:* A instrumentação de espaço livre comercialmente disponível, que pode registrar periodicamente a forma da onda do campo elétrico, possui um software que permite a determinação do conteúdo da frequência dos dados gravados. Os sinais dos medidores de campo elétrico de referência de terra podem ser usados com analisadores de espectro para determinar o conteúdo da frequência dos campos caracterizados em superfícies aterradas. Medidores de espaço livre de três eixos que podem ser sintonizados em certas frequências estão sendo desenvolvidos. A banda de passagem de frequência da instrumentação deve ser adequada para a frequência ou frequências de interesse.

*Meta (h): caracterização da polarização do campo elétrico*

Uma caracterização completa do campo elétrico requer uma determinação da sua polarização para uma dada frequência.

*Método:* Medidores de campo de espaço livre de eixo único, medidores de campo eletro-ópticos podem ser usados para medir os valores eficazes dos semi-eixos maior e menor da elipse do campo elétrico para determinar sua polarização em um ponto no espaço. Os medidores de espaço livre de três eixos que podem indicar a polarização também estão em desenvolvimento. Como observado anteriormente, esse procedimento assume que apenas uma única componente de frequência do campo está sendo medida. Com a presença de outras frequências no campo, o vetor elétrico girante não traça mais uma simples elipse. Instrução para a determinação da polarização próxima de linhas de potência é dada em [22], [27].

*Meta (i): Caracterização da exposição humana em campo elétrico*

*Método:* Uma distinção deve ser feita entre a caracterização de um ou mais parâmetros do campo elétrico (como a meta (a) até (h)), e a exposição a tais parâmetros. Como foi discutido previamente, devido ao fato dos medidores de exposição a campo elétrico não serem facilmente disponíveis, e a interpretação dos dados registrados serem complicada, uma determinação direta da história da exposição pode ser difícil. Isso sugere que o campo elétrico não perturbado seja caracterizado em termos de um ou mais parâmetros de interesse considerados nas metas de (a) até (h). Estimativas da exposição humana para um ou mais parâmetros em uma área específica podem ser feitas por uma combinação de medições de variações espaciais e temporais e informações que descrevam padrões de atividades humanas na área. Um estudo dessa técnica levou a determinação dos "fatores de atividades" que podem ser usados como parte do processo para estimar a exposição de longo prazo no campo elétrico em uma área agrícola [12]. A magnitude do campo na superfície do corpo pode ser estimada usando fatores de aprimoramento previamente determinados para a área do campo considerada.

Para geometrias fixas de campo elétrico, durante as quais existe uma movimentação humana limitada, a intensidade do campo elétrico perturbado na superfície do corpo pode ser determinada usando um manequim vestindo uma capa condutora e sondas planas isoladas eletricamente ou sensores afixados na superfície do manequim nos locais de

interesse [11]. Os potenciais de referência do manequim e circuitos detectores das sondas são mantidos os mesmos, e podem ser variados para ficar quase compatíveis com as condições predominantes nos ambientes reais. Registrando o sinal de saída do detector com um registrador de dados obtém-se a informação sobre a variação temporal do campo perturbado.

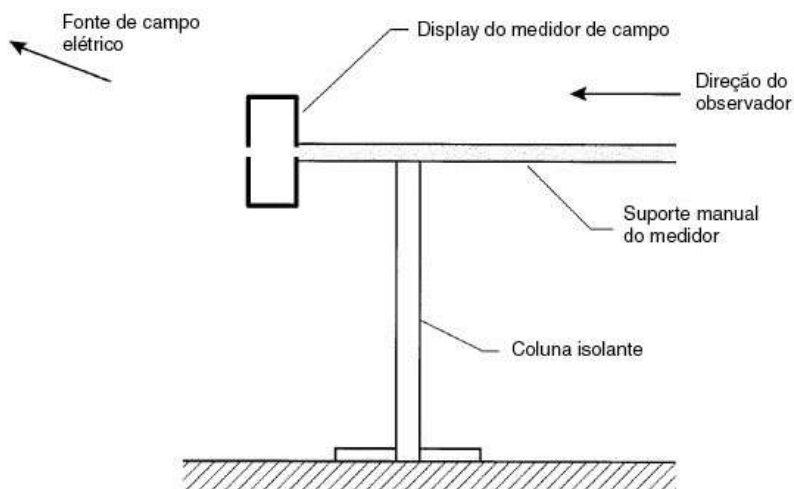


Figura C.1 – Arranjo experimental que pode ser usado para determinar os efeitos de proximidade do observador



