

ESTUDO DE TÉCNICAS DE BLINDAGEM DE  
CAMPOS MAGNÉTICOS DE BAIXA  
FREQUÊNCIA

**Aluna:** Marisa Lages Murta

**Orientador:** Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino


**“Estudo de Técnicas de Blindagem de Campos Magnéticos  
de Baixa Frequência ”**

**Marisa Lages Murta**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


Aprovada em 10 de dezembro de 1998.

Por:



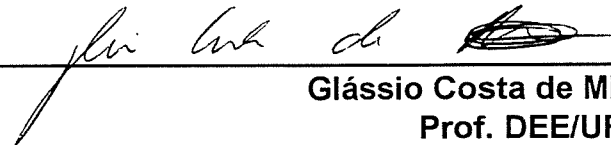
---

**José Osvaldo Saldanha Paulino – Dr.  
Prof. DEE/UFMG - Orientador**



---

**Flávio Henrique Vasconcelos – Ph.D.  
Prof. DEE/UFMG**



---

**Glássio Costa de Miranda – Dr.  
Prof. DEE/UFMG**



---

**Jaime Arturo Ramirez – Ph.D.  
Prof. DEE/PUC-MG**

Este trabalho apresenta o estudo de algumas técnicas de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência, tais como a variação da configuração do sistema e a utilização de materiais não magnéticos.

A partir da definição de um sistema trifásico como a fonte de campo magnético, foi desenvolvida uma formulação matemática para a quantificação do fenômeno envolvido, a qual foi implementada em um programa computacional. Uma avaliação da influência da configuração do sistema no valor do campo magnético resultante foi feita com sua utilização.

Foi construída uma bancada experimental para a aplicação das técnicas de blindagem propostas e, para a realização das medições, foi projetado e construído um sensor de campo magnético. A aplicação da blindagem não magnética à bancada experimental foi feita utilizando-se chapas de alumínio, as quais foram colocadas sobre a fonte de campo.

Finalmente, foi desenvolvido um breve estudo da blindagem ativa, indicando que bons resultados podem ser atingidos com a sua utilização. Há a necessidade, no entanto, de um maior aprofundamento dessa técnica através de um estudo mais abrangente, o qual é proposto para a continuidade deste trabalho.

This work presents the study of some low frequency magnetic field shielding techniques such as changing the system's configuration and using nonferrous metal shields.

The definition of a three-phase system as the source of magnetic fields was used in the mathematical formulation of this work. An algorithm implemented in a computer program was used to evaluate the influence of the system's configuration in the final value of the magnetic field.

A prototype for the three-phase system was built to test the proposed shielding techniques and a sensor was developed and built in order to measure the field values. The nonferrous metal shields applied in the prototype were made of aluminum plates.

After this previous analysis on such techniques, a brief study about active shielding was done, showing that good results can be achieved. However, there is the necessity for further studies on this subject which could be developed in future works.

Ao Prof. José Osvaldo pelo incentivo e valiosa orientação que possibilitaram a realização deste trabalho;

Aos funcionários do Laboratório de Extra-Alta Tensão pela ajuda indispensável;

Aos amigos e colegas do CPDEE pelos dias de convívio e, especialmente, aos amigos Maria Luisa, Gustavo e Joaquim, pela ajuda e paciência dispensadas nas diversas etapas deste trabalho;

Aos amigos da Paróquia São Bento pelo incentivo;

Ao Marcos, meu namorado, pela paciência e apoio;

A toda minha família, meus pais e irmãos pelo apoio e estímulo, paciência e compreensão durante todas as fases de minha formação;

À Fapemig pela ajuda financeira;

A todos aqueles que contribuíram, de uma forma ou de outra, para a realização deste trabalho.

<b>Resumo</b>	<i>ii</i>
<b>Abstract</b>	<i>iii</i>
<b>Agradecimentos</b>	<i>iv</i>
<b>1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 A Relevância do Tema em Investigação	1
1.2 Campos Magnéticos de Baixa Freqüência	2
1.3 Objetivo Básico do Trabalho	3
1.4 Organização do Texto	4
<b>2 - Blindagem Eletromagnética</b>	<b>6</b>
2.1 Introdução	6
2.2 Campo Próximo X Campo Distante	8
2.3 Eficiência de Blindagem	10
2.3.1 Fator de absorção, $S_A$	12
2.3.2 Fator das múltiplas reflexões, $S_{MR}$	14
2.3.3 Fator de reflexões, $S_R$	15
(a) $S_R$ para fontes elétricas	16
(b) $S_R$ para fontes magnéticas	17
2.3.4 Análise da eficiência de blindagem na região de campo próximo	18
(a) Fonte de campo elétrico	18
(b) Fonte de campo magnético	19
2.4 Blindagem Ferromagnética X Condutiva	22
2.5 Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Freqüência	25

3.1	Introdução	31
3.2	Dedução da Formulação Matemática	32
3.2.1	Sistema genérico de condutores, cálculo em $z=0$	34
	(a) $B$ gerado por um único condutor	36
	(b) $B$ gerado por um sistema trifásico	39
3.2.2	Sistema genérico de condutores, cálculo em $z \neq 0$	40
3.2.3	Consideração do condutor neutro	43
3.2.4	Implementação da formulação	43
3.3	Consideração do Efeito do Solo	44
3.3.1	Análise do efeito do solo no cálculo de $B$	47
3.4	Estudo de Casos	50
3.4.1	Sistemas equilibrados	50
3.4.2	Sistemas desequilibrados	53
3.5	Considerações Finais	57
<b>4</b>	<b>Projeto da Bancada Experimental</b>	<b>59</b>
4.1	Introdução	59
4.2	Aspectos da Bancada Experimental	60
4.2.1	Comprimento dos condutores	60
4.2.2	Intensidade da corrente	63
4.3	Sistema de Geração	64
4.4	Sistema Físico	66
4.5	Sistema de Medição	67
<b>5</b>	<b>Sensor de Campo Magnético</b>	<b>69</b>
5.1	Introdução	69
5.2	Construção do Sensor	70
5.3	Determinação da Constante do Sensor	72

<b>6 - Resultados Experimentais</b>	85
6.1 Introdução	85
6.2 Alteração da Geometria	86
6.3 Blindagem da Fonte com Chapas de Alumínio	90
6.3.1 Utilização de duas chapas de alumínio	95
6.3.2 Blindagem em "U"	96
6.4 Blindagem do Equipamento	99
6.5 Comparação entre os Resultados Obtidos	103
6.6 Blindagem Ativa	105
6.7 Análise dos Resultados	110
<b>7 - Conclusões</b>	112
7.1 Propostas de Continuidade	113
<b>Referências Bibliográficas</b>	115
<b>Apêndice A</b>	119



# 1 Introdução

## *1.1 A Relevância do Tema em Investigação*

Nos últimos anos, o difundido uso da energia elétrica para todos os fins significou um considerável aumento da utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos pela sociedade, representando um crescimento significativo das fontes de campo eletromagnético presentes no ambiente.

Além disso, devido às tecnologias empregadas e à conseqüente miniaturização, os atuais equipamentos eletrônicos tornaram-se extremamente susceptíveis às perturbações eletromagnéticas dos mais diversos tipos.

Os relatos de problemas devido a interferências têm se tornado freqüentes, levando a um interesse cada vez maior relacionado aos projetos que visam a minimização dos efeitos indesejáveis causados pelos campos eletromagnéticos presentes no ambiente [1, 2, 3, 4].

Dessa forma, a existência de um grande número de instalações e equipamentos elétricos que criam perturbações eletromagnéticas no ambiente, juntamente com o aumento considerável da sensibilidade dos componentes eletrônicos, é, atualmente, um relevante problema relativo à compatibilidade eletromagnética.

Por outro lado, alguns estudos epidemiológicos têm apontado como

campos eletromagnéticos de baixa frequência ainda não são conclusivos [5].

Assim, os estudos relativos à minimização dos níveis dos campos eletromagnéticos no ambiente, reduzindo os valores de campo aos quais seres vivos e equipamentos são expostos, representam uma área de grande interesse dentro da compatibilidade eletromagnética.

## ***1.2 Campos Magnéticos de Baixa Frequência***

Dentre os problemas de interferência em equipamentos encontrados, aqueles causados por campos magnéticos de baixa frequência merecem destaque, dada a frequência com que têm sido relatados. Geralmente, os campos magnéticos são produzidos pela rede de distribuição interna do edifício, sua subestação, linhas de distribuição muito próximas ao edifício ou mesmo por outros equipamentos elétricos [6].

O interesse na resolução desse tipo de problema é grande, uma vez que as soluções existentes são, muitas vezes, de alto custo e de complexa implementação. Em instalações novas, existem diversos meios de se minimizar os campos magnéticos produzidos [1]. Entretanto, em instalações já existentes, a melhor solução para redução dos campos ainda não é totalmente conhecida.

Existem algumas medidas que podem ser tomadas com o objetivo de se minimizar a interferência de campos eletromagnéticos externos de baixa frequência em um equipamento, dentre elas: alteração da localização do equipamento eletrônico, da localização da fonte de campo magnético, do arranjo e geometria dos cabos de alimentação que constituem a fonte de campo, blindagem do equipamento e blindagem da fonte [1, 4, 7].

Geralmente, são feitas combinações entre algumas dessas técnicas,

sejam economicamente viáveis. Um dos problemas é o desconhecimento dos níveis de suportabilidade de equipamentos eletrônicos a campos magnéticos, bem como o desconhecimento do regime de carga e do nível de harmônicos presentes na corrente que circula nos cabos das instalações [3].

### ***1.3 Objetivo Básico do Trabalho***

O objetivo deste trabalho é o estudo de técnicas de blindagem para a minimização da interferência causada por campos magnéticos de baixa frequência em equipamentos eletrônicos. Foi construída uma bancada experimental cuja fonte de campo magnético é representada por um sistema trifásico de condutores, nos quais circulam correntes capazes de produzir níveis de campo magnético razoáveis, simulando a rede de distribuição interna de um edifício. Foram desenvolvidas tentativas de redução dos valores de campo magnético de 60 Hz, através da adoção de algumas medidas de controle, tais como alteração da geometria dos cabos e blindagem com utilização de placas metálicas.

Em uma primeira parte desta dissertação, foi feito um estudo teórico da influência da realocação dos cabos e da variação das geometrias dos mesmos nos valores de campo magnético resultante. Esse estudo foi realizado através de simulações em um programa computacional desenvolvido em *MatLab*<sup>®</sup> para cálculo do campo magnético.

Em seguida, em uma segunda parte do trabalho, foi realizado um estudo experimental, no qual se analisou os efeitos resultantes da utilização da blindagem da fonte com chapas metálicas. Nesta etapa, foi utilizada a bancada experimental construída com o objetivo de se verificar a influência da blindagem metálica na redução dos campos magnéticos de baixa

avaliar a eficiência de cada uma delas.

## ***1.4 Organização do Texto***

Esta dissertação é composta de 7 capítulos e 1 apêndice, que são brevemente apresentados a seguir.

No presente capítulo, *Introdução*, é apresentada a relevância do tema em investigação, juntamente com as principais motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 2, *Blindagem Eletromagnética*, são apresentados os principais aspectos e fenômenos envolvidos na teoria de blindagem. Além disso, são apontadas as principais alternativas utilizadas para a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

O capítulo 3, *Desenvolvimento da Formulação Matemática*, apresenta a dedução matemática necessária à quantificação do fenômeno em estudo, a partir da qual foi possível a elaboração de um programa computacional para o cálculo do campo magnético gerado por um sistema trifásico. Em seguida, são feitas simulações para avaliação da influência da configuração do sistema no valor do campo resultante.

No capítulo 4, *Projeto da Bancada Experimental*, são apresentadas as características da bancada experimental construída no LEAT (Laboratório de Extra-Alta Tensão) da UFMG, além da descrição dos sistemas de geração e medição utilizados.

As características do sensor de campo magnético construído são apresentadas no capítulo 5, *Sensor de Campo Magnético*, juntamente com a determinação de sua constante, ou seja, a constante pela qual se deve multiplicar o valor medido pelo sensor para obtenção do campo original.

apresentado.

As conclusões e propostas de continuidade do trabalho são apresentados no último capítulo, *Conclusões*.

Algumas fotos da bancada experimental construída são apresentadas no apêndice A.

# 2 Blindagem Eletromagnética

## 2.1 Introdução

A Blindagem Eletromagnética é, conceitualmente, uma barreira para a transmissão de campos eletromagnéticos [8]. Nesse contexto, qualquer técnica que venha a reduzir a intensidade de campos eletromagnéticos pode ser considerada uma blindagem eletromagnética, tais como: utilização de caixas metálicas, chapas, gabinetes, telas, ou mesmo outras técnicas como a alteração da geometria de um sistema ou a utilização de filtros no controle da emissão conduzida em cabos. A escolha da técnica de blindagem a ser utilizada é determinada pela natureza do fenômeno envolvido (fonte de campo predominantemente elétrica ou magnética, frequência de emissão do campo, dentre outros), bem como pela viabilidade do projeto.

O objetivo de uma blindagem eletromagnética é garantir que os campos elétricos e/ou magnéticos sejam mantidos externos a um determinado equipamento ou retidos em sua fonte. Os dois propósitos de uma blindagem podem ser observados na figura 2.1.

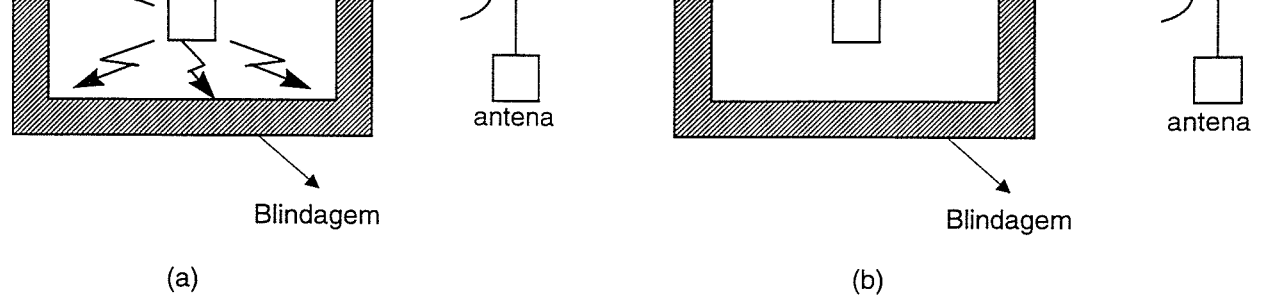


Figura 2.1 - Propósitos de uma blindagem eletromagnética.

Na figura 2.1(a), a blindagem é utilizada com o objetivo de evitar que os níveis de emissão de um determinado equipamento ultrapassem certos limites estabelecidos, por exemplo, por normas. Na figura 2.1(b), o propósito da blindagem é garantir que emissões externas a um equipamento não interfiram em seu funcionamento normal. A aplicação da blindagem com cada um desses propósitos dependerá do tipo de problema em estudo, bem como do objetivo a ser atingido com a utilização da mesma.

É importante ressaltar que os níveis de emissão e susceptibilidade de um equipamento são ditados por normas e que mesmo o cumprimento desses níveis não garante a inexistência de problemas de interferência. Além disso, há o problema do desconhecimento dos níveis de suportabilidade a campos magnéticos de determinados equipamentos eletrônicos. No Brasil, por exemplo, não existe uma normalização referente aos níveis de susceptibilidade dos terminais de vídeo [3], o que dificulta o projeto da blindagem dos mesmos. Muitas vezes, os limites existentes dizem respeito a níveis nocivos à saúde [5] e não a alterações do funcionamento normal do equipamento.

Para melhor entender os mecanismos envolvidos na teoria de uma blindagem eletromagnética, torna-se necessário o conhecimento de alguns conceitos e fenômenos importantes relativos a campos elétricos e magnéticos e à própria blindagem. A seguir, serão apresentados esses

Objetivando a análise do comportamento dos campos elétrico e magnético para diferentes distâncias da fonte, foram considerados, como fontes de campo elétrico e magnético, respectivamente o dipolo elétrico e o dipolo magnético.

Para pontos de observação suficientemente distantes da fonte de campo, sabe-se que são estabelecidas ondas planas, cujas principais características são a ortogonalidade entre as componentes dos campos elétrico e magnético e a razão entre elas permanecer constante, conhecida como a impedância intrínseca do meio. A impedância intrínseca do vácuo é muitas vezes utilizada e designada por  $\eta_0$ . Essas características somente são válidas para pontos relativamente distantes da fonte e essa região é conhecida como *região de campo distante*.

À medida que o ponto de observação se aproxima da fonte, essas condições podem não ser garantidas. Na região conhecida como *região de campo próximo*, as componentes de campo já não mantêm uma relação constante entre elas e sua variação é influenciada por outras componentes de campo não consideradas na região de campo distante [8]. Sendo assim, na região de campo próximo, o comportamento dos campos é bem mais complexo, sendo necessária a análise completa das equações de campo, sem as simplificações que podem ser feitas na região de campo distante.

Um bom critério para se determinar a fronteira entre a região de campo próximo e distante é observar o gráfico que relaciona a razão entre o campo elétrico e magnético,  $E/H$ , em função da distância  $r$  entre o ponto de observação e a fonte. A relação entre  $E$  e  $H$  é conhecida como *impedância de onda*.

Observando a figura 2.2, verifica-se que quando a distância  $r$  for aproximadamente três vezes o comprimento de onda do campo da fonte ( $3\lambda_0$ ), a região de campo distante estará estabelecida, uma vez que a impedância de onda permanece constante nessa região. Para distâncias



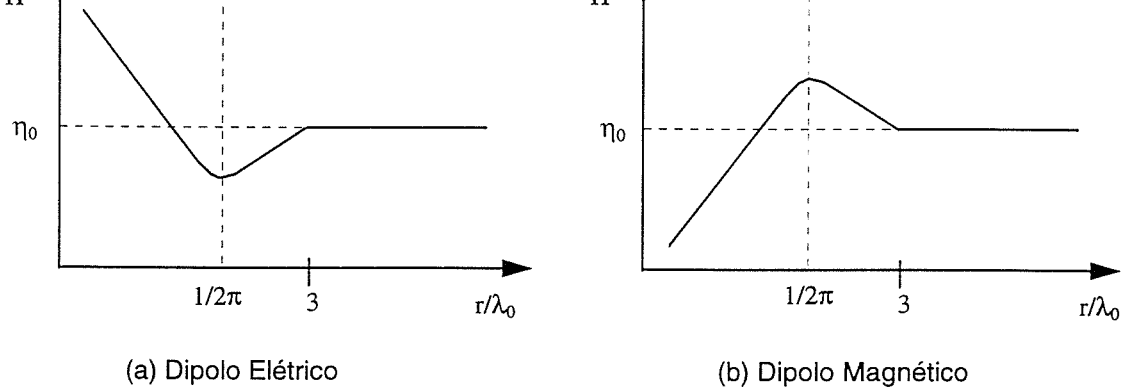


Figura 2.2 - Definição de campo próximo e campo distante a partir da variação da impedância de onda com a distância [8].

$\lambda_0$  - comprimento de onda

$r$  - distância entre a fonte e o ponto de observação

visa apenas a determinação de uma fronteira prática entre uma região de variação de campo mais complexa (campo próximo) e uma região mais simples (campo distante).

A região de campo distante é considerada uma região de mais fácil estudo, uma vez que a relação entre  $E$  e  $H$  mantém-se constante e simplificações podem ser introduzidas. Já a região de campo próximo é caracterizada por ser de análise mais complexa, uma vez que  $E$ ,  $H$  e a impedância de onda apresentam variações rápidas e acentuadas, tornando-se difícil o estudo do comportamento do campo nesta região.

É importante salientar que a definição de campo próximo e distante está intimamente relacionada com a frequência do campo gerado. Para uma frequência relativamente alta, por exemplo de 100 MHz, a região de campo distante é atingida com uma distância de apenas 3 metros da fonte. Já para a frequência de 60 Hz, a região de campo distante somente será estabelecida para distâncias superiores a 15.000 Km! Assim, para uma fonte de 60 Hz, o estudo sempre será caracterizado como um problema na região de campo próximo, sendo, pois, de análise mais complexa.

caracterizada como uma *fonte de alta impedância*. Por outro lado, a impedância de uma fonte magnética é menor que  $\eta_0$ , o que caracteriza a fonte magnética como uma *fonte de baixa impedância* [8].

O conhecimento do comportamento dos campos nas regiões de campo próximo e distante, bem como a determinação da natureza do fenômeno (frequência e região em que se encontra o problema) são pontos essenciais para a correta escolha e utilização da técnica de blindagem a ser implementada.

É importante ressaltar que, para a blindagem de campos magnéticos de 60 Hz, objetivo deste trabalho, a região em estudo será sempre a região de campo próximo e a fonte será, primordialmente, de baixa impedância.

### ***2.3 Eficiência de Blindagem***

A eficiência de uma blindagem pode ser avaliada através do cálculo do fator de blindagem, o qual é definido como a razão entre a amplitude do campo elétrico (ou magnético) incidente na blindagem e a amplitude do campo elétrico (ou magnético) transmitido após a passagem pela blindagem. De uma forma mais geral, o fator de blindagem é a razão entre a amplitude do campo elétrico (ou magnético) incidente em um equipamento sem a blindagem e a amplitude do campo com a utilização da mesma, conforme a equação (2.1).

$$S = \frac{U_i}{U_t}; \quad (2.1)$$

onde  $S$  é o fator de blindagem;

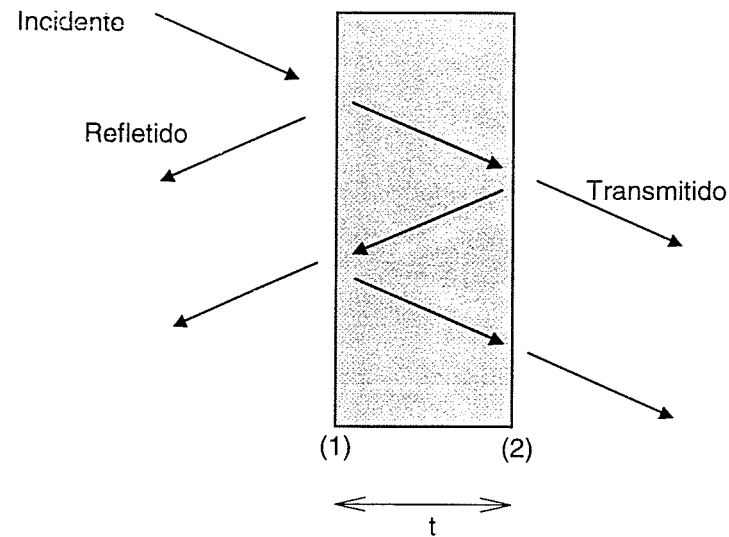
$U_i$  é o campo sem a blindagem;

$$S(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{E_i}{E_t} \right|, \quad \text{para campos elétricos;} \quad (2.2)$$

$$S(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{H_i}{H_t} \right|, \quad \text{para campos magnéticos;}$$

onde os índices “i” e “t” referem-se, respectivamente, aos sinais incidentes e transmitidos, ou, de uma forma mais geral, aos sinais sem a blindagem e com a blindagem.

Existem vários fenômenos que contribuem para a redução de um campo incidente em uma barreira. Para a análise desses fenômenos, será considerada uma chapa de espessura  $t$ , condutividade  $\sigma$ , permeabilidade  $\mu$ , permissividade  $\varepsilon$ , com dimensões infinitas, de tal forma que o único meio através do qual o campo incidente possa passar seja a chapa. Os fenômenos responsáveis pela redução do campo incidente, utilizando-se o método da Linha de Transmissão [7], são mostrados na figura 2.3 .



$$S = S_A \cdot S_R \cdot S_{MR} \quad (2.3)$$

ou , em dB,

$$S(dB) = S_A(dB) + S_R(dB) + S_{MR}(dB); \quad (2.4)$$

onde:  $S_A$  representa o fator de absorção;

$S_R$  , o fator de reflexão;

$S_{MR}$  , o fator de múltiplas reflexões.

A seguir, serão analisados cada um dos fatores acima explicitados, os quais contribuem para a redução do campo total transmitido através da chapa metálica.

### **2.3.1 Fator de absorção, $S_A$**

O primeiro efeito a ser considerado são as perdas por absorção, representadas pelo fator  $S_A$ . Ao atravessar a chapa metálica, o campo incidente sofre uma atenuação devido às perdas ôhmicas do material, as quais podem ser representadas pela seguinte relação [7]:

$$E_i = E_i \cdot e^{-\alpha z} \quad \text{ou} \quad H_i = H_i \cdot e^{-\alpha z} . \quad (2.5)$$

onde:  $\alpha$  é a constante de atenuação do material;

$z$  é a distância entre o ponto de incidência do campo e o ponto de cálculo do campo transmitido.

Em função do fator de absorção, pode-se escrever

Como, geralmente, as chapas metálicas utilizadas para a blindagem são constituídas de materiais de alta condutividade, a constante de atenuação pode ser expressa em função da profundidade de penetração [8]:

$$S_A = e^{\alpha z} = e^{\frac{t}{\delta}}, \quad (2.7)$$

onde:  $t$  é a espessura da chapa;

$\delta$  é a profundidade de penetração do material da chapa.

Para bons condutores, tem-se:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}. \quad (2.8)$$

Assim, a partir das equações (2.7) e (2.8), o fator de absorção pode ser calculado, em dB, por [8]:

$$S_A(dB) = 8,7 \cdot \frac{t}{\delta} = 131,4 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}; \quad (2.9)$$

onde:  $f$  é a frequência do campo;

$\mu_r$  é a permeabilidade do material relativa à permeabilidade do cobre;

$\sigma_r$  é a condutividade do material relativa à condutividade do cobre.

Como pode ser observado pela equação (2.9), a atenuação por absorção é independente do tipo de fonte (elétrica ou magnética), dependendo apenas da natureza do material e da frequência do campo.

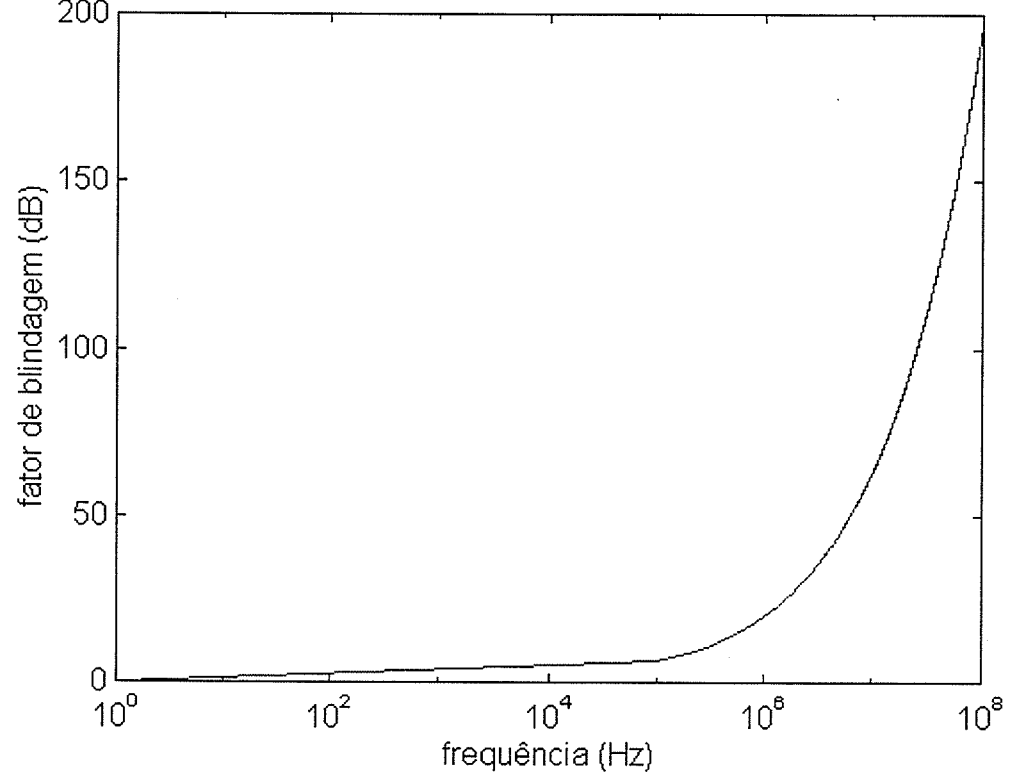


Figura 2.4 - Variação do fator de absorção (em dB) com a frequência do campo.

para a região de campo distante como para a de campo próximo, uma vez que  $S_A$  independe da impedância de onda,  $Z_0$ , fator que varia diferentemente nas duas regiões. A variação do fator de absorção de uma chapa de cobre de 1 mm de espessura em função da frequência é apresentada na figura 2.4.

Pode-se observar que a atenuação devido à absorção aumenta com o aumento da frequência, o que significa que as perdas são maiores para altas frequências. Para a frequência de 60 Hz, a atenuação por absorção é praticamente desprezível.

### 2.3.2 Fator das múltiplas reflexões, $S_{MR}$

O termo  $S_{MR}$  representa a contribuição das múltiplas reflexões que

O fator  $S_{MR}$  é dado por [7]:

$$S_{MR} = 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \approx \frac{2 \cdot t}{\delta}. \quad (2.10)$$

Essa aproximação é válida para baixos valores de  $t/\delta$ , ou seja, quando a atenuação por absorção ( $S_A$ ) também é pequena [7].

Assim como  $S_A$ ,  $S_{MR}$  não depende da natureza da fonte de campo, mas apenas das características da chapa e da frequência do campo. Além disso,  $S_{MR}$  também é o mesmo para as regiões de campo próximo e distante.

Para campos na frequência de 60 Hz,  $S_{MR}$  deve ser calculado, uma vez que a relação  $t/\delta$  é suficientemente pequena para que as múltiplas reflexões sejam significativas, pois a atenuação por absorção é pequena.

### **2.3.3 Fator de reflexões, $S_R$**

O segundo termo das equações (2.3) e (2.4),  $S_R$ , representa a contribuição da atenuação introduzida pelas reflexões do campo ao atravessar as duas fronteiras existentes no problema em questão (figura 2.3). O termo  $S_R$  é calculado a partir da consideração das parcelas do campo que são refletidas nessas duas fronteiras e não contribuem para a amplitude do campo transmitido. Através do método da Linha de Transmissão [7],  $S_R$  pode ser escrito como:

$$S_R = \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M}; \quad (2.11)$$

onde:  $Z_0$  é a impedância de onda do campo;

$Z_M$  é a impedância do metal

$$Z_M = \frac{\sqrt{2}}{\sigma \delta}.$$

Já a impedância de onda  $Z_0$  dependerá do tipo da fonte de campo, uma vez que o seu comportamento na região de campo próximo depende do tipo de fonte. Na região de campo distante, não será necessária nenhuma distinção entre os dois tipos de fonte, uma vez que  $Z_0$  é o mesmo tanto para a fonte de campo elétrico como a de magnético.

Dessa forma, diferentemente dos outros dois fatores ( $S_{MR}$  e  $S_A$ ), o termo representativo das reflexões ( $S_R$ ) dependerá do tipo da fonte de campo. A seguir, são, pois, apresentados os cálculos para  $S_R$  nos casos de fonte elétrica ou magnética, na região de campo próximo.

#### **(a) $S_R$ para fontes elétricas**

Considerando como fonte um pequeno dipolo elétrico, o termo responsável pela atenuação por reflexão, na região de campo próximo, pode ser calculado a partir da seguinte expressão [7] :

$$S_R = \frac{1}{4\sqrt{2}} \frac{\sigma \delta}{\omega \epsilon_0 x}; \quad (2.12)$$

onde:  $x$  é a distância entre a fonte e a blindagem;

$\sigma$  é a condutividade elétrica do metal;

$\delta$  é a profundidade de penetração;

$\omega$  é a frequência angular da fonte;

$\epsilon_0$  é a permissividade do meio.



$$S_R \cdot S_{MR} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sigma t}{\omega \epsilon_0 x}. \quad (2.13)$$

A atenuação devido às reflexões de uma fonte elétrica depende, pois, das características do metal que constitui a blindagem e da frequência do campo a ser atenuado, podendo-se dizer que o fator de atenuação será menor para altas frequências.

**(b)  $S_R$  para fontes magnéticas**

Da mesma forma que para o campo elétrico, pode-se calcular o fator de blindagem de uma fonte magnética (dipolo magnético) na região de campo próximo. Segundo Goedbloed [7], a expressão para o termo representativo da atenuação por reflexão é dado por:

$$S_R = \frac{\omega \mu_0 x \sigma \delta}{4\sqrt{2}}. \quad (2.14)$$

Para pequenos valores de  $t/\delta$ , é necessária novamente a consideração da influência das múltiplas reflexões que, a partir da equação (2.10), resulta em [7]:

$$S_R \cdot S_{MR} = \frac{\omega \mu_0 x \sigma t}{2\sqrt{2}}. \quad (2.15)$$

A atenuação devido às reflexões de um campo magnético depende, pois, das características do metal que constitui a blindagem e da frequência do campo a ser atenuado, podendo-se dizer que o fator de atenuação será maior para altas frequências.

Serão apresentadas a seguir as análises da eficiência de blindagem através do cálculo do fator de blindagem para as fontes elétrica e magnética, enfatizando-se a análise para baixa frequência.

**(a) Fonte de campo elétrico**

A figura 2.5 apresenta os resultados para a formulação desenvolvida para fontes de campo elétrico na região de campo próximo, considerando todas as parcelas constitutivas do fator de blindagem. Foi considerada uma chapa de cobre ( $\sigma = 5,8 \times 10^7$  S/m) de 0,1 mm de espessura, localizada a uma distância de 10 cm da fonte de campo. O meio considerado foi o ar ( $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m e  $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m).

Observando o comportamento das curvas da figura 2.5, algumas importantes conclusões relacionadas à atenuação do campo gerado por uma fonte elétrica (dipolo elétrico) na região de campo próximo podem ser tiradas.

A primeira conclusão refere-se ao fato de que campos elétricos apresentam uma atenuação relativamente elevada em toda faixa de frequência, inclusive para baixas frequências. Isso se deve ao fato de que o fator predominante para o ganho em baixa frequência são as perdas por reflexão, uma vez que a absorção é praticamente nula. Já para frequências mais elevadas, a absorção torna-se mais representativa.

Assim, pode-se dizer que a blindagem de campos elétricos na região de campo próximo é facilmente alcançada, uma vez que o fator de blindagem nessas condições é bastante elevado tanto para altas quanto para baixas frequências. Dessa forma, a utilização de finas camadas de metal pode gerar altos valores de atenuação, mesmo para baixas frequências. Campos elétricos de 60 Hz não constituem, a princípio, um grande problema.

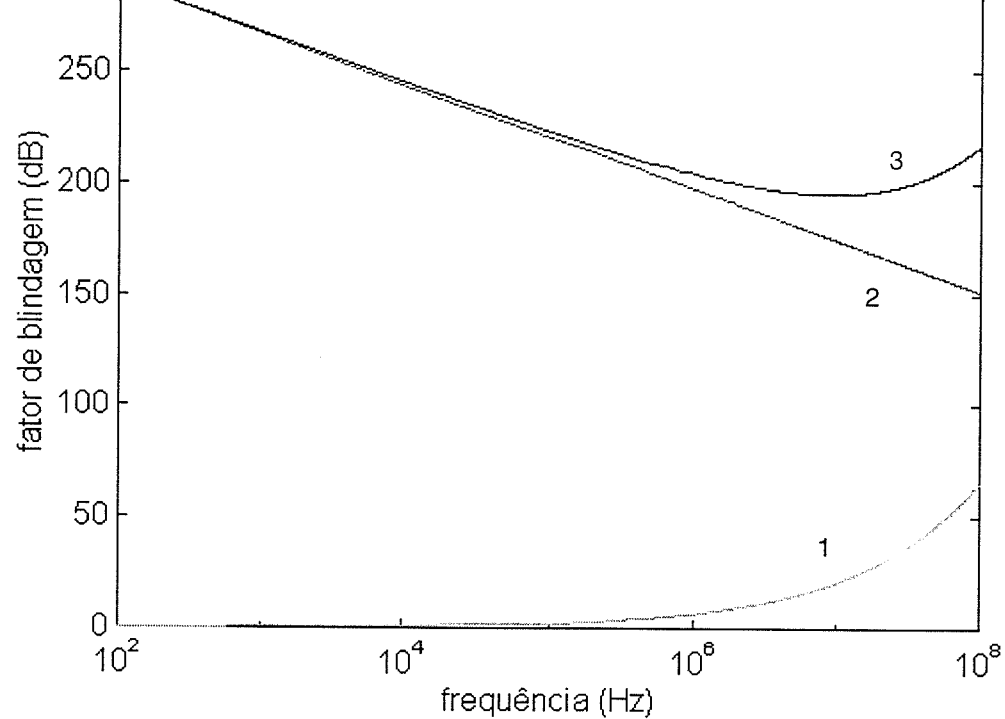


Figura 2.5 - Eficiência de blindagem de fontes elétricas:  
 curva 1: fator de absorção;  
 curva 2: fator de reflexão e múltiplas reflexões;  
 curva 3: fator de blindagem total.

**(b) Fonte de campo magnético**

A partir da formulação desenvolvida, foi feito um estudo para a análise da atenuação de campos magnéticos na região de campo próximo. Foi considerada uma chapa de cobre com as mesmas características da chapa analisada anteriormente ( $\sigma = 5,8 \times 10^7$  S/m,  $t = 0,1$  mm,  $x = 10$  cm). O meio considerado foi o ar ( $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m e  $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m).