Figura C.2a – Medidor de campo elétrico esférico de espaço livre

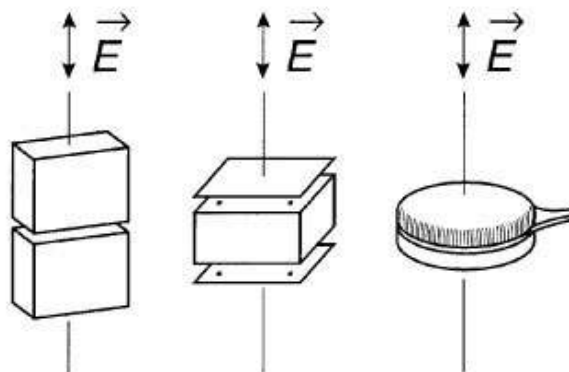


Figura C.2b – Medidores comerciais de campo elétrico de eixo único

Figura C.2 – Geometrias do medidor de espaço livre de eixo único

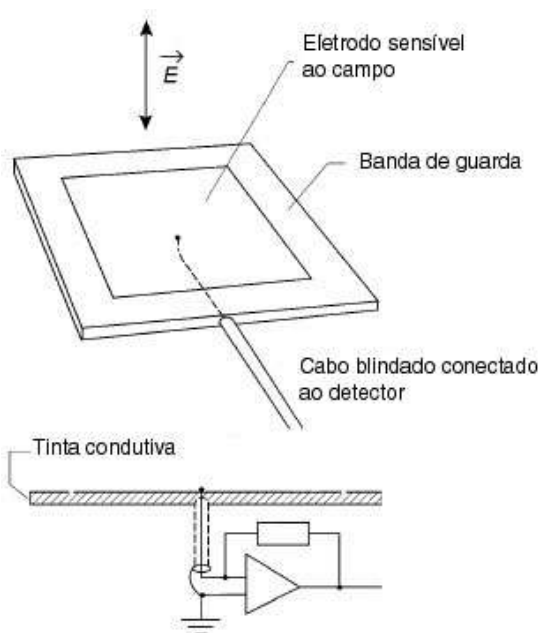


Figura C.3a – Sonda plana feita com uma placa de circuito coberta com dupla proteção isolante

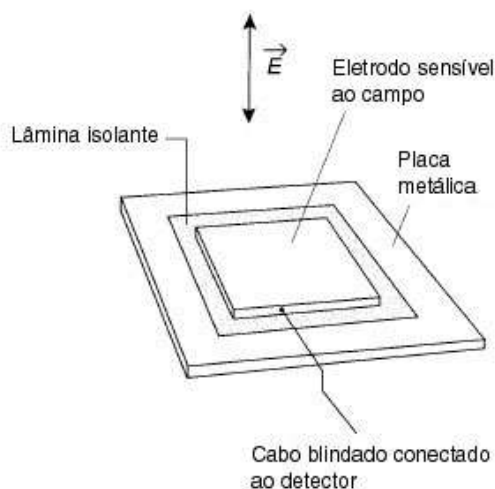
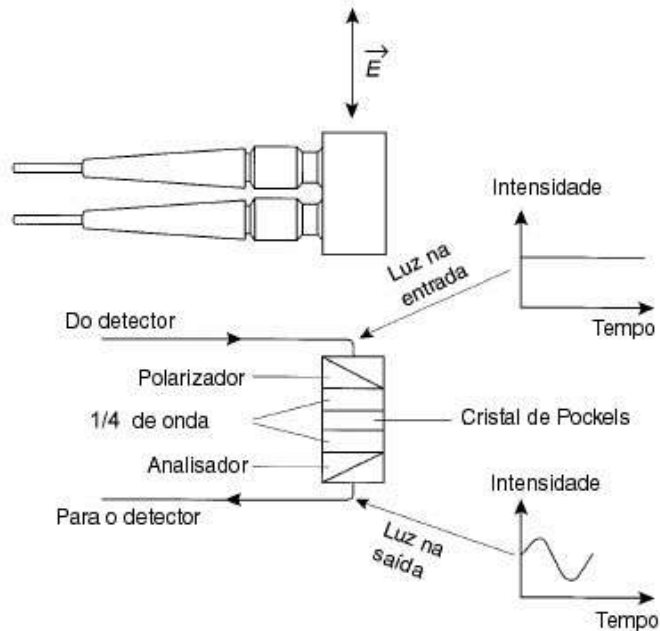


Figura C.3b – Sonda plana contendo duas placas paralelas separadas por lâmina isolante

Figura C.3 - Projetos de sondas planas usadas em medidores de campo elétrico referência de terra



A amplitude da modulação enquanto a luz atravessa o cristal de Pockels e outros elementos ópticos fornecem uma medida do campo elétrico  $E$ .

Figura C.4 – Sonda para medidor de campo elétrico de efeito Pockels

#### Anexo D (informativo)

##### Instrumentação de medição de campo magnético estático

O motivo desse anexo é observar que medições de um campo magnético estático podem ser feitas precisamente com uma variedade de instrumentação, disponível comercialmente, empregando diversas técnicas de medição [37]. Por exemplo, magnetômetros fluxogate, medidores de campo de ressonância nuclear magnética (NMR), medidores de campo de efeito Hall, e o magnetometro com dispositivo supercondutor de interferência quântica (SQUID) são alguns dos instrumentos disponíveis.

Medidores de campo magnetometro fluxogate e de efeito Hall podem ser usados para caracterizar antecipadamente a variação de campos estáticos em ambientes de medição considerados na norma de acompanhamento. Magnetômetros fluxogate possuem sensibilidade adequada para medir campo dentro da faixa de  $0,1 \mu\text{T}$  (e mais baixa) até  $0,01 \text{ T}$ , e medidores de efeito Hall podem medir níveis entre  $100 \mu\text{T}$  e  $10 \text{ T}$  [37].

É importante observar que a alta exatidão dos medidores de campo magnético NMR permite que eles sejam usados como um padrão de referência.

**Anexo E**  
**(informativo)**  
**Unidades**

**E.1 Unidades**

As unidades recomendadas são aquelas retiradas do Sistema Internacional de Unidades (unidades SI) e unidades derivadas das unidades SI. Algumas unidades SI e derivadas do SI são listadas abaixo.

Para unidades adicionais, ver ISO 1000:1992 [30].

**E.2 Unidades**

Tempo:	segundos (s)
Potencial elétrico:	volt (V)
kilovolt (kV)	
Corrente:	ampere (A)
Indutância:	henry (H)
Resistência:	ohm ( $\Omega$ )
Intensidade de campo elétrico:	volts por metro (V/m)
Densidade do fluxo magnético:	tesla (T)
gauss (G)	
Intensidade de campo magnético:	amperes por metro (A/m)

**E.3 Constantes úteis da física**

Constante de permeabilidade $\mu_0$ :	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$
Constante de permissividade $\epsilon_0$ :	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$