Com relação à atenuação de um dipolo magnético, pode-se tirar conclusões relevantes. A primeira refere-se ao fato de que a atenuação aumenta com o aumento da frequência. De fato, a atenuação é dada por

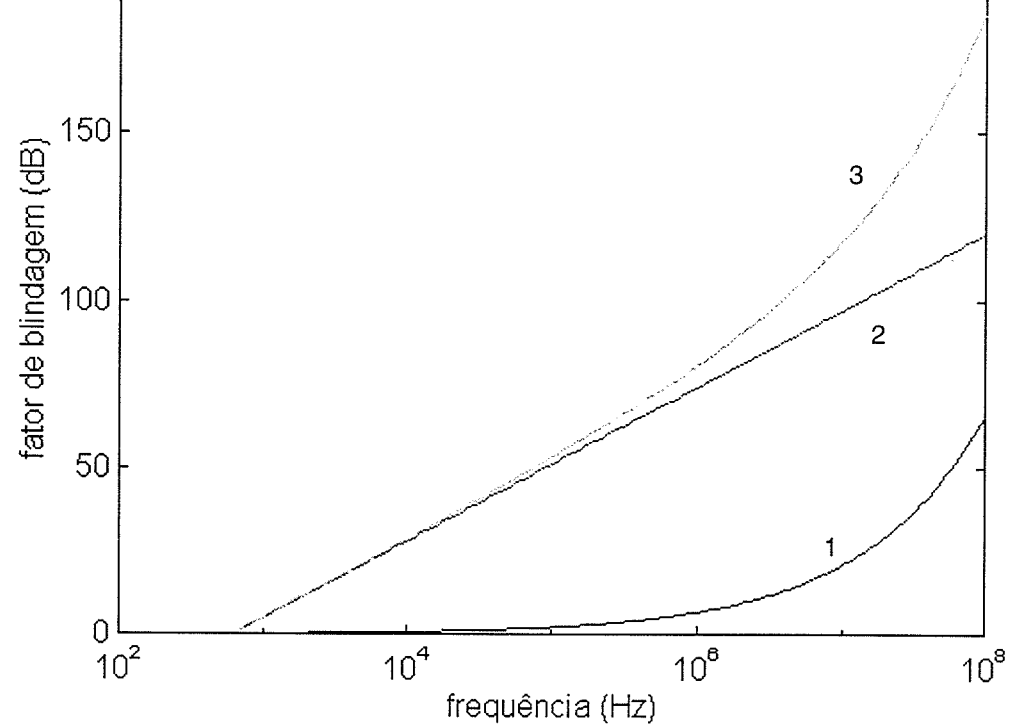


Figura 2.6 - Eficiência de blindagem de fontes magnéticas:  
 curva 1: fator de absorção;  
 curva 2: fator de reflexão e múltiplas reflexões;  
 curva 3: fator de blindagem total.

pode ser observado na figura 2.6. Isso se deve ao fato de que tanto as perdas por reflexão quanto por absorção são muito pequenas para fontes de campo magnético. Mesmo se são utilizadas chapas bastante espessas, o fator de atenuação é muito pequeno.

Como exemplo, considera-se uma situação com campo ambiente de  $6 \mu\text{T}$ . O nível de campo magnético a partir do qual um terminal de vídeo de um microcomputador começa a distorcer sua imagem situa-se em torno de 0,1 a  $0,5 \mu\text{T}$  [9]. Supõe-se escolhida a alternativa de se diminuir o valor de campo com a adoção de uma chapa metálica de alumínio. O interesse aqui é mostrar qual a espessura da chapa que atingiria a atenuação requerida. Para

$$\mu = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m};$$

$$\sigma = 0,56 \times 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}.$$

Supõe-se, ainda, que a chapa esteja localizada a uma distância de 10 cm da fonte, ou seja,  $x = 0,1 \text{ m}$ .

O fator de blindagem pode ser calculado a partir das equações (2.3), (2.7) e (2.15), que resulta em:

$$S_{TOTAL} = e^{\frac{i}{\delta}} \cdot \frac{\omega \mu_o x \sigma t}{2\sqrt{2}}. \quad (2.16)$$

A tabela 2.1 apresenta o fator de blindagem calculado para algumas diferentes espessuras da chapa, juntamente com os valores de campo atingidos com cada uma delas, calculados através das equações (2.1) e (2.16). O fator de blindagem calculado,  $S$ , é adimensional.

Dessa forma, uma chapa de alumínio de aproximadamente 10 mm de espessura poderia vir a oferecer o fator de blindagem necessário para a redução do campo magnético. Entretanto, a utilização de uma chapa de alumínio de 10 mm de espessura seria uma solução cara e praticamente inviável.

Tabela 2.1 – Valores do fator de blindagem para diferentes espessuras de uma chapa de alumínio.

t (mm)	S	B com blindagem ( $\mu\text{T}$ )
2	1,30	4,63
5	4,21	1,42
10	13,08	0,46
15	30,42	0,20

blindagem associadas a essa, uma vez que a blindagem de campos magnéticos de 60 Hz não é facilmente obtida com a simples utilização de uma chapa metálica, mesmo que muito espessa.

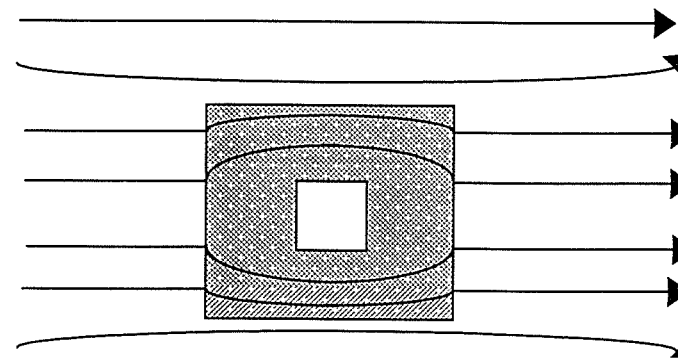
## 2.4 *Blindagem Ferromagnética X Condutiva*

Para fazer a análise do fator de blindagem de um sistema, é necessário o estudo do tipo de material a ser utilizado, uma vez que ele influencia diretamente o cálculo do fator de blindagem.

Uma blindagem metálica pode ser constituída basicamente de dois tipos de material: material com alta permeabilidade e material com alta condutividade elétrica.

No primeiro caso, utilização de um material com alta permeabilidade, o efeito da blindagem é baseado no fato de que o material ferromagnético ( $\mu \gg \mu_0$ ) tem a capacidade de concatenar o fluxo magnético muito mais facilmente que o ar, uma vez que sua permeabilidade é maior. O efeito da utilização de materiais ferromagnéticos é mostrado na figura 2.7.

A atenuação do campo magnético propiciada por uma blindagem metálica é função da permeabilidade do material da blindagem. Assim, pode-se afirmar que quanto maior a permeabilidade do material utilizado, maior o fator de blindagem obtido.



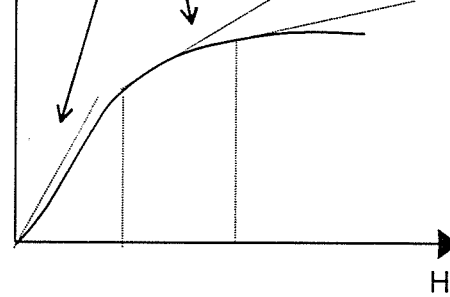


Figura 2.8 - Curva  $B-H$  de um material ferromagnético.

Entretanto, a característica da curva de magnetização do material pode ser um fator limitante para a obtenção de um bom fator de blindagem, uma vez que a permeabilidade,  $\mu_r$ , diminui com o crescimento da intensidade do campo magnético, levando à saturação do material, como pode ser observado na figura 2.8.

Quanto maior a intensidade do campo magnético, menor o valor da permeabilidade do material e, conseqüentemente, menor o fator de blindagem. O ideal seria trabalhar com pequenos valores de campo, pois, assim, o valor da permeabilidade seria elevado, resultando em bons fatores de blindagem.

O comportamento da curva  $B-H$  explica o problema da saturação que muitas vezes ocorre na blindagem de campos magnéticos de baixa freqüência, tornando a blindagem ineficiente. Uma possível solução seria a utilização de outros tipos de material. Geralmente, quando se quer utilizar um material de alta permeabilidade, o aço é escolhido [1].

O segundo tipo de material que pode ser utilizado na blindagem com chapas metálicas são os materiais com alta condutividade elétrica.

A redução da intensidade dos campos magnéticos com a utilização de blindagens condutivas é resultado do campo produzido por correntes parasitas geradas na chapa metálica. O mecanismo de redução do campo pode ser observado na figura 2.9.

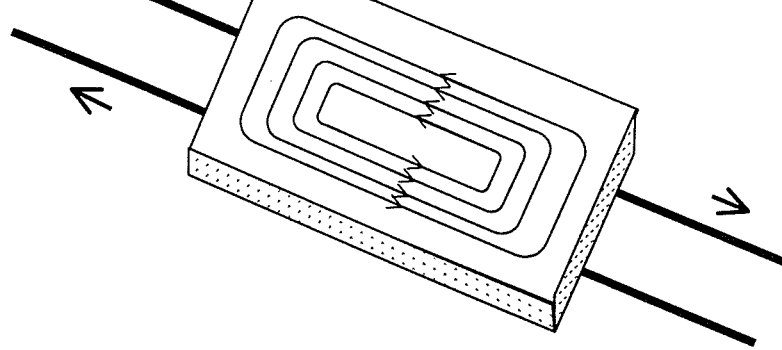


Figura 2.9 - Correntes induzidas no material com alta condutividade.

A fonte de campo magnético induz correntes parasitas na chapa metálica, de acordo com a lei de indução de Faraday [10]. Na chapa, as correntes circulam de forma a minimizar a influência do campo magnético externo. Dessa forma, as correntes parasitas criam um campo magnético oposto ao campo original, levando à redução do campo total resultante.

Neste caso, a eficiência da blindagem está intimamente ligada à condutividade elétrica do material, uma vez que quanto maior a condutividade, maior será a intensidade das correntes induzidas e, conseqüentemente, maior a redução do campo. A espessura da chapa também é relevante, já que quanto maior a espessura, menor será a resistência da chapa e maior o valor das correntes.

Geralmente, os materiais com alta condutividade elétrica utilizados são o cobre e o alumínio [3]. Apesar do cobre possuir uma condutividade mais elevada, muitas vezes o alumínio é escolhido em função de seu menor custo e facilidade de instalação (é um material mais leve).

A utilização de blindagens de alumínio tem levado a bons resultados na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência, tanto em trabalhos experimentais [3] quanto teóricos [10].



Serão apresentadas, a seguir, algumas alternativas para a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência: utilização de chapas metálicas, alteração da geometria do sistema e a blindagem ativa.

### ***2.5.1 Utilização de chapas metálicas***

Ao estudar a possibilidade da utilização de placas metálicas para a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência, duas alternativas podem ser assumidas: a blindagem da fonte de campo e a blindagem do receptor.

A blindagem da fonte de campo apresenta a vantagem de, uma vez atingida, o ambiente se torna eletromagneticamente controlado, o que significa que qualquer outro equipamento a ser inserido naquele ambiente poderá operar dentro dos limites impostos pela blindagem.

Isso não ocorre com a adoção da blindagem do equipamento, uma vez que qualquer outro equipamento naquele ambiente sofrerá a influência do campo emitido pela fonte não controlada.

Entretanto, mesmo com essa desvantagem, algumas empresas têm optado pela blindagem do receptor. Geralmente, os monitores dos microcomputadores, maiores vítimas de interferência de campo magnético de baixa frequência, são envolvidos por uma blindagem, de tal forma que a distorção da imagem torna-se menor. Essa técnica pode ser observada na figura 2.10. Entretanto, ela não é considerada uma boa solução, pelo menos do ponto de vista estético. Além disso, o problema não é eliminado em sua origem, podendo ocorrer interferência em outros receptores.

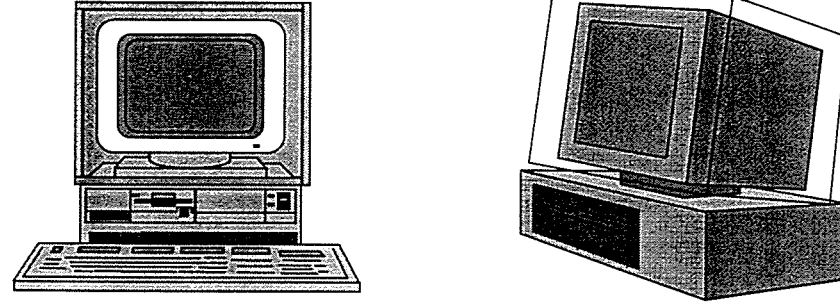


Figura 2.10 - Blindagem do vídeo de um microcomputador.

A blindagem de campos magnéticos de baixa frequência por metais não-ferrosos é estudada por [10], através do desenvolvimento de um programa computacional. O fator de blindagem é calculado pela determinação das correntes induzidas na chapa metálica. Os resultados são comparados com medições e mostram que blindagens não-ferrosas podem propiciar uma redução da ordem de 80% nos valores do campo magnético de baixa frequência. Bons resultados são atingidos com o alumínio [1].

Alguns aspectos da utilização da blindagem metálica devem ser considerados, tais como a forma e dimensões físicas da blindagem e a distância entre a fonte e o receptor. Alguns resultados mostram que quanto maior a dimensão da chapa em relação à fonte, mais eficiente será a blindagem e que diferenças significativas são obtidas se a mesma é colocada mais próxima da fonte ou do receptor [4]. A forma da blindagem metálica também é primordial para sua boa eficiência. Geralmente, são utilizadas chapas planas, construções em "U" ou caixas fechadas que envolvem totalmente a fonte de campo [1].

Foram apresentadas, anteriormente, as dificuldades e problemas existentes na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência com a utilização de uma chapa metálica. O fator de blindagem para campos magnéticos de baixas frequências é relativamente baixo, uma vez que tanto a absorção quanto as reflexões são pequenas. Assim, a blindagem é

apresentadas, pois, outras técnicas que podem ser utilizadas e trabalhos que vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de se atingir um fator de blindagem satisfatório para a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

### ***2.5.2 Alteração da configuração do sistema***

A alteração da configuração do sistema é uma outra alternativa para a redução dos campos magnéticos e consiste basicamente na alteração da geometria dos cabos, da seqüência de fases, variação do número de condutores por fase e transposição das fases do sistema. Se adotadas na etapa de projeto, essas alternativas são consideradas muito econômicas, uma vez que podem ser atingidas sem qualquer custo adicional [12]. Já as modificações de instalações em operação são geralmente trabalhosas, problemáticas e dispendiosas [13].

Resultados de trabalhos computacionais para o cálculo de campos magnéticos mostram que níveis razoáveis de campo podem ser atingidos com a alteração da configuração do sistema [1].

Trabalhos objetivando a redução de campos magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão são encontrados na literatura. Seus resultados mostram que a simples alteração da geometria [14] ou a variação da seqüência de fases [15] pode reduzir os campos em até 30%. No entanto, todos esses trabalhos consideram um sistema trifásico idealmente equilibrado, não se podendo afirmar que os resultados possam ser estendidos a sistemas desequilibrados.

A consideração de um sistema desequilibrado é feita por [12]. Os resultados mostram que a otimização das relações de fase reduz efetivamente o campo magnético para o caso específico de um sistema de cabos multiaterrados. Entretanto, essa redução é muito mais significativa

cabos e da disposição das fases no valor do campo magnético resultante [1, 4]. Quanto mais próximos estiverem os barramentos, menor será o valor do campo magnético resultante. Além da aproximação dos cabos, pode-se, ainda, envolvê-los com um eletroduto de metal, o que melhoraria ainda mais a eficiência da blindagem. Essas alternativas podem ser observadas na figura 2.11.

O valor do campo magnético resultante diminui à medida em que os barramentos se tornam mais próximos. Dessa forma, a alternativa que apresentará menor valor de campo será aquela mostrada na figura 2.11(d). As reduções com essas alternativas chegam a aproximadamente 70% [1].

Outra possibilidade é a utilização de mais de um condutor por fase do sistema. Neste caso, pode-se fazer uma variação da disposição dos condutores a fim de se obter o melhor resultado. Geralmente, quando se utiliza uma disposição onde os cabos opostos são da mesma fase conforme figura 2.12, a redução é bastante acentuada, chegando a aproximadamente 80% [1, 4]. Vale ressaltar que esses níveis de redução foram obtidos para sistemas equilibrados.

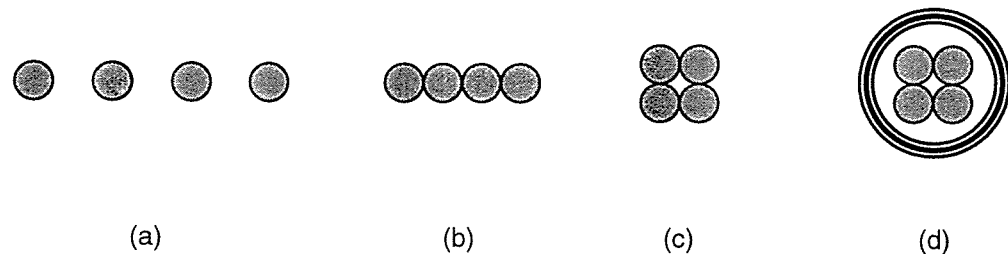


Figura 2.11 – Variação da configuração dos cabos.

Figura 2.12 – Variação da seqüência de fases.

Quando possível, a transposição das fases é uma alternativa que pode levar a boas reduções dos níveis de campo. Dependendo do comprimento da barra transposta e da distância transposta, o campo magnético pode ser reduzido de até 30% [4].

A alteração da configuração do sistema é uma das alternativas para redução de campos magnéticos de 60 Hz. Dependendo do caso estudado, bons resultados podem ser atingidos com a utilização de uma das opções apresentadas, sendo que a utilização de um conjunto delas torna-se ainda mais eficiente. Entretanto, deve-se observar o desequilíbrio do sistema, uma vez que ele afeta diretamente os níveis de campo magnético. Soluções para sistemas equilibrados podem não ser válidas para sistemas desequilibrados.

### **2.5.3 Blindagem ativa**

Todas as técnicas de blindagem abordadas até aqui (utilização de chapas metálicas, alteração da geometria do sistema, alternância de fases, etc.) são consideradas blindagens passivas.

A blindagem ativa, ou compensação ativa, é uma outra alternativa para a redução dos níveis de campo magnético de baixa freqüência. O seu funcionamento consiste, basicamente, na criação de um campo magnético idealmente igual e oposto ao campo indesejado. Para esse fim, podem ser utilizadas bobinas de Helmholtz associadas a sensores de campo e a um amplificador [7].

A blindagem ativa é utilizada, geralmente, em conjunto com outras técnicas, uma vez que ela sozinha pode não ser suficiente para a requerida

elétricos. Os resultados obtidos atingem reduções de até 80%, dependendo do ponto de medição.

# 3 Desenvolvimento da Formulação Matemática

## 3.1 Introdução

Como já colocado anteriormente, este trabalho baseia-se na consideração de um sistema trifásico de dimensões finitas, a partir do qual serão feitos estudos para redução da densidade de fluxo magnético em suas proximidades.

Apesar deste trabalho ser basicamente experimental, torna-se interessante um estudo preliminar para a análise da influência da configuração e dimensões do sistema a ser implementado no valor do campo resultante. Tal análise pode ser feita a partir do cálculo do valor da densidade de fluxo magnético criada pela configuração proposta.

Dessa forma, neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento da formulação matemática necessária para o cálculo da densidade de fluxo magnético, a partir do potencial vetor,  $A$ .