**E.4 Relação entre unidades**

$$1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$$

**Anexo F**  
**(informativo)**  
**Bibliografia**

- [1] ARMANI, D., CONTI, R., MANTINI, A., e NICOLINI, P., *Measurements of power frequency electric and magnetic around different industrial and household sources*, CIGRE Paper 36-107 (190).
- [2] BEIRSDORFER, P. e CLOTHIAUX, E. J., *High-frequency Magnetic Measurements Using Small Inductive probes*, American Journal of physics 51, pp. 1031-1036 (1983).
- [3] BOTTAUSCIO, O., CROTTI, G., D'ÉMILIO, S., FARINA, G., e MANTINI, A., *Generation of reference Electric and magnetic Fields for Calibration of power-Frequency Field Meters*, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement 42, pp. 547-552 (1993).
- [4] CAOLA, JR., R.J., DENO, D.W., e DYMEK, V.S.W., *Measurement of electric and magnetic fields in and around homes near a 500 kV transmission line*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-102, pp. 3338-3347 (1983).
- [5] CENELEC, European Prestandard ENV 50166-1, *Human exposure to electromagnetic fields, low frequencies (0 Hz to 10 Hz)*, (1995).
- [6] CHARTIER, V.L., BRACKEN, T.D., e CAPON, S.A., *BPA study of occupational exposure to 60 Hz electric fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-104, pp. 733-744 (1985).
- [7] COOK, M.C., GRAHAM, C., COHEN, H.D., e GERKOVICH, M.M., *A replication study of human exposure to 60 Hz Fields*, Bioelectromagnetics 13, pp. 261-285 (1992).
- [8] COOKE, C.M., *proximity effect of a Conducting Plane in Electro-Optic Field probe measurements*, 1983 Conference on Electrical insulation and Dielectric phenomena, Buck Hill Falls, PA, (1983)
- [9] DENO, D.W., *Electrostatic Effect Induction Formulae*, IEEE trans. Power Appar. Systems PAS-94, pp. 1524-1536 (1975).
- [10] DENO, D.W., *Transmission Line Fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-95, pp. 1600-1611 (1976).
- [11] DENO, D.W., *Currents induced in the human body by high-voltage transmission line electric field-measurement and calculation of distribution and dose*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-96, pp. 1517-1527 (1977).
- [12] DENO, D.W. e SILVA, M., *Method for evaluating human exposure to 60 Hz electric fields*, IEEE trans. Power Appar. Systems PAS-103, pp. 1699-1706 (1984).
- [13] DIETRICH, F.M., FEERO, W.E., e JACOBS, W.L., *Comparison of magnetic and electric fields of conventional and advanced electrifield transportation systems*, U.S. Dept. of Transportation Report, DOT/FRA/ORD-93/07(1993).
- [14] DIPLACIDO, J., SHIH, C.H. e WARE, B.J., *Analysis of the proximity Effects in Electric Field measurements*, IEEE trans. Power Appar. And systems PAS-97, pp. 2167-2177 (1978).
- [15] FEYCHTING, M. e AHLBOM, A., *Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines*, Am. J. Epidemiol. 138, pp. 467-481 (1993).
- [16] FIRESTER, A. H., *Design of Square Helmholtz Coil systems*, Review of Scientific Instruments 40, 1468-1470 (1969).
- [17] FRIX, W. M., KARADY, G.G., e VENETZ, B.A., *Comparison of Calibration systems for Magnetic Field Measurement Equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery 9, pp. 100-109 (1994).
- [18] FULCOMER, P.M., *NBS Ambient Magnetic Field Meter for Measurement and Analysis of low-Level Power Frequency Magnetic Fields in Air*, National Institute of Standard and Technology Report NBSIR 86-3330 (1985).