Em seguida, o efeito do solo é levado em consideração a partir do

fluxo magnético resultante.

### 3.2 Dedução da Formulação Matemática

A configuração preliminar proposta neste trabalho consiste de um sistema trifásico de condutores de *comprimento finito*, conforme apresentado na figura 3.1.

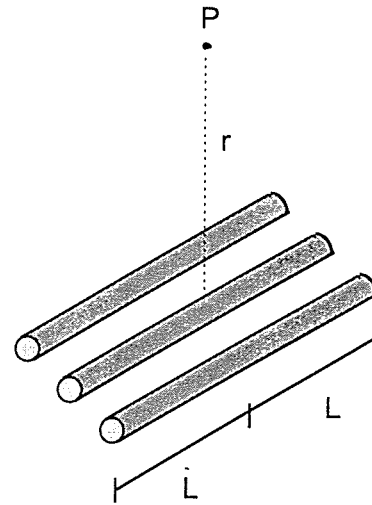


Figura 3.1 - Configuração preliminar do sistema.

Para sistemas de *comprimento infinito*, a densidade de fluxo magnético gerada em um ponto genérico pode ser calculada a partir das seguintes equações [1]:

- condutor único:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r};$$



$$B = \frac{\mu s I}{2\pi r^2};$$

- sistema trifásico com três condutores dispostos em triângulo:

$$B = \frac{\sqrt{6} \mu s I}{4\pi r^2};$$

onde:

$r$  é a distância em relação ao centro do sistema;

$B$  é o módulo da densidade de fluxo magnético a uma distância  $r$ ;

$\mu$  é a permeabilidade magnética do meio;

$I$  é a corrente de carga (por fase);

$s$  é a distância entre fases.

Vale ressaltar que as equações para sistemas trifásicos apresentadas aplicam-se quando  $r \gg s$ , as correntes de fase são simétricas nas três fases e o espaçamento entre fases é sempre o mesmo. Além disso, os condutores são admitidos com comprimento infinito.

Dessa forma, para o desenvolvimento deste trabalho, as equações acima colocadas mostram-se ineficientes, uma vez que o sistema a ser implementado é de dimensões finitas e que o espaçamento entre fases não é necessariamente o mesmo. Além disso, torna-se impossível a consideração de um sistema desequilibrado, já que, na formulação apresentada, o valor da corrente é admitido o mesmo para as três fases.

Torna-se necessária, então, a consideração de um sistema de condutores mais genérico, onde sejam possíveis a variação da geometria do sistema, a existência de um desequilíbrio de corrente e a presença do condutor neutro, ressaltando-se a necessidade da consideração de um

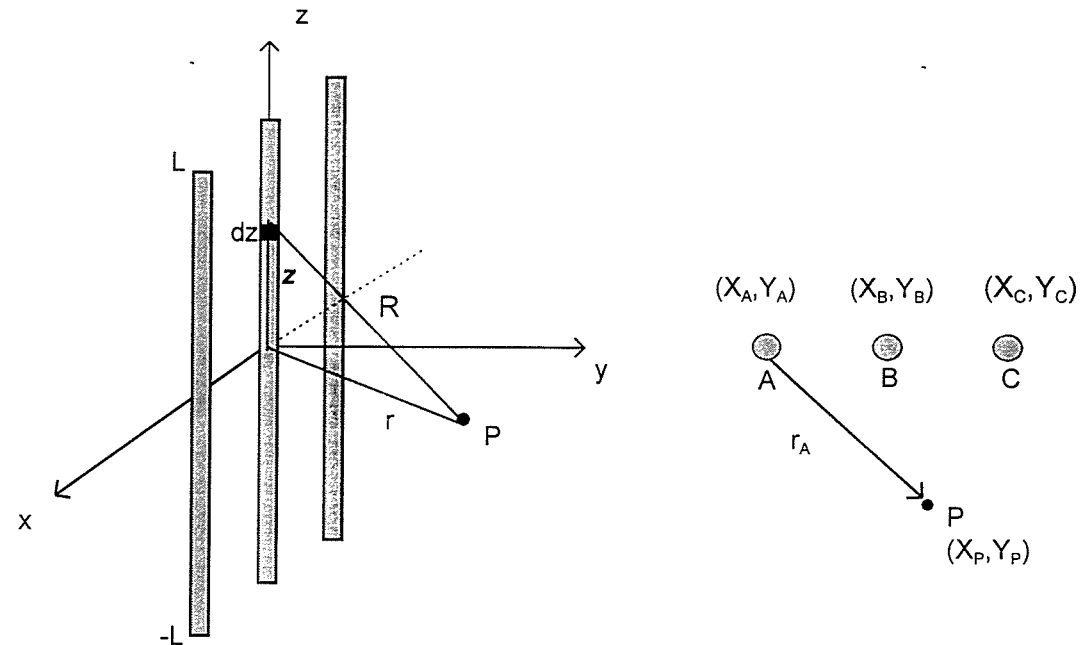
da utilização do potencial vetor,  $\mathbf{A}$ . Uma vez determinada a densidade de fluxo magnético,  $\mathbf{B}$ , o campo magnético,  $\mathbf{H}$ , pode ser facilmente obtido pela equação (3.1):

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (3.1)$$

A seguir, será apresentada a dedução analítica para um sistema genérico de condutores.

### 3.2.1 Sistema genérico de condutores, cálculo em $z=0$

O sistema genérico considerado é composto por três condutores de comprimento  $2L$  cada um, paralelos ao eixo  $z$  do espaço, atravessados em sua metade pelo plano  $z=0$ , conforme apresentado na figura 3.2.



distintos A, B e C. Para o cálculo do campo magnético, será considerado, inicialmente, um ponto genérico  $P$ , cujas coordenadas são  $(X_p, Y_p)$ , localizado no plano  $z=0$ , ou seja, em um plano que corta os condutores na metade de seus comprimentos. O comprimento de cada um dos condutores será considerado igual a  $2L$  para simplificação do cálculo. A representação da configuração básica proposta e o perfil da mesma são apresentados na figura 3.2.

Na obtenção de uma formulação para o cálculo de  $\mathbf{B}$ , é interessante fazer uso da ferramenta matemática do potencial vetor,  $\mathbf{A}$ , cuja utilização apresenta a vantagem de  $\mathbf{A}$  ter a mesma direção e sentido do vetor densidade de corrente,  $\mathbf{J}$ , que o originou, facilitando a solução analítica do problema. O potencial vetor pode ser representado por:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{J}}{r} dV \quad \text{ou} \quad \vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{I}{r} d\ell_L \hat{a}_z; \quad (3.2)$$

onde:  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio;

$r$  é a distância do ponto  $P$  ao elemento de volume  $dV$ ;

$dV$  é o elemento de volume;

$\mathbf{J}$  é a densidade de corrente no volume  $V$ ;

$I$  é a corrente ao longo do comprimento  $L$ .

Uma vez obtido o potencial vetor, o cálculo de  $\mathbf{B}$  é feito a partir da relação:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}. \quad (3.3)$$

contribuição dos outros condutores.

**(a)  $B$  gerado por um único condutor**

No caso em estudo, o caminho de integração tomado é ao longo do comprimento do condutor, ou seja, na direção  $\mathbf{a}_z$ . Tomando-se especificamente o condutor A, o potencial vetor torna-se:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{I_A}{R} dz \hat{a}_z; \quad (3.4)$$

onde  $R$  representa a distância do ponto  $P$  ao elemento  $dz$ , mostrado na figura 3.2 (a).

Assim,

$$R = \sqrt{z^2 + r_A^2}; \quad (3.5)$$

$$\text{onde:} \quad r_A = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}. \quad (3.6)$$

Observa-se, na equação (3.4), que  $\mathbf{A}$  possui componente apenas na direção  $\mathbf{a}_z$ , uma vez que a corrente  $I_A$  está também nessa direção.

Considerando que a corrente  $I_A$  é constante no espaço, na direção  $\mathbf{a}_z$ , pode-se tirá-la da integral, o que resulta em:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} I_A \int_{-L}^L \frac{dz}{R} \hat{a}_z$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} I_A \int_{-L}^L \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r_A^2}} \hat{a}_z. \quad (3.7)$$

Resolvendo-se a integral:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \frac{\mu}{4\pi} I_A \int_{-L}^L \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r_A^2}} \hat{a}_z = \frac{\mu}{4\pi} I_A \cdot 2 \int_0^L \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r_A^2}} \hat{a}_z \\ \vec{A} &= \frac{\mu}{2\pi} I_A \left[ \ln\left(z + \sqrt{z^2 + r_A^2}\right) \right]_0^L \hat{a}_z \\ \vec{A} &= \frac{\mu}{2\pi} I_A \left[ \ln\left(L + \sqrt{L^2 + r_A^2}\right) - \ln r_A \right] \hat{a}_z. \end{aligned} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) representa a formulação para o cálculo do potencial vetor  $\mathbf{A}$ . Para a obtenção de  $\mathbf{B}$ , basta a aplicação do rotacional em (3.8), conforme equação (3.3). Em coordenadas cartesianas, tem-se que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \hat{a}_x + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \hat{a}_y + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \hat{a}_z \quad (3.9)$$

Como só existe componente de  $\mathbf{A}$  na direção  $\mathbf{a}_z$ :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \hat{a}_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} \hat{a}_y. \quad (3.10)$$

Dessa forma, o vetor  $\mathbf{B}$  apresentará componentes nas direções  $x$  e  $y$ , o que resulta em:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad \text{e} \quad B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x}, \quad (3.12)$$

então,

$$B_x = \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu}{2\pi} I_A \left[ \ln(L + \sqrt{L^2 + r_A^2}) - \ln r_A \right] \right]. \quad (3.13)$$

Resolvendo a derivada parcial da equação (3.13) resulta em:

$$B_x = \frac{\mu I_A}{2\pi} (y_P - y_A) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_A^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_A^2})} - \frac{1}{r_A^2} \right]; \quad (3.14)$$

onde:  $r_A^2 = (x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2$ .

Ou seja; para um ponto de medição genérico de coordenadas  $(X_P, Y_P)$ , a componente da densidade de fluxo magnético na direção  $x$ ,  $B_x$ , criada por um condutor fixado em  $(X_A, Y_A)$ , paralelo ao eixo  $z$ , é dado pela expressão (3.14).

A componente da densidade de fluxo magnético na direção  $y$ ,  $B_y$ , pode ser obtida da mesma forma que  $B_x$ . Resolvendo a equação (3.12) para  $y$ , resulta em:

$$B_y = \frac{\mu I_A}{2\pi} (x_P - x_A) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_A^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_A^2})} - \frac{1}{r_A^2} \right]. \quad (3.15)$$

parcela de campo na direção  $z$ , o módulo de  $\mathbf{B}$  será obtido por:

$$B_{TOTAL} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} . \quad (3.16)$$

Uma vez calculado o valor da densidade de fluxo magnético devido a apenas um condutor, a consideração das parcelas de campo devido aos outros condutores deve ser feita. Como a dedução aqui apresentada foi feita de forma genérica, basta utilizar-se da formulação desenvolvida para o cálculo da parcela de campo de cada condutor presente no sistema. É importante lembrar, no entanto, que as defasagens entre as correntes devem ser consideradas no cálculo.

#### **(b) $B$ gerado por um sistema trifásico**

No caso de um sistema trifásico, que é o objetivo deste trabalho, o campo resultante será obtido a partir da soma de cada uma das parcelas das três fases, considerando-se a defasagem entre as correntes das fases. Dessa forma, as parcelas resultantes nas direções  $x$  e  $y$  serão:

$$B_{x_{TOTAL}} = B_{x_A} + B_{x_B} + B_{x_C} ; \quad (3.17)$$

$$B_{y_{TOTAL}} = B_{y_A} + B_{y_B} + B_{y_C} ;$$

onde:  $B_{x_A}$ ,  $B_{x_B}$  e  $B_{x_C}$  são as parcelas de  $\mathbf{B}$  na direção  $x$  devido, respectivamente, aos condutores A, B e C;

$B_{y_A}$ ,  $B_{y_B}$  e  $B_{y_C}$  são as parcelas de  $\mathbf{B}$  na direção  $y$  devido, respectivamente, aos condutores A, B e C.

$$\begin{aligned}
B_{xTOTAL} = & \frac{\mu I_A}{2\pi} (y_P - y_A) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_A^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_A^2})} - \frac{1}{r_A^2} \right] + \\
& + \frac{\mu I_B}{2\pi} (y_P - y_B) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_B^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_B^2})} - \frac{1}{r_B^2} \right] + \\
& + \frac{\mu I_C}{2\pi} (y_P - y_C) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_C^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_C^2})} - \frac{1}{r_C^2} \right]
\end{aligned} \tag{3.18}$$

e

$$\begin{aligned}
B_{yTOTAL} = & \frac{\mu I_A}{2\pi} (x_P - x_A) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_A^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_A^2})} - \frac{1}{r_A^2} \right] + \\
& + \frac{\mu I_B}{2\pi} (x_P - x_B) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_B^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_B^2})} - \frac{1}{r_B^2} \right] + \\
& + \frac{\mu I_C}{2\pi} (x_P - x_C) \left[ \frac{1}{(L + \sqrt{L^2 + r_C^2})} \cdot \frac{1}{(\sqrt{L^2 + r_C^2})} - \frac{1}{r_C^2} \right]
\end{aligned} \tag{3.19}$$

É importante lembrar que as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  presentes nas equações (3.18) e (3.19) estão defasadas de  $120^\circ$ , fator que deve ser levado em consideração no cálculo da densidade de fluxo magnético resultante do sistema.

Uma vez calculadas as parcelas totais nas direções  $x$  e  $y$ , a obtenção do módulo de  $\mathbf{B}$  resultante é feita facilmente com a aplicação da equação (3.16).

### 3.2.2 Sistema genérico de condutores, cálculo em $z \neq 0$

Embora não seja o principal objetivo deste trabalho, a obtenção do  $\mathbf{B}$



até aqui desenvolvida, tornando possível o cálculo para essa situação.

A partir da figura 3.3, o potencial vetor torna-se:

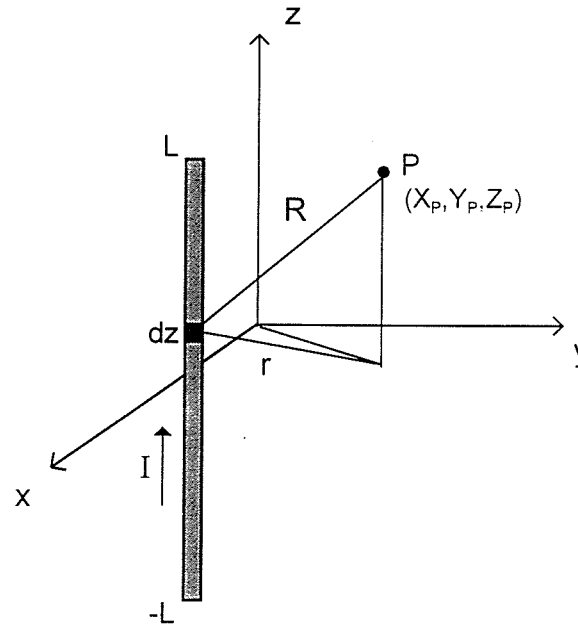
$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} I \int_{-L}^L \frac{dz}{R} \hat{a}_z;$$

onde, neste caso:

$$R = \sqrt{(z_p - z)^2 + r_A^2} \quad \text{e} \quad r_A^2 = (x_p - x_A)^2 + (y_p - y_A)^2.$$

Resolvendo-se a integral, resulta em:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} I_A \left\{ \ln \left[ (L - z_p) + \sqrt{(L - z_p)^2 + r_A^2} \right] - \ln \left[ (-L - z_p) + \sqrt{(-L - z_p)^2 + r_A^2} \right] \right\} \hat{a}_z.$$



$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y},$$

o que leva a:

$$B_x = \frac{\mu I_A}{4\pi} (y_p - y_A) \left[ \frac{1}{\left( (L - z_p) + \sqrt{(L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{(L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} - \frac{1}{\left( (-L - z_p) + \sqrt{(-L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{(-L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \right] \quad (3.21)$$

Analogamente, a componente em  $y$  será:

$$B_y = \frac{\mu I_A}{4\pi} (x_p - x_A) \left[ \frac{1}{\left( (L - z_p) + \sqrt{(L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{(L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} - \frac{1}{\left( (-L - z_p) + \sqrt{(-L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{(-L - z_p)^2 + r_A^2} \right)} \right] \quad (3.22)$$

Neste caso, também não haverá componente de  $\mathbf{B}$  na direção  $z$ .

Dessa forma, a partir das equações (3.21) e (3.22), um ponto ao longo do eixo  $z$ , não pertencente ao plano  $z=0$ , pode ser calculado.

Para o caso de mais de um condutor, as mesmas considerações anteriores são válidas, ou seja, a densidade de fluxo magnético resultante será obtida a partir da soma das parcelas de uma mesma direção e da aplicação do resultado na equação (3.16).

É importante ressaltar que, no caso de sistemas trifásicos desequilibrados com a presença do condutor neutro, é fundamental a consideração da contribuição da parcela de campo gerada por ele, uma vez que ela contribuirá para o valor do campo resultante.

Como a formulação desenvolvida até aqui é genérica, a consideração da parcela do condutor neutro será feita como nos condutores fase, utilizando-se as características dos condutores neutro e o valor de corrente que nele circula. Neste caso, a corrente do neutro será obtida como o resultado da soma das correntes das fases do sistema, ou seja,

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C;$$

onde cada uma das parcelas representam os fasores de corrente das fases.

Dessa forma, o cálculo das parcelas  $B_x$  e  $B_y$  deverá incluir a contribuição dos condutores neutros presentes no sistema.

### **3.2.4 Implementação da formulação**

A partir da formulação desenvolvida, foi possível a sua implementação para o cálculo da densidade de fluxo magnético para sistemas genéricos. O programa foi desenvolvido no software *MatLab*<sup>®</sup>, versão 4.2, e fornece algumas opções de cálculo de  $\mathbf{B}$  para configurações genéricas de condutores, tais como: sistema monofásico ou trifásico, variação do número de condutores por fase, presença ou não do condutor neutro, plotagem dos perfis de campo ao longo de uma dada direção, dentre outras opções. Além disso, valores diferentes de corrente podem ser assumidos para cada fase, representando-se sistemas desequilibrados.

densidade de campo magnético.

### 3.3 *Consideração do Efeito do Solo*

A montagem experimental foi construída no LEAT (Laboratório de Extra-Alta Tensão) da UFMG a uma altura de poucos centímetros do solo. Dessa forma, a influência do solo no valor da densidade de fluxo magnético deve ser investigada com o objetivo de se caracterizar da forma mais fiel possível o fenômeno em estudo. A consideração do solo pode ser feita através da aplicação do Método das Imagens [17].

A aplicação do Método das Imagens, no caso de um solo ideal, consiste na consideração de um condutor de mesmas dimensões e localizado à mesma distância do solo do condutor real, sendo que a imagem é percorrida por uma corrente de mesma intensidade e sentido contrário à corrente real. As características da aplicação do método das imagens, para um solo ideal, considerando-se um único condutor, podem ser observadas na figura 3.4.

O cálculo do valor resultante de  $\mathbf{B}$  é feito a partir da soma das duas contribuições de campo: a primeira gerada pela corrente do condutor real e a outra gerada pela imagem da corrente. As duas parcelas são representadas, na figura, pelos respectivos potenciais vetor  $\mathbf{A}_c$  e  $\mathbf{A}_j$ .

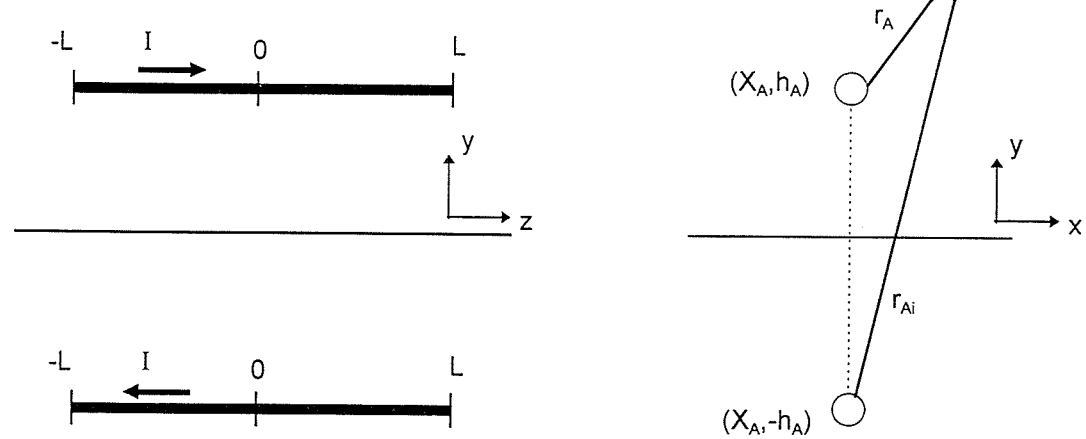


Figura 3.4 - Representação do condutor imagem - solo ideal.

No caso da consideração de um solo real, é feita a utilização do conceito de profundidade complexa [16] para quantificar o efeito do solo. Neste caso, a localização da imagem já não é simétrica em relação ao solo. Faz-se necessário, então, o uso da imagem complexa, através do conceito de profundidade complexa, a qual é definida pela relação:

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}} \Rightarrow p = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}}; \quad (3.23)$$

onde:  $p$  é a profundidade complexa;

$\omega$  é a velocidade angular,  $\omega = 2\pi f$ ;

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do meio (no caso, o ar);

$\sigma$  é a condutividade elétrica do solo;

$\rho$  é a resistividade do solo.

Neste caso, considera-se a “existência” de um plano complexo, a partir do qual o condutor e sua imagem complexa estão dispostos simetricamente.

A figura 3.5 ilustra o sistema de um condutor com sua imagem complexa.

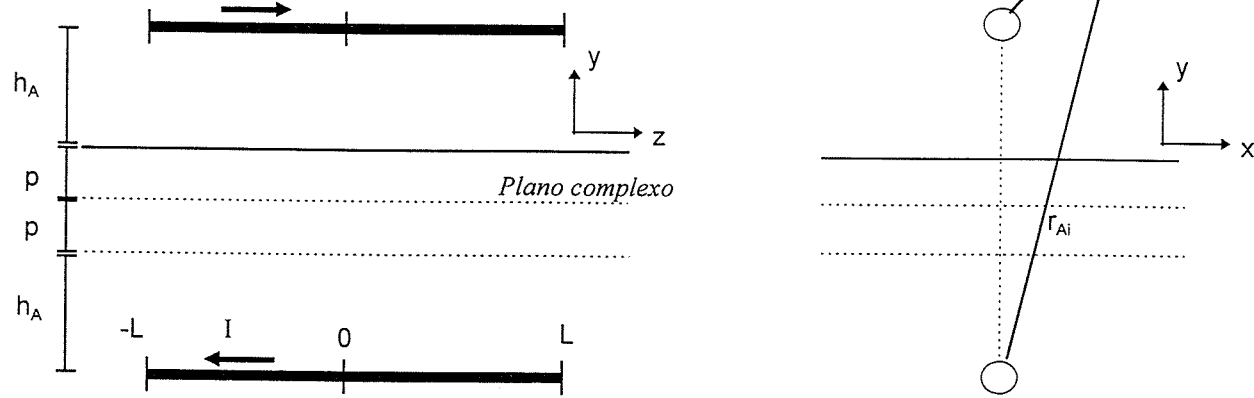


Figura 3.5 - Representação da imagem complexa - solo real.

O cálculo da densidade de campo magnético com a consideração do efeito do solo é feito similarmente à dedução anterior.

Para a parcela de  $\mathbf{B}$  devido ao condutor real, tendo por base a figura 3.5 e considerando as equações deduzidas anteriormente, tem-se que:

$$B_x = \frac{\mu I_A}{2\pi} (h_p - h_A) \left[ \frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} - \frac{1}{r_A^2} \right] \quad (3.24)$$

e

$$B_y = \frac{\mu I_A}{2\pi} (x_p - x_A) \left[ \frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} - \frac{1}{r_A^2} \right]; \quad (3.25)$$

onde, agora,  $r_A^2 = (x_p - x_A)^2 + (h_p - h_A)^2$ . (3.26)

Já para o condutor imagem, a distância  $r_A$  da equação (3.26) será

Dessa forma, as contribuições nas direções  $x$  e  $y$  serão:

$$B_x = \frac{\mu I_A}{2\pi} (h_p + h_{,i} + 2p) \left[ \frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_{,i}^2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{L^2 + r_{,i}^2}\right)} - \frac{1}{r_{,i}^2} \right] \quad (3.28)$$

e

$$B_y = \frac{\mu I_A}{2\pi} (x_p - x_{,i}) \left[ \frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_{,i}^2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{L^2 + r_{,i}^2}\right)} - \frac{1}{r_{,i}^2} \right]. \quad (3.29)$$

Para o cálculo do campo resultante, deve-se somar as parcelas do condutor real e de sua imagem em cada direção e aplicar a equação (3.16).

No caso de vários condutores no sistema, deve-se calcular o campo gerado por cada um deles e suas respectivas imagens.

Vale ressaltar aqui a importância do estudo da influência da resistividade do solo no valor do campo magnético resultante, uma vez que o sistema em estudo poderá ser influenciado pela presença e proximidade do solo. Com esse intuito, será apresentada uma configuração básica a partir da qual são feitas variações da resistividade e sua influência no valor do campo é analisada.

### **3.3.1 Análise do efeito do solo no cálculo de $B$**

A partir da definição de uma configuração para um sistema trifásico tomado como referência, foram traçados perfis da densidade de fluxo magnético para diferentes valores de resistividade do solo. O estudo foi

cada um.

Os perfis de  $B$ , na direção  $x$ , para diferentes resistividades do solo, a 30 cm do mesmo, são apresentados na figura 3.7.

As curvas obtidas mostram que há uma diferença significativa apenas entre os valores de campo para o solo de resistividade nula e os demais. A semelhança entre as curvas de resistividade  $0,01 \Omega.m$ ,  $1 \Omega.m$  e  $1000 \Omega.m$  é tão grande que nenhuma diferença pode ser notada entre as curvas apresentadas. Foi traçado, ainda, o perfil de campo para as mesmas condições com a desconsideração do solo. Essa curva também coincide com aquelas de solos de resistividade não nula, como pode ser observado na figura 3.7.

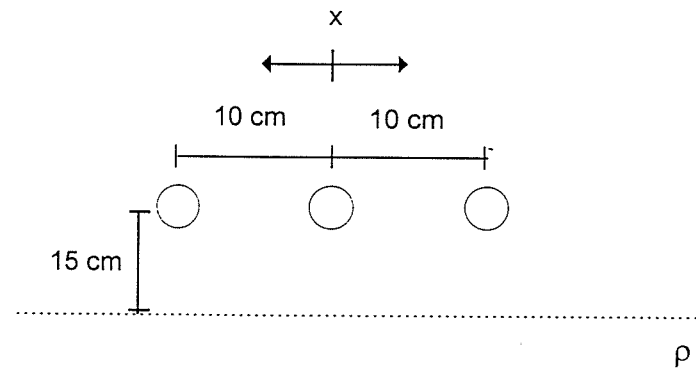


Figura 3.6 - Configuração proposta para o estudo da variação da densidade de fluxo magnético com a resistividade do solo.



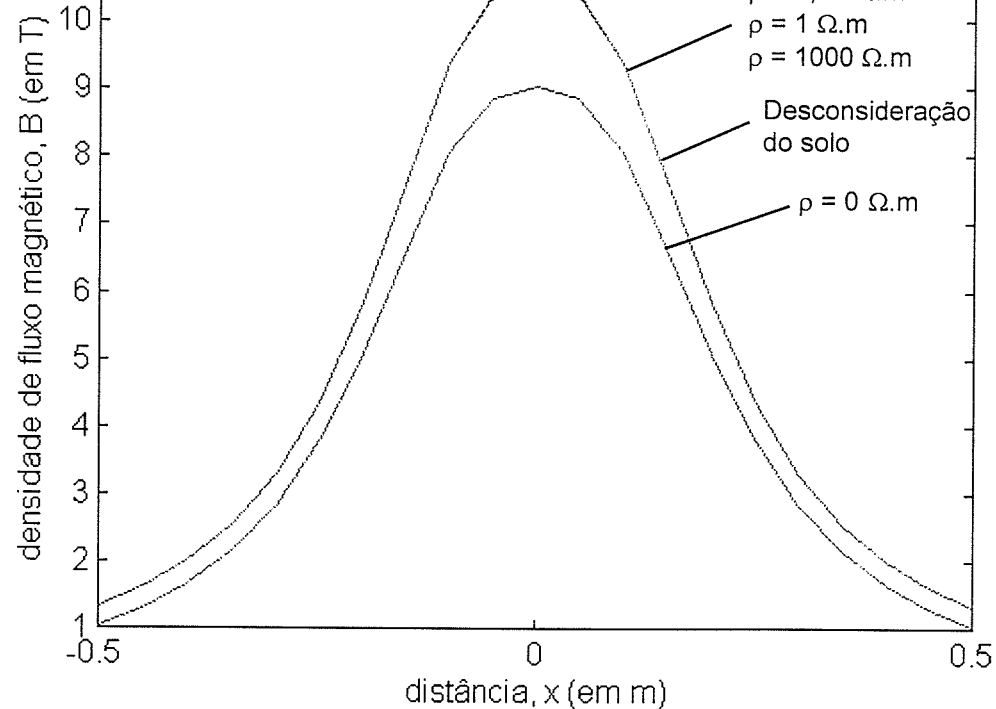


Figura 3.7 - Perfis de campo com a variação da resistividade do solo.

Dessa forma, para o caso de resistividades não nulas, o efeito do solo pode ser desconsiderado, ou seja, o comportamento do campo é como se o sistema de condutores estivesse imerso no meio (no caso, o ar), bem distante do solo. As contribuições de campo provenientes das imagens podem, portanto, ser desprezadas e apenas as contribuições dos condutores reais podem ser consideradas.

Como o solo do LEAT (Laboratório de Extra-Alta Tensão) certamente apresenta uma resistividade não nula, uma vez que sob o piso há uma camada de concreto, a contribuição das imagens também poderá ser desprezada no estudo experimental. Dessa forma, toda a estimativa anterior para cálculo do valor de  $B$  sem a consideração do solo pode ser feita.

Nesta seção são apresentados alguns estudos da variação da geometria e configuração de um sistema trifásico, com o intuito de se avaliar a influência desses fatores no valor resultante da densidade de fluxo magnético.

O estudo é dividido em duas partes: sistemas equilibrados e sistemas desequilibrados. Em ambos os casos, o cálculo foi feito a partir do centro de simetria dos condutores.

#### **3.4.1 Sistemas equilibrados**

O sistema trifásico considerado para simulação possui condutores dispostos paralelamente entre si de 8 m de comprimento cada um. A corrente eficaz injetada por fase é de 100 A e o diâmetro dos condutores foi considerado igual a 1 cm. Foram feitas variações da geometria, disposição dos condutores e número de condutores por fase. A direção de cálculo foi tomada a partir do centro de cada sistema.

Os casos simulados e os resultados obtidos são mostrados na figura 3.8 e na tabela 3.1.

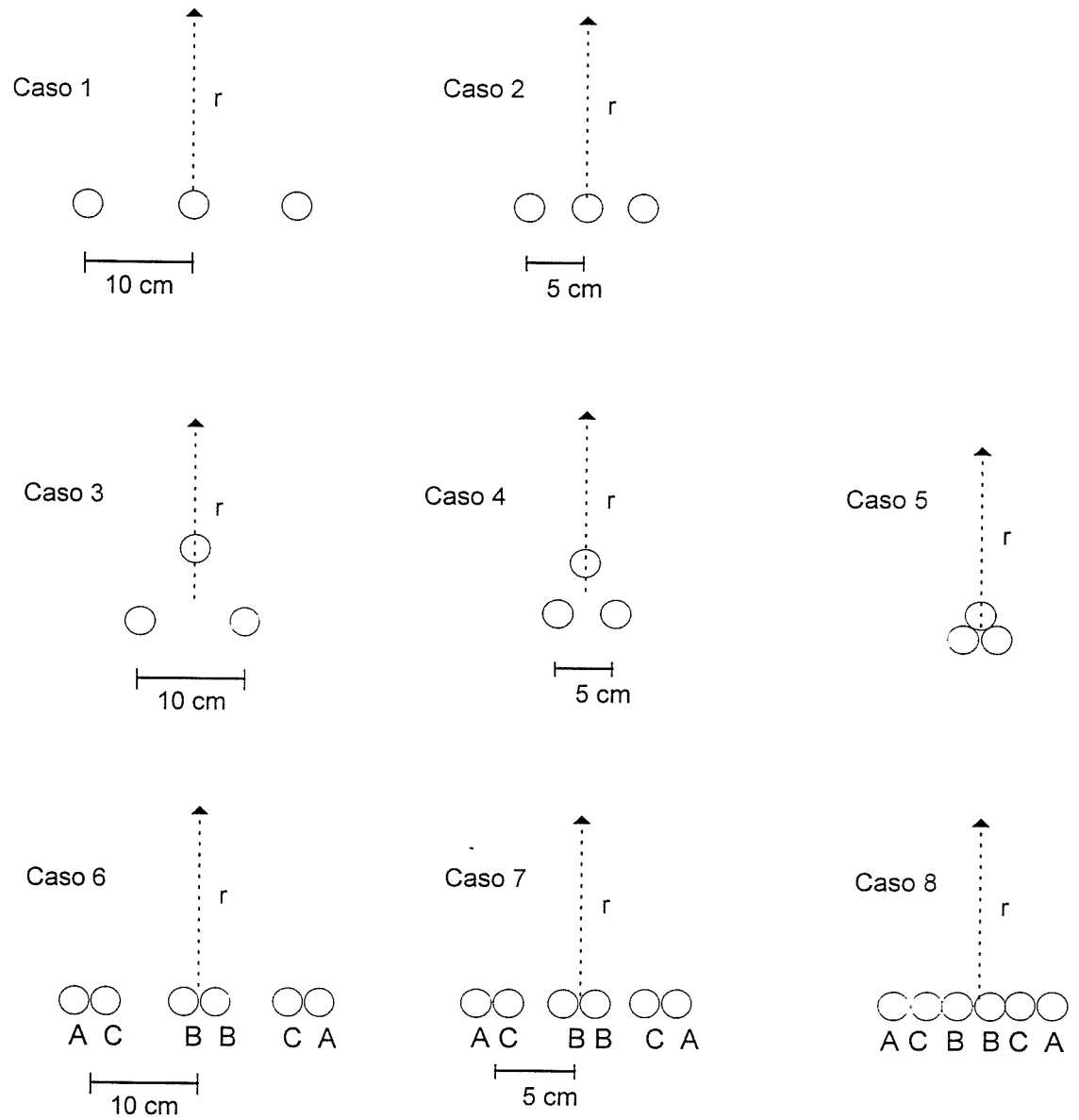
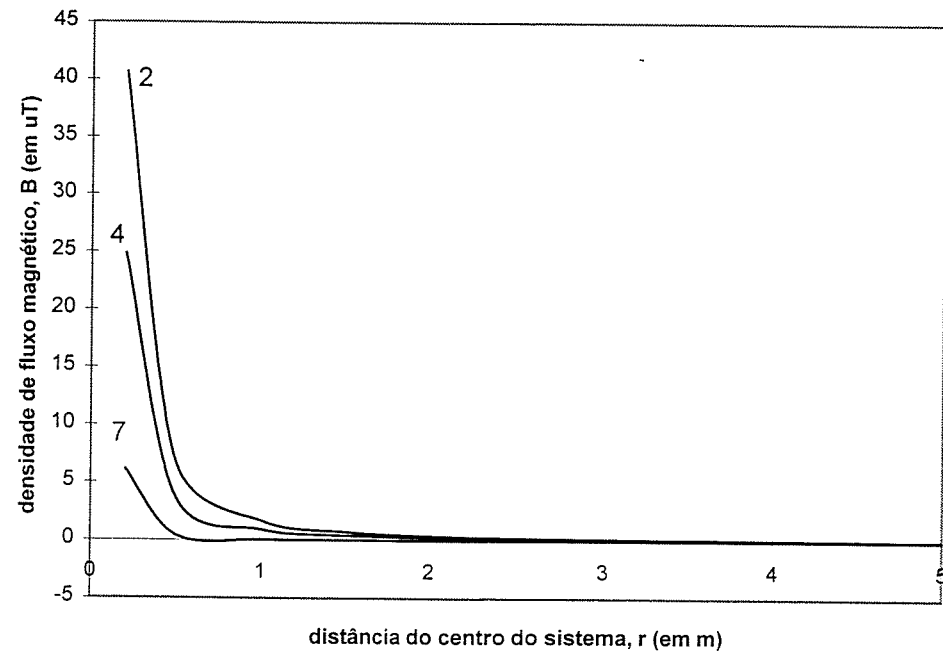


Figura 3.8 - Variação da configuração do sistema trifásico.

r (m)	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
caso 1	69,2	13,2	3,33	1,43	0,77	0,47	0,31	0,21	0,15	0,11	0,09
caso 2	40,7	6,81	1,68	0,72	0,39	0,23	0,15	0,11	0,08	0,06	0,04
caso 3	57,2	7,79	1,88	0,84	0,48	0,31	0,21	0,15	0,12	0,09	0,07
caso 4	24,9	3,70	0,92	0,41	0,24	0,15	0,11	0,08	0,06	0,04	0,04
caso 5	4,46	0,71	0,18	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
caso 6	20,1	1,56	0,20	0,06	0,02	0,01	0,01	---	---	---	---
caso 7	6,17	0,42	0,05	0,02	0,01	---	---	---	---	---	---
caso 8	0,08	0,01	---	---	---	---	---	---	---	---	---

A fim de ilustrar os perfis de campo de alguns casos mostrados na tabela 3.1, é apresentada a figura 3.9.