- [19] GOCKENBACH, E., GANZMANN, P., e BROGLI, E., *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*, Paper 40.06, sixth International symposium on High-Voltage engineering, New Orleans, LA, (1989).
- [20] HALLIDAY, D. e RESNICK, R., *Physics, Parts I and II*, New York: Wiley & Sons, pp. 861-862 (1966).
- [21] HAMASACKI, H., GOTOH, H., KATOH, M. e TAKEUCHI, s., *OPSEF: an Optical Sensor for Measurement of High Electric Field Intensity*, Electronics Letters 16, pp. 406-407 (1980).
- [22] IEC 60833, *Measurement of power frequency electric fields* (1997).
- [23] IEC 61000-2-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – section 5: Classification of electromagnetic environments* – Basic EMC publication (1995).
- [24] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *An evaluation of Instrumentation Used to Measure AC Power System Magnetic Fields*, IEEE transactions on Power Delivery 6, pp. 373-383 (1991).
- [25] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Measurement of Power Frequency Magnetic Fields Away from Power lines*, IEEE transactions on Power Delivery 6, pp. 901-911 (1991).
- [26] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *A Protocol for spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, IEEE transactions on Power Delivery 8, pp. 386-1394 (1993); IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Correction to A protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, *Ibid* 9, p. 606 (991994).
- [27] IEEE Std 644-1994 (Revision of IEEE std 644-1987), *IEEE standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines* (1994).
- [28] IEEE std 1140-1994, *IEEE standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display terminals (VDTs) from 5Hz to 400 kHz* (1994).
- [29] ICNIRP Guidelines, *Guidelines for Limiting Exposure to Time – Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (UP to 300 GHz)*(1990)
- [30] ISO 1000, *SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units*, (International Organization of Standards, Geneva, Switzerland) (1992).
- [31] ISO Guide 25, *General requirements for the competence of calibration and testing laboratories*, (International Organization of Standards, Geneva, Switzerland) (1990).
- [32] KAUNE, W.T., NIPLE, J.C., *et al.*, *Small integrating meter for assessing long-term exposure to magnetic fields*, Bioelectromagnetics 13, pp. 413-427 (1992).
- [33] KAUNE, W.T., STEVENS, R.G., CALLAHAN, N.J., SEVERSON, R.K. e THOMAS, D.B., *Residential Magnetic and Electric Fields*, Bioelectromagnetics 8, pp. 315-335 (1987).
- [34] KIRKHAM, H., JOHNSTON, A., JACKSON, S. e SHEU, K., *AC and DC electric field meters Developed for the U.S. Department of Energy*, Jet propulsion laboratory report prepared for U.S. Department of Energy, JPL Publication 87-20 (February, 1987).
- [35] KIRSCHVINK, J.L., *Uniform Magnetic Fields and Double Wrapped Coil Systems*, Bioelectromagnetics 13, pp. 401-411 (1992).
- [36] KOTTER, F.R., e MISAKIAN, M., *AC Transmission Line field Measurements*, NBS report prepared for the Department of Energy, November, 1977, available as report PB82133554 from NTIS, Springfield, VA 22161.
- [37] LENZ, J.E., *A review of Magnetic Sensors*, *Proceedings of the IEEE* 78, pp. 973-989 (1990).
- [38] LONDON, S.J., THOMAS, D.C., BOWMAN, J.D., *et al.*, *Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia*, Am. J. Epidemiol. 134, pp. 923-937 (1991).
- [39] MADER, D.L., e PERALTA, S.B., *Residential Exposure to 60-Hz Magnetic fields from Appliances*, Bioelectromagnetics 13, pp. 287-301 (1992).
- [40] MAMISHEV, A.V. e RUSSELL, B.D., *Measurement of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors*, IEEE Transactions on Power delivery 10, pp. 1211-1216 (1995).
- [41] MERCHANT, C.J., RENEW, R.C. e SWANSON, J., *Exposure to power frequency magnetic fields in the home*, J.Radiol. Prot. 14, pp. 77-87 (1994).
- [42] MIHAILEANU, C., *et al.*, *Electrical Field Measurements in the Vicinity of HV equipment and Assessment of its Biophysiological perturbing Effects*, CIGRE Paper 36-08, Paris, France (1976).
- [43] MISAKIAN, M., *Calibration of Flat 60-Hz Electric Field Probes*, Bioelectromagnetics 5, pp. 447-450 (1984).
- [44] MISAKIAN, M., Discussion of [65] (1985).
- [45] MISAKIAN, M., *In vitro exposure parameters with linearly and circularly polarized ELF magnetic fields*, Bioelectromagnetics 12, pp. 377-381 (1991).
- [46] MISAKIAN, M., *Coil probe Dimensions and Uncertainties During measurements of Nonuniform ELF Magnetic Fields*, National Institute of Standards and technology Journal of Research 98, pp. 287-295 (1993); MISAKIAN, M. e FENIMORE, C., *Three-axis Coil probe Dimensions and Uncertainties During Measurement of Magnetic fields from Appliances*, *ibid*. 99, pp. 247-253 (1994).
- [47] MISAKIAN, M. e FENIMORE, C., *Distributions of Measurement Error for Three-Axis Magnetic Field Meters During Measurements Near Appliances*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp. 244-249 (1996).
- [48] MISAKIAN, M. e FULCOMER, P.M., *Measurement of Nonuniform power Frequency Electric Field*, IEEE Transactions on Electrical Insulation EL-18, pp. 657-661 (1983).