Comparação entre diferentes configurações



sistema trifásico equilibrado. A simples aproximação dos condutores, ou seja, a diminuição da distância entre as fases já leva a reduções consideráveis de até 88,9% (comparação entre casos 1 e 5). Os melhores resultados são obtidos quando é feita a conjugação da aproximação dos condutores com a alternância de fases com a utilização de dois condutores por fase.

Vale ressaltar que os estudos foram feitos para sistemas equilibrados e que a consideração de um desequilíbrio de correntes deve ser feita, uma vez que sistemas desequilibrados representam a grande maioria dos sistemas reais encontrados. Dessa forma, torna-se necessária a análise da influência do desequilíbrio de corrente no valor resultante do campo, o que será feito a seguir.

#### ***3.4.2 Sistemas desequilibrados***

O estudo para sistemas desequilibrados foi feito sob as mesmas condições anteriores, ou seja, comprimento dos condutores igual a 8 m e as mesmas configurações foram simuladas, sendo feitas as mesmas variações da geometria, disposição e número de condutores por fase dos casos anteriores, representados na figura 3.8. Foi considerado um desequilíbrio de aproximadamente 17%, sendo as correntes das fases A, B e C iguais a, respectivamente, 90, 100 e 110 A, defasadas de 120° entre si.

Os resultados obtidos são mostrados na tabela 3.2.

r (m)	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
caso 1	70,5	14,8	4,70	2,59	1,73	1,26	0,97	0,77	0,63	0,52	0,44
caso 2	43,8	9,63	3,75	2,28	1,60	1,20	0,94	0,75	0,62	0,51	0,43
caso 3	59,4	10,9	3,99	2,36	1,63	1,22	0,95	0,76	0,62	0,52	0,44
caso 4	31,4	8,12	3,52	2,20	1,56	1,18	0,93	0,75	0,61	0,51	0,43
caso 5	18,1	6,90	3,36	2,16	1,55	1,17	0,92	0,74	0,61	0,51	0,43
caso 6	25,8	7,03	3,37	2,16	1,55	1,18	0,92	0,74	0,61	0,51	0,43
caso 7	19,1	6,95	3,37	2,16	1,55	1,18	0,92	0,75	0,61	0,51	0,43
caso 8	18,4	6,95	3,37	2,17	1,55	1,18	0,92	0,75	0,61	0,51	0,43

A fim de ilustrar os perfis de campo de alguns casos mostrados na tabela 3.2, é apresentada a figura 3.10.

#### Comparação entre as diferentes configurações

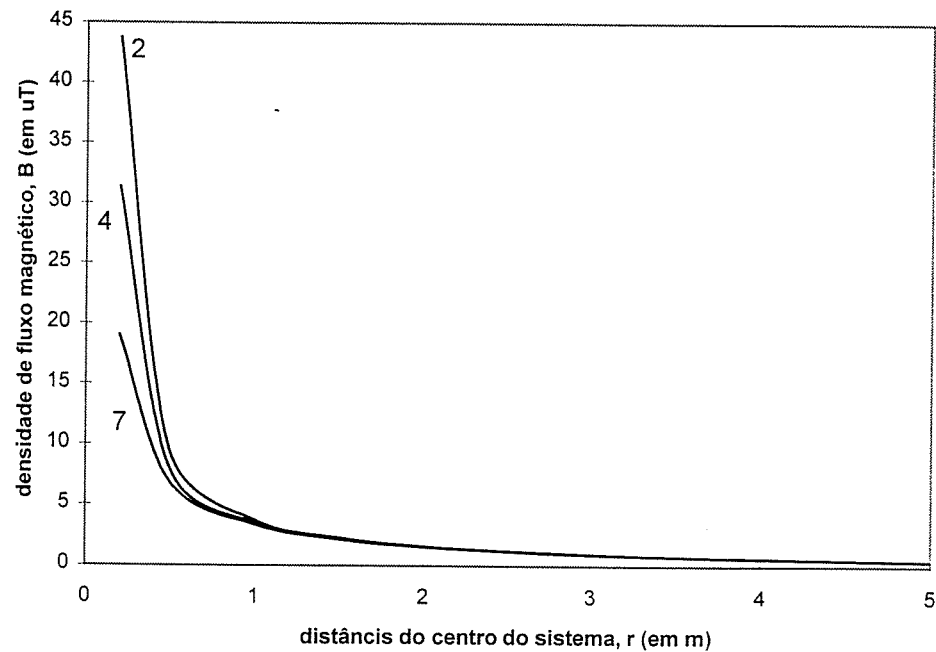


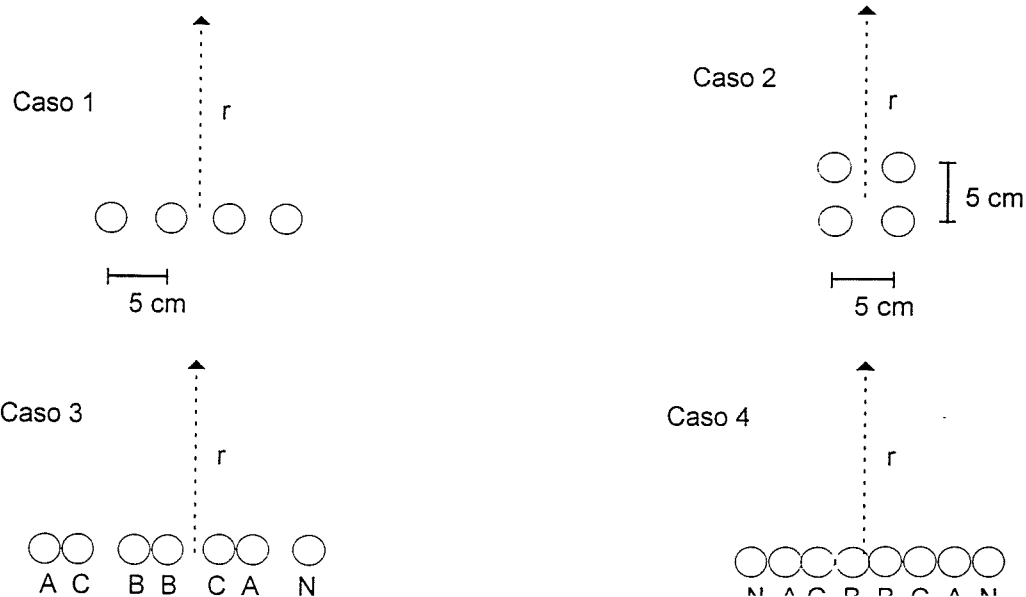
Figura 3.10 - Perfis da densidade de fluxo magnético em função da distância para os

configuração do sistema. De uma forma geral, os valores encontrados foram maiores que para um sistema equilibrado, o que indica ser o valor de  $B$  muito sensível ao desequilíbrio de corrente, ou seja, com um desequilíbrio de correntes, o valor de  $B$  torna-se maior. Com isso, pode-se concluir que o estudo de balanceamento de cargas do sistema é uma alternativa para a minimização do valor do campo resultante.

Observa-se também que, a partir de uma determinada distância (aproximadamente 3 m), todas as configurações tendem para um mesmo valor de campo. Dessa forma, para sistemas desequilibrados, a configuração dos condutores não influencia o valor de  $B$  a partir de distâncias relativamente pequenas.

Os resultados levam a crer que, para sistemas trifásicos, a alteração da geometria do sistema apresentará limitações na redução efetiva do valor de  $B$ , uma vez que a maioria dos sistemas são desequilibrados.

A influência do condutor neutro no valor resultante de  $B$  também deve ser observada. Com esse intuito, foram simulados os casos apresentados na figura 3.11, cujos resultados são mostrados na tabela 3.3.

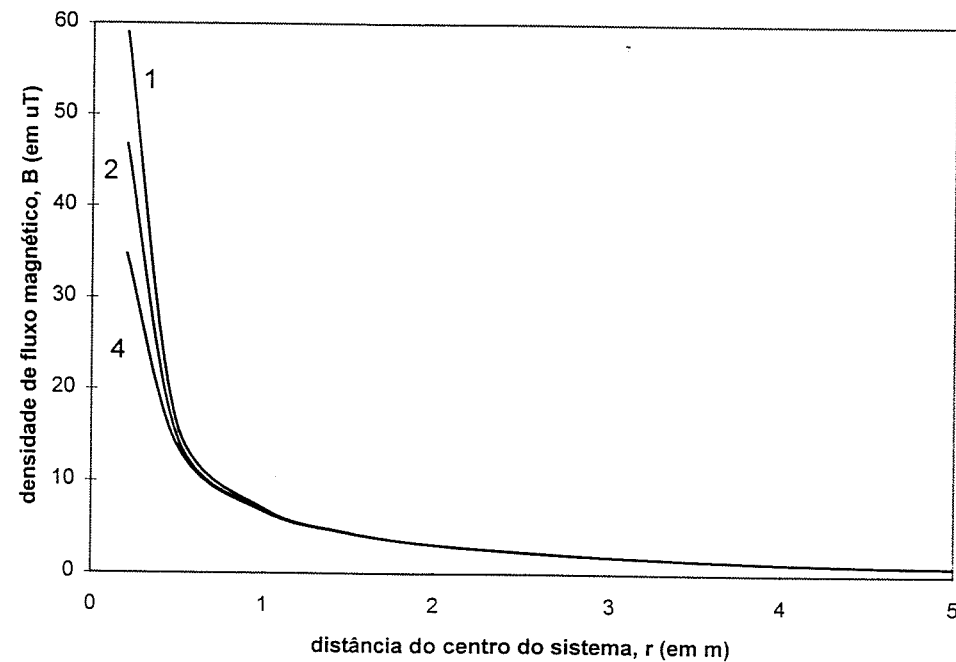


r (m)	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
caso 1	59,1	16,0	7,02	4,41	3,13	2,37	1,86	1,50	1,23	1,03	0,87
caso 2	46,8	14,7	6,84	4,36	3,12	2,36	1,85	1,49	1,23	1,02	0,87
caso 3	33,6	13,7	6,71	4,32	3,10	2,35	1,85	1,49	1,22	1,02	0,87
caso 4	34,8	13,7	6,72	4,33	3,10	2,35	1,85	1,49	1,22	1,02	0,87

Os perfis de campo da tabela 3.3 são mostrados na figura 3.12.

Apesar dos valores da densidade de fluxo magnético serem diferentes, devido ao acréscimo da contribuição gerada pela corrente no neutro, observa-se, mais uma vez, que todas as configurações tendem a um mesmo valor de  $B$ ; desta vez, a partir de aproximadamente 2 m da fonte. Assim, a presença do condutor neutro não altera as conclusões anteriormente obtidas.

Comparação entre diferentes configurações





os condutores. Assim, soluções válidas para sistemas equilibrados podem não ser eficazes para sistemas desequilibrados.

### *3.5 Considerações Finais*

Algumas considerações relacionadas ao desenvolvimento da formulação devem ser feitas com relação à aplicação das expressões desenvolvidas e do programa implementado.

Toda a dedução apresentada baseia-se no cálculo da densidade de fluxo magnético gerada por um filamento de corrente, ou seja, em nenhum momento foram consideradas as características dos condutores, tais como as dimensões e formas de suas seções retas. Mesmo sabendo que esse fato acarretará erros, as expressões deduzidas podem ser consideradas válidas, uma vez que os erros somente serão significativos em pontos bem próximos aos condutores, a partir dos quais as características da seção do condutor serão desprezíveis frente às distâncias tomadas.

Apesar dos condutores serem considerados finitos, na simulação computacional não houve a preocupação em se caracterizar o retorno das correntes. Na parte experimental, isso é feito com segmentos de condutor unindo os condutores fase e neutro, em uma de suas extremidades. A corrente que circula nesse segmento levará à existência de uma parcela do campo na direção  $z$ , ou seja, na realidade, não existe apenas componentes de  $\mathbf{B}$  nas direções  $x$  e  $y$ . Os erros introduzidos por essa consideração não serão significativos para pontos próximos aos condutores, uma vez que o cálculo e a medição serão feitos primordialmente na região central do sistema, na qual o efeito das extremidades é minimizado. Entretanto, vale lembrar que quanto mais distante for o ponto de cálculo de  $\mathbf{B}$ , maior será a

próprio transformador que alimenta o sistema.

Uma vez feitas as considerações sobre as limitações da formulação desenvolvida, pode-se fazer o projeto da bancada experimental na qual serão realizados os experimentos para a blindagem dos campos magnéticos.

# 4 Projeto da Bancada Experimental

## 4.1 Introdução

Uma vez quantificado o fenômeno em estudo através do cálculo da densidade de fluxo magnético para um sistema trifásico genérico, resta determinar as características da bancada experimental na qual serão realizados os estudos experimentais.

As características da bancada experimental devem ser tais que representem o fenômeno real em estudo da forma mais fiel possível e facilite o manuseio e as condições de medição. Além disso, ela deve possuir uma estrutura que possibilite experimentos como a variação da geometria e utilização da blindagem metálica para a fonte de campo. As medições devem ser possíveis nas direções vertical e horizontal, de forma a melhor mapear a distribuição de campo. Visando a minimização da influência das parcelas de campo provenientes das extremidades dos condutores, as medições foram realizadas no centro do sistema, ou seja, a partir da metade do comprimento dos condutores.

Vale ressaltar que as distâncias de medição de interesse vão até aproximadamente 4 m, uma vez que os problemas encontrados situam-se

## ***4.2 Aspectos da Bancada Experimental***

Anteriormente à definição das características da bancada, alguns importantes aspectos relacionados à representação do fenômeno envolvido devem ser discutidos. Dentre eles, pode-se ressaltar: comprimento dos condutores e intensidade da corrente.

### ***4.2.1 Comprimento dos condutores***

A definição do comprimento dos condutores é fundamental para a boa caracterização dos sistemas reais. A extensão dos sistemas reais apresenta uma variação muito grande, sendo encontrados sistemas de poucos metros até dezenas de metros [2,3]. Independente do comprimento dos condutores, a bancada experimental deve ser capaz de representá-los da forma mais fiel possível.

O ideal seria a representação de um sistema de grande extensão, de forma a minimizar os efeitos das extremidades e melhor caracterizar os sistemas reais. Entretanto, essa escolha levaria a um alto custo do projeto, inviabilizando a sua implementação.

Com o intuito de se determinar um comprimento que atendesse a essas duas exigências (grande extensão e baixo custo), foram realizadas simulações para um mesmo sistema com diferentes comprimentos.

A tabela 4.1 apresenta os resultados para diferentes comprimentos de um sistema trifásico disposto horizontalmente com espaçamento entre fases de 15 cm e corrente igual a 1000 A por fase.

r (em m)	L = 2	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 20	L → ∞
0,2	806,60	825,00	828,50	829,80	830,30	831,10	831,40
0,5	169,04	184,50	187,90	189,10	189,70	190,40	190,70
1,0	35,73	45,35	48,16	49,27	49,81	50,56	50,82
2,0	5,76	9,12	10,74	11,55	11,99	12,67	12,92
3,0	1,82	3,19	4,07	4,61	4,94	5,52	5,76
4,0	0,79	1,45	1,94	2,29	2,53	3,01	3,24
5,0	0,41	0,77	1,07	1,30	1,47	1,86	2,08

A tabela 4.2 apresenta os desvios relativos dos valores de campo de cada comprimento com relação ao comprimento infinito.

Para pontos de medição mais distantes, observa-se um aumento do erro relativo ao comprimento infinito, o qual se deve à influência das extremidades dos condutores.

Tabela 4.2 - Desvios relativos de  $B$  com relação ao comprimento infinito (em %) - sistemas equilibrados.

r (em m)	L = 2	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 20
0,2	3,0	0,8	0,3	0,2	0,1	0,0
0,5	11,4	3,3	1,5	0,8	0,5	0,2
1,0	29,7	10,8	5,2	3,0	2,0	0,5
2,0	55,4	29,4	16,9	10,6	7,2	1,9
3,0	68,4	44,6	29,3	20,0	14,2	4,2
4,0	75,6	55,2	40,1	29,3	21,9	7,1
5,0	80,3	63,0	48,6	37,5	29,3	10,6

problemas reais. Mas isso inviabilizaria o projeto, uma vez que a quantidade de material necessária seria muito grande, acarretando um alto custo.

Dessa forma, optou-se pela escolha de um comprimento intermediário, em que os erros e o custo fossem razoavelmente baixos.

O comprimento escolhido foi de 6 m, pois, apesar dos erros serem consideráveis para distâncias maiores, ele apresenta a vantagem de ser o comprimento de barramentos comercialmente disponíveis, minimizando o custo da montagem.

A influência do desequilíbrio de corrente na diferença entre os campos gerados por diferentes comprimentos de condutores pode ser observada na tabela 4.3. Neste caso, foram injetadas correntes de 900, 1000 e 1100 A nas fases.

Tabela 4.3 - Densidade de fluxo magnético,  $B$  (em  $\mu\text{T}$ ), para diferentes comprimentos de condutores - sistemas desequilibrados

$r$ (em m)	$L = 2$	$L = 4$	$L = 6$	$L = 8$	$L = 10$	$L = 20$	$L \rightarrow \infty$
0,2	813,70	832,30	835,80	837,10	837,70	838,50	838,70
0,5	178,20	194,50	198,00	199,30	199,90	200,70	201,00
1,0	42,95	54,50	57,90	59,20	59,90	60,80	61,10
2,0	9,61	15,20	17,90	19,20	20,00	21,10	21,50
3,0	4,07	7,14	9,10	10,30	11,04	12,33	12,88
4,0	2,24	4,13	5,54	6,53	7,21	8,57	9,24
5,0	1,42	2,68	3,72	4,51	5,11	6,46	7,23

r (em m)	L = 2	L = 4	L = 6	L = 8	L = 10	L = 20
0,2	3,0	0,8	0,3	0,2	0,1	0,0
0,5	11,3	3,2	1,5	0,8	0,5	0,1
1,0	29,7	10,8	5,2	3,1	2,0	0,5
2,0	55,3	29,3	16,7	10,7	7,0	1,9
3,0	68,4	44,6	29,3	20,0	14,3	4,3
4,0	75,8	55,3	40,0	29,3	22,0	7,3
5,0	80,4	62,9	48,5	37,6	29,3	10,7

Os desvios relativos dos valores de campo de cada comprimento com relação ao comprimento infinito são apresentados na tabela 4.4.

Os desvios relativos com o desequilíbrio de corrente são bem próximos aos de um sistema equilibrado. Dessa forma, as mesmas conclusões anteriores podem ser aplicadas para este caso.

Vale ressaltar, no entanto, que a utilização dos resultados deste trabalho em situações reais deve ser cautelosa no sentido de se adequar os resultados aqui obtidos, uma vez que diferenças significativas podem existir entre as características físicas do sistema real analisado e as características do sistema representado na bancada experimental.

#### **4.2.2 Intensidade da corrente**

A intensidade das correntes que percorrem os condutores é fundamental para o valor do campo gerado, já que ele é diretamente proporcional à corrente injetada no sistema.

O valor do campo deve ser tal que ele seja influenciado da menor

corrente, maior será a precisão das medições, uma vez que o valor de  $B$  será menos influenciado por campos parasitas externos, principalmente em pontos mais distantes onde o valor do campo proveniente da bancada experimental é naturalmente menor.

Entretanto, há limitações de injeção de altos valores de corrente, impostas pelos equipamentos disponíveis. Assim, o maior valor de corrente obtido foi em função da disponibilidade de materiais e equipamentos.

A seguir, serão apresentadas as características da bancada experimental construída, a partir do detalhamento dos sistemas físico, de geração e de medição.

### 4.3 Sistema de Geração

Para a geração de altos valores de corrente nos condutores, suas extremidades foram curto-circuitadas. Dessa forma, a partir de um pequeno valor de tensão, altos valores de corrente são gerados.

A figura 4.1 esquematiza o sistema de geração utilizado.

A corrente injetada no sistema trifásico foi controlada por um varivolt trifásico, cuja saída foi ligada ao lado de alta tensão do transformador. O lado de baixa tensão foi conectado diretamente aos condutores do sistema. Dessa

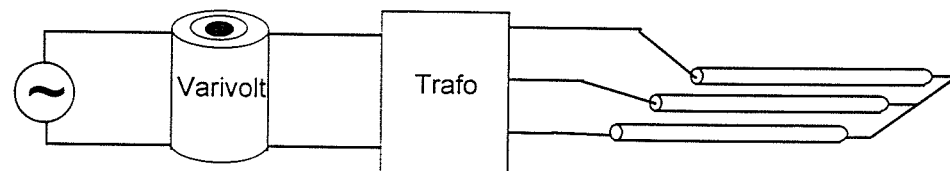


Figura 4.1 - Sistema de geração montado na bancada experimental



aproximadamente 240 V na entrada do transformador, correntes eficazes em torno de 140 A foram obtidas em cada fase do sistema. A limitação para obtenção de maiores valores de corrente está no fato do varivolt atingir o seu fundo de escala, impossibilitando o aumento da corrente. O transformador utilizado poderia gerar correntes de até aproximadamente 295 A. Uma outra solução para o aumento da corrente seria a utilização de um transformador de maior potência.

As características de cada um dos elementos mostrados na figura 4.1 são apresentadas a seguir.

### **1) Varivolt trifásico**

Fabricante: STP - Soc. Técnica Paulista Ltda.

Tipo: VT-290

Características de entrada: 220 V

Saída: 0-240V; 22 A (máximo); 9 kVA (máximo)

### **2) Transformador trifásico**

Fabricante: CIME

Potência: 112,5 kVA

Primário: 13,2 kV, ligação  $\Delta$

Secundário: 220/127 V, ligação Y

Impedância: 3,14%

### **3) Barramentos**

Comprimento: 6 m

Seção: circular

Diâmetro: 1,2 cm

Material: alumínio

A bancada experimental construída é representada na figura 4.2.

Ela possui quatro condutores de 6 m de comprimento cada um dispostos paralelamente entre si, alimentados pelo sistema de geração descrito anteriormente. Os condutores são fixos em suportes de madeira e a distância entre eles pode ser variada de 5 em 5 cm.

Foi fixada uma estrutura vertical de material isolante na qual um suporte para o sensor de campo pode se mover facilmente, possibilitando a medição de campo a distâncias de até 3,5 m.

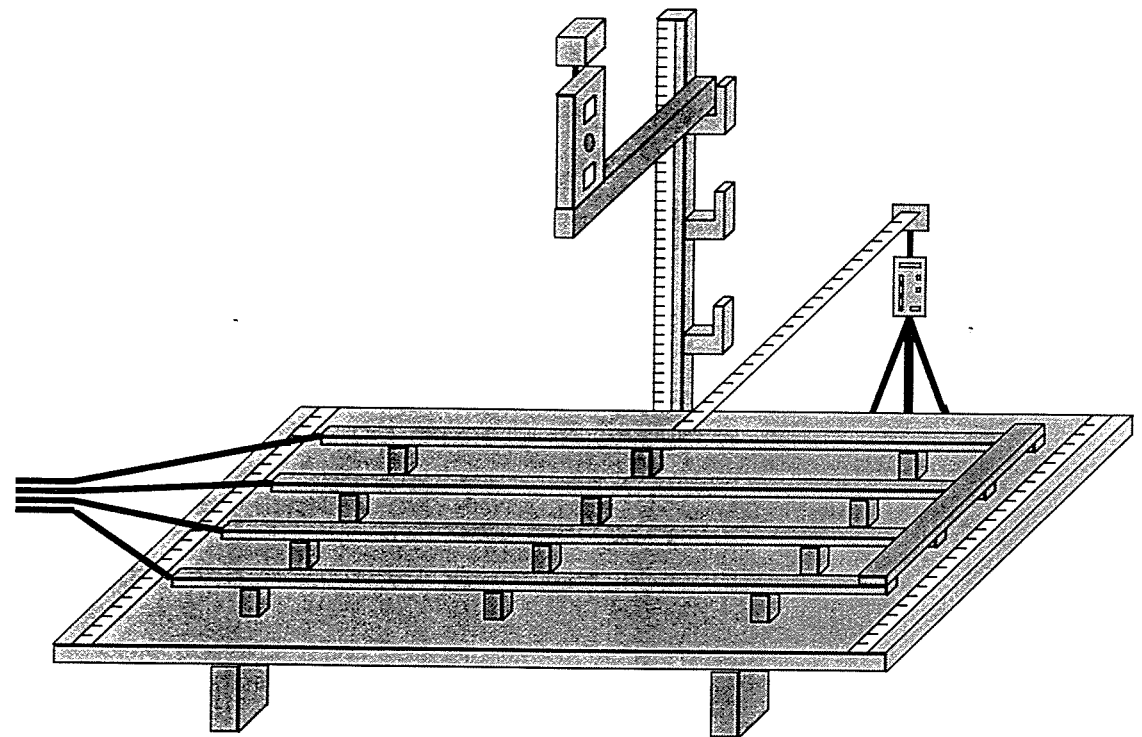


Figura 4.2 - Bancada experimental construída.

de até 5 m.

Em ambas as direções, foram fixadas trenas nas estruturas de tal forma que as distâncias fossem tomadas da forma mais precisa possível, uma vez que o valor do campo é muito sensível ao ponto de medição. As duas estruturas de medição foram fixadas na metade do comprimento dos condutores.

Quando da utilização de chapas metálicas para a blindagem do sistema, foram providenciadas estruturas de madeira para o suporte das chapas metálicas.

Vale ressaltar que as estruturas constituintes do sistema físico da bancada foram, em sua maioria, de materiais que não interferissem no campo magnético gerado pelo sistema de barramentos. Dessa forma, foram utilizadas preferencialmente estruturas não-condutoras, de madeira em sua maioria.

#### ***4.5 Sistema de Medição***

O sistema de medição utilizado consistiu basicamente de amperímetros para a medição da corrente injetada e do sensor de campo construído especialmente para este trabalho.

Foram utilizados, inicialmente, dois instrumentos para a medição de corrente, a fim de se garantir uma maior confiabilidade das medições, uma vez que o valor do campo é muito sensível à intensidade da corrente. Foram utilizados um amperímetro digital associado a um TC e um amperímetro alicate.

As características dos instrumentos são apresentadas a seguir.

Modelo: DM251

Escala utilizada: 10 A

## **2) TC**

Fabricante: HeB

Tipo: Ti44-1

Potência: 5 VA

Primário (utilizado): 600 A

Secundário: 5 A

Relação de transformação utilizada: 120

## **3) *amperímetro alicate***

Fabricante: General Electric

Fundo de escala utilizado: 300 A

Vale ressaltar que os dois amperímetros foram previamente calibrados e que suas leituras apresentaram uma concordância muito grande. Por praticidade, adotou-se o alicate amperímetro para realização dos experimentos.

O sensor de campo magnético construído será apresentado no capítulo seguinte.

# 5 Sensor de Campo Magnético

## 5.1 Introdução

Para a medição de campos elétricos e magnéticos, sensores especiais de campo devem ser desenvolvidos. Suas características devem ser tais que influenciem da menor forma possível o campo original a ser medido. Esse objetivo pode ser atingido através de um projeto adequado da geometria e das dimensões do sensor a ser construído [18].

Sensores de campos elétricos e magnéticos de baixa frequência são utilizados em diversas áreas de pesquisas, sendo que uma recente aplicação refere-se a testes de imunidade de equipamentos eletrônicos a campos magnéticos [18].

O sensor de campo magnético construído neste trabalho tem por objetivo a medição do campo magnético de 60 Hz gerado pela fonte de campo da montagem experimental.

Neste capítulo, serão apresentadas as características do sensor de campo magnético construído, bem como a determinação da constante do mesmo.

Os sensores de campo magnético de baixa frequência mais comumente utilizados são de características basicamente indutivas, sendo, geralmente, constituídos de várias espiras para atingir a sensibilidade desejada [18]. Outros tipos de sensores, tais como sensores de efeito Hall e sensores eletro-ópticos não são suficientemente sensíveis [18] e não serão tratados neste trabalho.

O sensor de campo magnético utilizado neste trabalho foi construído no LEAT (Laboratório de Extra-Alta Tensão) da UFMG, consistindo de três bobinas dispostas perpendicularmente entre si, com o objetivo de se medir o campo nas três direções do espaço. A representação da disposição das bobinas do sensor tridimensional pode ser observada na figura 5.1.

O campo magnético gerado pelo sensor não deve influenciar de forma significativa o campo a ser medido. Dessa forma, o sensor deve ter pequenas dimensões e uma geometria adequada [18]. Cada bobina do sensor construído possui dimensões de aproximadamente 4,5 cm x 4,5 cm x 3 cm, conforme figura 5.2.

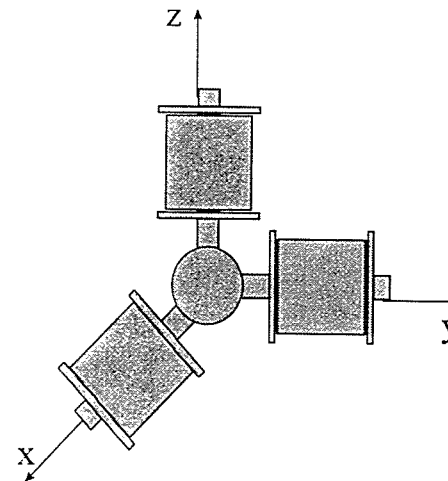


Figura 5.1 - Bobinas do sensor tridimensional do campo magnético

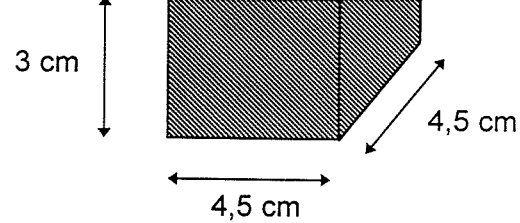


Figura 5.2 - Dimensões da bobina do sensor de campo magnético.

A fixação das bobinas foi feita com a utilização de uma estrutura confeccionada em madeira, evitando-se a utilização de materiais metálicos que pudessem influenciar o valor do campo medido.

Cada bobina do sensor foi construída com aproximadamente 20.000 espiras cada uma, a fim de que a sensibilidade requerida fosse atingida. A escolha da direção da medição é feita através de uma chave seletora que alterna as saídas de cada bobina. A saída de cada bobina, por sua vez, é conectada, através da chave, a um multímetro que indica a leitura da tensão induzida pelo campo magnético externo na direção selecionada. A figura 5.3 mostra a representação completa do sensor de campo magnético.

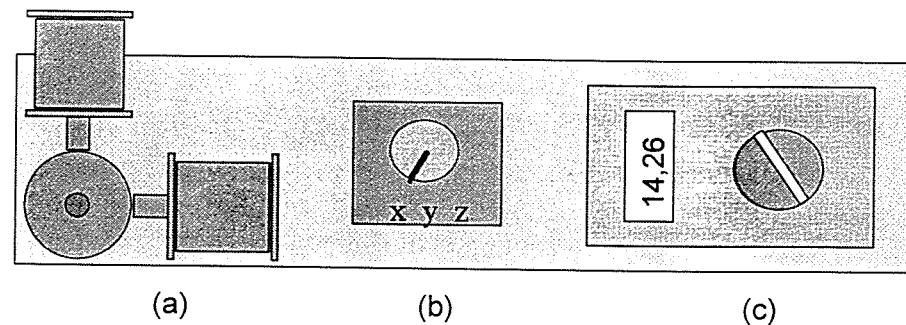


Figura 5.3 - Representação do sensor de campo magnético:

- (a) bobinas;
- (b) chave seletora;
- (c) multímetro.

A seguir, será, pois, apresentada a determinação da constante do sensor construído, ou seja, a constante pela qual se deve multiplicar a tensão medida pelo sensor para obtenção do campo magnético original.

### ***5.3 Determinação da Constante do Sensor***

Para a determinação da constante de sensores de campo magnético, é utilizado um arranjo de condutores carregado com uma corrente bem definida. Devido ao preciso conhecimento da corrente no arranjo e às bem definidas dimensões geométricas do mesmo, o campo magnético pode ser calculado com alta precisão [19].

Em Kohler [20], são apresentados vários arranjos para a obtenção da constante de sensores de campo magnético. Apenas quando a dimensão do sensor de campo for pequena comparada à dimensão do sistema utilizado, será atingido um resultado satisfatório. Dependendo do tamanho geométrico dos sensores de campo e da homogeneidade do campo magnético no sistema utilizado, erros consideráveis podem ocorrer [19].

Dessa forma, para determinação da constante do sensor, foi escolhida uma bobina espiral, ou solenóide, cujas características são apresentadas na figura 5.4 e atendem satisfatoriamente às condições anteriormente apresentadas. Vale ressaltar que o solenóide utilizado é composto por dois sistemas paralelos com 28 espiras cada um.

O solenóide é um elemento freqüentemente utilizado para a produção de campo magnético [20]. As dimensões do solenóide escolhido podem ser consideradas satisfatórias e, além disso, devido a seu comprimento, o campo magnético em seu interior será consideravelmente homogêneo.



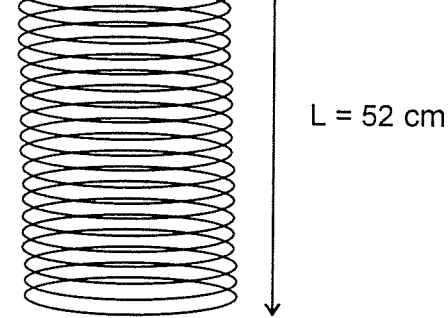


Figura 5.4 - Solenóide utilizado para a determinação da constante do sensor.

Segundo Kraus [20], o módulo da densidade do campo magnético gerado no centro de um solenóide pode ser calculado por:

$$B = \frac{\mu N I}{\sqrt{4 R^2 + L^2}}; \quad (5.1)$$

onde:  $\mu$  é a permeabilidade do meio;

$N$  é o número de espiras do solenóide;

$I$  é a corrente através do solenóide;

$L$  é o comprimento do solenóide;

$R$  é o raio do solenóide.

Para obtenção da equação (5.1), o espaçamento entre as espiras foi considerado muito pequeno comparado com o raio  $R$  do solenóide e o fio de cada espira muito fino. Essas condições podem ser consideradas satisfeitas pelo solenóide escolhido.

O sistema completo utilizado na determinação da constante do sensor pode ser observado na figura 5.5.

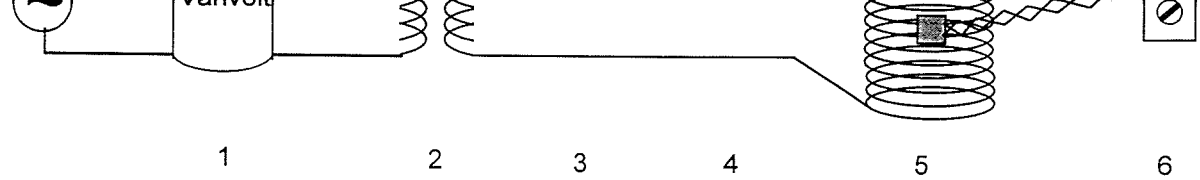


Figura 5.5 - Sistema para obtenção da constante do sensor de campo magnético.

As características de cada elemento do sistema mostrado na figura 5.5 são apresentadas a seguir.

### 1) *Varivolt trifásico*

Fabricante: STP - Soc. Técnica Paulista Ltda.

Tipo: VT-290

Entrada: 220 V

Saída: 0-240V; 22 A (máximo); 9 kVA (máximo)

### 2) *Transformador trifásico*

Fabricante: CIME

Potência: 112,5 kVA

Primário: 13,2 kV, ligação  $\Delta$

Secundário: 220/127 V, ligação Y

Impedância: 3,14%

### 3) *TC*

Fabricante: HeB

Tipo: Ti44-1

Potência: 5 VA

Primário (utilizado): 50 A

Secundário: 5 A

Escala utilizada: 10 A

### **5) solenóide**

Fabricante: ER - Equip. Elétricos de Alta Tensão Ltda.

Reator tipo: LC-50/360

Corrente nominal: 360 A

Indutância nominal: 50  $\mu$ H

Corrente nominal: 360 A

Impedância: 18,85 m $\Omega$

Frequência nominal: 60 Hz

### **6) multímetro**

Fabricante: Minipa

Escala utilizada: 200 mV e 2 V

A corrente injetada no arranjo foi controlada pelo varivolt trifásico ligado entre a rede de potência e o transformador. A alimentação do transformador foi feita pelo lado de alta tensão e o lado de baixa tensão foi ligado na entrada do solenóide. Para a alimentação do solenóide foi utilizada apenas uma das fases do transformador. A medição da corrente que circula no arranjo foi feita com a utilização de um TC e um amperímetro digital.

Dessa forma, a partir do preciso conhecimento da corrente,  $I$ , que passa pelo solenóide e das dimensões do mesmo, foi possível calcular o campo magnético produzido em seu centro, conforme equação (5.1).

Vale ressaltar que a ligação entre a saída da bobina fixada no interior do solenóide e o multímetro foi feita com a utilização de um par de fios trançados, minimizando a indução de tensão ao longo desses fios.

É importante ressaltar que, tanto para a determinação da constante de sensores de campo elétrico quanto os de campo magnético, vários problemas devem ser levados em consideração, tais como: influência de campos externos, influência de objetos próximos ao sistema utilizado, problemas ocasionados pela proximidade do sistema de alimentação, dentre outros. Neste trabalho, evitou-se a proximidade de objetos, mas nenhuma outra providência com relação a outros fatores de interferência foi tomada.

Cada bobina do sensor foi colocada no centro do solenóide, sustentada por uma placa de acrílico, de forma a não interferir no valor do campo gerado. A medição da tensão induzida nos terminais de cada bobina foi feita com um multímetro digital. Para cada valor de corrente aplicada no solenóide, foi medida a correspondente tensão induzida na saída da bobina. A tabela 5.1 apresenta os valores das tensões induzidas para cada bobina com a aplicação de diferentes valores de corrente no sistema utilizado. Os valores da densidade de campo magnético,  $B$ , calculados pela equação (5.1) são também apresentados.

Tabela 5.1 - Resultados da determinação das constantes das bobinas do sensor de campo magnético.