- [49] MISAKIAN, M., e KOTTER, F.R., Discussion of [14] (1978).
- [50] MISAKIAN, M., SHEPPARD, A.R., KRAUSE, D., FRAZIER, M.E., e MILLER, D.L., *Biological, Physical, and Electrical Parameters for In Vitro Studies With ELF Magnetic and Electric Fields: A Primer*, Bioelectromagnetics Supplement 2, 1-73 (1993).
- [51] MPR (1990:10) Mat och Provstyrelse, Swedish National Metrology and testing Council, *Test methods for visual display terminals* (1990).
- [52] NCRP *A Practical Guide to the Determination of Human Exposure to Radiofrequency Fields*, National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 119 (1993).
- [53] NISSEN, J., e PAULSSON, L.-E., *Influence of Field Inhomogeneity in Magnetic Calibration Coils*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp. 304-306 (1996)
- [54] OLSEN, R.G., DENO, D, e BAISHIKI, R.S., *Magnetic Fields from Electric Power Lines, Theory and Comparison to Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery 3, pp. 2127-2136 (1998).
- [55] PRIMDAHL, F., *The fluxgate magnetometer*, Journal of Physics E, Scientific Instruments 12, pp. 241-253 (1979).
- [56] RAMO, S. e WHINNERY, J.R., *Fields and Waves in Modern Radio*, New York: John Wiley, p. 141 ff (1944).
- [57] REILLY, J. P., *et al.*, *Electric and Magnetic Field Coupling from High-Voltage AC Power Transmission Lines – Classification of Short term Effects on People*, IEEE Transactions on Power apparatus and Systems PAS-97, pp. 2243-2252 (1978).
- [58] REITZ, J.R. e MILFORD, F.J. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley, p. 52 (1960).
- [59] SAHL, J.D., KELSH, M.A. e GREENLAND, S., *Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among utility workers*, Epidemiology 4, pp. 104-114 (1993).
- [60] SAVITZ, D.A. e LOOMIS, D.P., *Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electrical utility workers*, Am. J. Epidemiology 141, pp. 123-134 (1995).
- [61] SICREE, R.M., RAUCH, G.B., e DIETRICH, F.M., *Comparison of Magnetic Flux density Meter Responses Over A Database of Residential Measurements*, IEEE Transactions on power Delivery 8, pp. 607-619 (1993).
- [62] SILVA, M., HUMMON, N., RUTTER, D. e HOOPER, C., *power frequency magnetic fields in homes*, IEEE Transactions Power delivery 4, pp. 465-477 (1989).
- [63] STRATTON, J.A., *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw-Hill, p. 437 (1941).
- [64] SWANSON, J., *Measurement of static magnetic fields in homes in the UK and their implications for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields*, J. Radiol. Prot. 14, pp. 67-75 (1994).
- [65] TAKUMA, T., KAWAMOTO, T., e SUNGA, Y., *Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters*, IEEE transactions on Power apparatus and Systems PAS-104, pp. 489-496 (1985).
- [66] TENFORDE, T.S. e KAUNE, W.T., *Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans*, Health physics 53, pp. 585-606 (1987).
- [67] THERIAULT, G., GOLDBERG, M., MILLER, A.B., *et al.*, *Cancer risk associated with occupational exposures to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and france: 1970-1989*, Am. J. Epidemiol. 139, pp. 550-572 (1994).
- [68] VINH, T., JONES, T.L., e SHIH, C.H., *Magnetic fields Near Overhead Distribution lines- Measurements and Estimating techniques*, IEEE Transactions on power delivery 6, pp. 912-921 (1991).
- [69] WEBER, E., *Electromagnetic Theory*, New York: Dover, pp. 131-133 (1965).