$I$ (A) \ Bobina	$V_x$ (em V)	$V_y$ (em V)	$V_z$ (em V)	$B_{\text{calculado}}$ (em T)
5	3,04	3,05	2,99	$3,12 \times 10^{-4}$
10	5,98	5,94	5,90	$6,23 \times 10^{-4}$
15	8,85	8,80	8,77	$9,35 \times 10^{-4}$
20	11,73	11,64	11,63	$1,25 \times 10^{-3}$

$V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$  referem-se às tensões induzidas em cada direção  $x$ ,  $y$  e  $z$  do espaço.

partir da média das constantes calculadas. Dessa forma, para cada bobina do sensor de campo, foi determinada uma constante específica. Os resultados são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Obtenção das constantes do sensor de campo magnético.

<b>I (A) \ Bobina</b>	<b><math>k_x</math></b>	<b><math>k_y</math></b>	<b><math>k_z</math></b>
<b>5</b>	0,1025	0,1022	0,1042
<b>10</b>	0,1042	0,1049	0,1056
<b>15</b>	0,1056	0,1062	0,1066
<b>20</b>	0,1063	0,1071	0,1072
<b>MÉDIA</b>	0,1047	0,1051	0,1059

As constantes do sensor de campo apresentadas na tabela 5.2 referem-se à medição de uma tensão induzida em mV e o cálculo da densidade de campo magnético,  $B$ , em  $\mu\text{T}$ .

Assim, as constantes obtidas, para cada direção do espaço, são:

$$k_x = 0,1047;$$

$$k_y = 0,1051;$$

$$k_z = 0,1059.$$

Uma vez determinadas as constantes das três bobinas do sensor de campo magnético, tornou-se possível o cálculo da densidade de campo magnético,  $B$ , a partir da leitura dos valores de tensão induzida em cada uma das bobinas do sensor.

Vale ressaltar que, para o cálculo do campo magnético resultante,

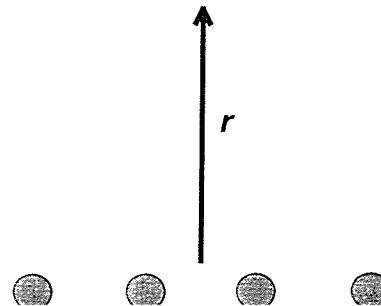
$$B_{TOTAL} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}. \quad (5.2)$$

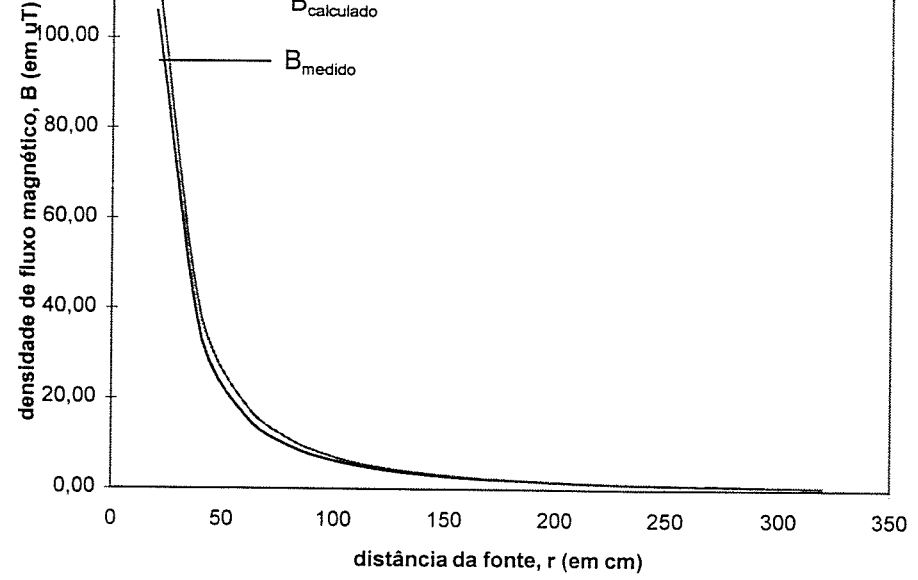
É importante salientar que o cálculo do valor do campo magnético resultante obtido nas medições em todo o desenvolvimento deste trabalho foi feito com a utilização do *Excel*.

#### 5.4 Comparação com Valores Calculados

Uma forma de se verificar a calibração das medições feitas com o sensor de campo magnético construído é através do cálculo do campo magnético resultante gerado na montagem experimental. Com esse objetivo, foram feitas medições para algumas situações representadas na montagem e o valor do campo resultante foi calculado através do programa desenvolvido apresentado no capítulo 3. A comparação entre a medição e o cálculo é feita a seguir, para três diferentes casos, onde o valor do campo foi medido para diferentes pontos.

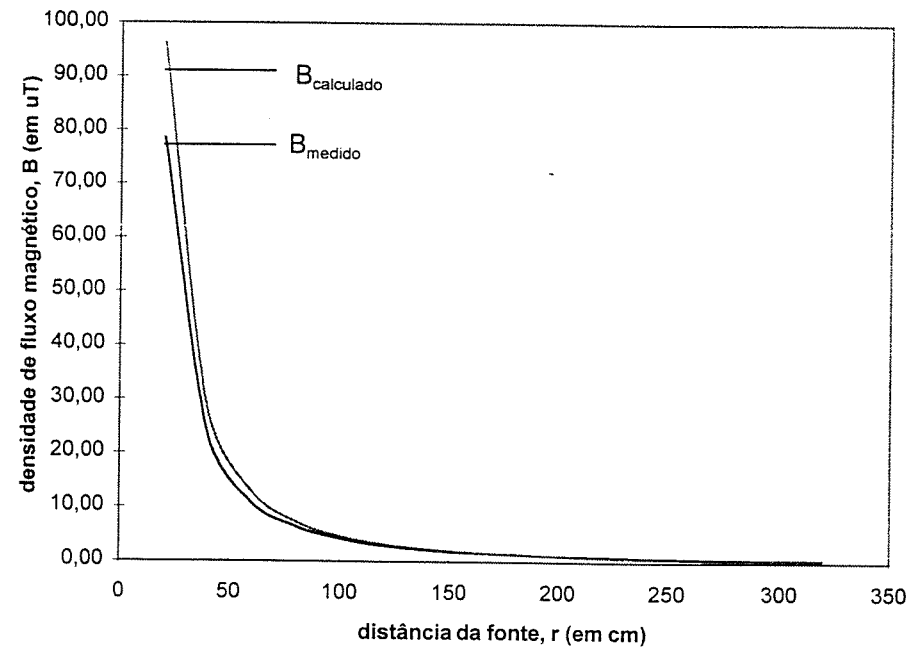
Na bancada experimental, foram realizadas medições na direção vertical, conforme ilustrado na figura 5.6. O espaçamento,  $d$ , entre os barramentos variou de 15, 10 e 5 cm. A corrente aplicada por fase foi de aproximadamente 140 A, tomadas de 20 em 20 cm, até uma distância máxima de 3,2 m. Os resultados são mostrados na figura 5.7.



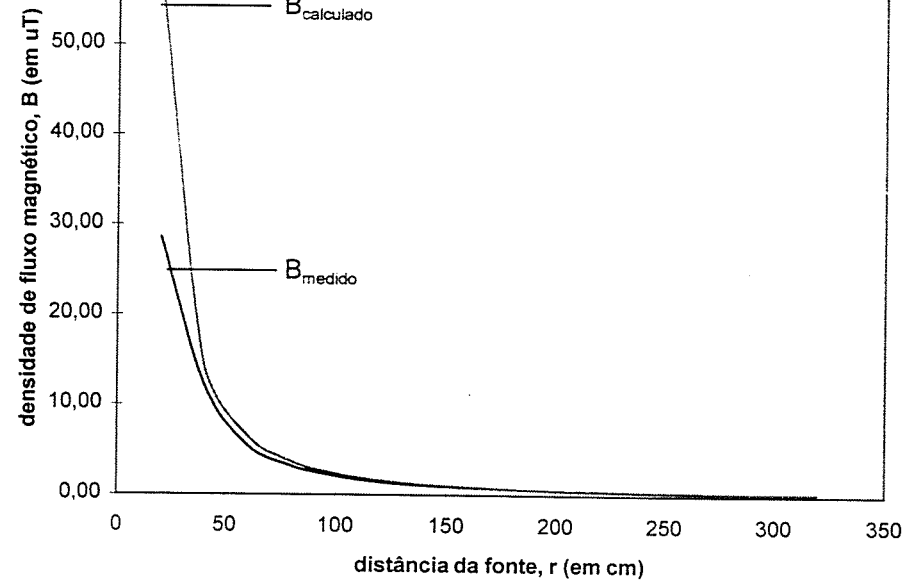


(a)

**Medição Vertical**  
**d = 10 cm**



(b)



(c)

Figura 5.7 - Resultados das medições: (a)  $d = 15$  cm; (b)  $d = 10$  cm; (c)  $d = 5$  cm.

Constata-se que os resultados mostram-se bastante razoáveis, uma vez que os valores de  $B$  medidos e calculados são, aparentemente, muito próximos, desconsiderando-se o primeiro ponto de medição da figura 5.7(c).

Para melhor analisar os dados, são apresentadas as tabelas 5.3, 5.4 e 5.5. Elas mostram os resultados da medição e sua comparação com os valores calculados.

Tabela 5.3 - Comparação entre valores medidos e calculados -  $d = 15$  cm.

$r$ (em cm)	20	60	100	140	180	220	260	300
$B_{\text{medido}}$	106,10	16,44	6,26	3,26	1,99	1,33	0,95	0,77
$B_{\text{calculado}}$	115,8	19,1	7,1	3,6	2,1	1,4	1,0	0,7
Erro (%)	8,38	13,91	11,85	9,40	5,31	4,85	5,10	0,33



<b>B<sub>medido</sub></b>	78,70	10,83	4,16	2,16	1,31	0,90	0,65	0,48
<b>B<sub>calculado</sub></b>	96,34	12,9	4,59	2,25	1,3	0,82	0,55	0,39
<b>Erro (%)</b>	18,31	16,04	9,30	4,08	0,79	10,13	18,33	24,18

Tabela 5.5 - Comparação entre valores medidos e calculados -  $d = 5$  cm.

<b>r (em cm)</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>140</b>	<b>180</b>	<b>220</b>	<b>260</b>	<b>300</b>
<b>B<sub>medido</sub></b>	28,64	5,55	2,09	1,08	0,66	0,45	0,32	0,25
<b>B<sub>calculado</sub></b>	56,58	6,62	2,33	1,15	0,67	0,43	0,29	0,21
<b>Erro (%)</b>	49,38	16,10	10,41	6,51	1,68	4,74	11,71	21,23

Observando as tabelas anteriores, importantes conclusões podem ser tiradas. Em todos os casos, o erro é maior para pontos mais próximos à fonte ( $r$  até 1 m aproximadamente) e para pontos mais distantes (a partir de  $r$  igual a 2,6 m). Para pontos próximos, há erros de cálculo devido às simplificações adotadas no desenvolvimento do programa implementado. Para pontos mais distantes, onde os valores de campo são menores, a sensibilidade do sensor também é menor, podendo ocasionar erros.

Vale ressaltar que os maiores erros foram encontrados para a situação em que os condutores encontravam-se espaçados de 5 cm. Essa situação é a que apresenta menores valores de campo, ou seja, a influência de campos externos no valor do campo medido é muito mais representativa.

Embora haja uma variedade de sensores de campo comercialmente disponíveis, tem-se verificado que seus erros de medição são, muitas vezes, maiores que os estabelecidos em documentações técnicas [20]. Assim, a calibração desses sensores é essencial para a correta medição dos campos.

O sensor EFA-3 da *Wandell & Goltermann* é utilizado para medição de campos elétricos e magnéticos de baixa frequência na faixa de 5 Hz a 30 kHz. O instrumento possui uma ponta de prova que permite detectar e medir a densidade de fluxo magnético,  $B$ , com precisão de aproximadamente 97%. Além disso, o cálculo de  $B$  feito pelo EFA-3 utiliza a mesma relação da equação (5.2), isto é, considera as parcelas de campo nas três direções, possibilitando a comparação entre os dois sensores [21].

Uma outra forma de se atestar a confiabilidade do sensor de campo magnético construído foi a comparação de sua leitura com a do sensor EFA-3. Com esse objetivo, foram feitas medições utilizando-se os dois sensores de campo, com as condições de medição apresentadas na figura 5.8. A distância entre os barramentos foi fixada em 5 cm e os valores de campo foram medidos na horizontal, a partir da fase localizada na extremidade do sistema. A corrente injetada por fase foi de aproximadamente 140 A.

Os resultados foram comparados e são apresentados na figura 5.9 e na tabela 5.4, onde *sensor 1* refere-se ao sensor construído neste trabalho e *sensor 2* ao sensor EFA-3.

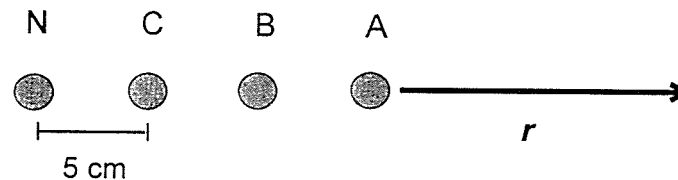


Figura 5.8. Condições de medição para a comparação de sensores.

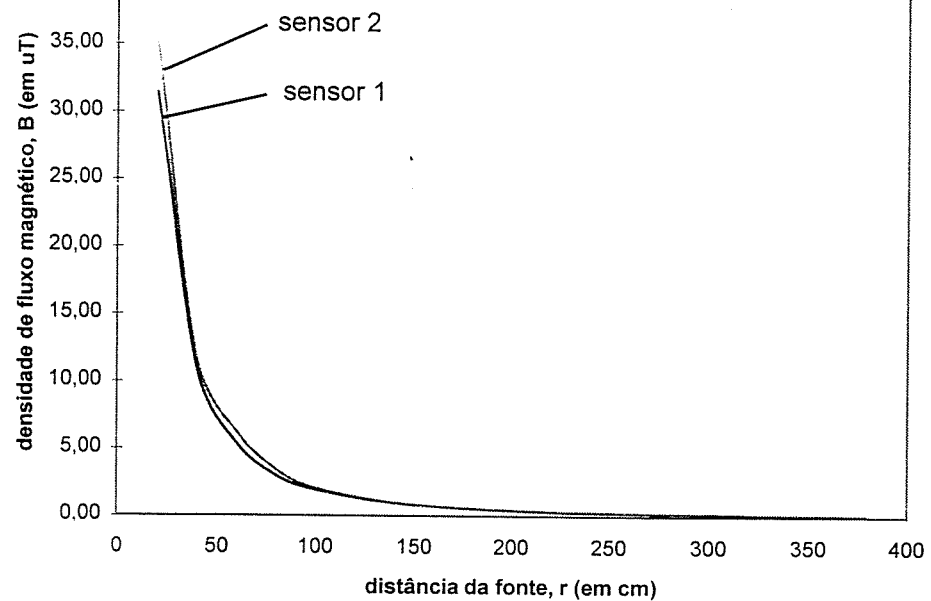


Figura 5.9 - Comparação entre os sensores utilizados.

Tabela 5.4 - Comparação entre os sensores utilizados.

<b>r (em cm)</b>	<b><math>B_{\text{sensor1}}</math></b>	<b><math>B_{\text{sensor2}}</math></b>	<b>Erro (%)</b>
20	31,47	35,20	10,60
40	10,74	11,60	7,40
60	5,37	6,23	13,74
80	2,96	3,42	13,38
100	1,91	2,03	5,82
140	0,95	0,97	2,37
180	0,54	0,57	4,99
220	0,33	0,36	7,38
260	0,24	0,25	2,51
300	0,18	0,19	3,96
340	0,10	0,12	11,70

pode-se dizer que o sensor construído poderá representar de forma satisfatória os valores de campo magnético medidos.

## ***5.6 Considerações Finais***

Vale ressaltar que algumas simplificações foram adotadas na construção e determinação da constante do sensor de campo utilizado. Como citado anteriormente, não houve a preocupação com a influência de campos externos, proximidade do transformador de alimentação do sistema, etc. Todos esses fatores são fontes de erro que influenciam o valor de campo medido, ou seja, o valor do campo medido não é resultado apenas da fonte de campo projetada, mas de sua soma com outras fontes de campo presentes no ambiente.

Outra relevante fonte de erro refere-se à leitura dos valores de corrente injetados em cada fase do sistema e no cabo neutro. Esses valores foram utilizados no cálculo dos valores de campo os quais são diretamente proporcionais às correntes injetadas. Assim sendo, os valores de campo calculados devem levar em consideração os erros introduzidos pelas leituras das correntes.

Na medição dos valores de campo, a leitura da tensão induzida em cada bobina do sensor também é uma fonte de erro inerente à medição.

# 6 Resultados Experimentais

## *6.1 Introdução*

Nos capítulos anteriores, foram apresentados o projeto da bancada experimental e as características do sensor de campo magnético utilizado na realização das medições. A partir da definição dessas características, foram feitas várias tentativas para redução do campo magnético através de algumas das alternativas já citadas anteriormente.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada uma das seguintes alternativas propostas: alteração da geometria do sistema de barramentos, blindagem da fonte de campo com chapas metálicas e blindagem do equipamento que sofre o efeito do campo. Além disso, um breve estudo a respeito da aplicação da técnica da blindagem ativa é também apresentado. A figura 6.1 apresenta o perfil da montagem com as principais variáveis envolvidas nas medições realizadas.

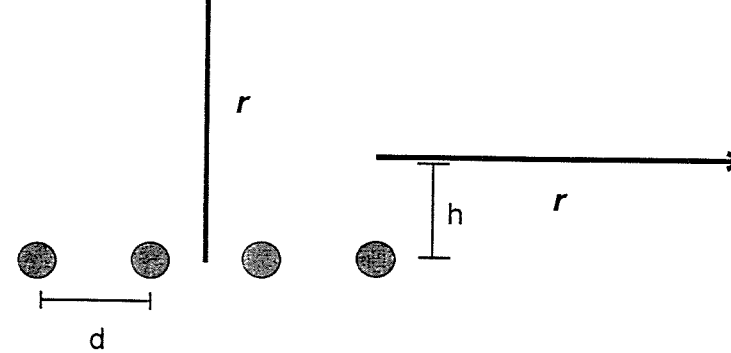


Figura 6.1 - Perfil da medição de  $B$ .

## 6.2 Alteração da Geometria

Inicialmente, foram feitas medições com o objetivo de se avaliar experimentalmente o efeito da geometria do sistema no valor da densidade de fluxo magnético medido, a partir da variação do espaçamento entre os condutores,  $d$ . Para a direção vertical, tomou-se a distância  $r$  com relação ao centro do sistema trifásico. No caso da direção horizontal, a distância  $r$  foi definida a partir da fase mais próxima e as medições foram realizadas a duas diferentes alturas  $h$ : 0 cm e 48 cm.

A corrente aplicada em cada fase foi de aproximadamente 140 A, havendo, no entanto, um pequeno desequilíbrio entre fases, sendo medida uma corrente no neutro da ordem de 9 A. Os espaçamentos entre condutores adotados foram de 5 cm, 10 cm e 15 cm. Foram feitas medições para distâncias de até 3,2 m na direção vertical, tomadas de 20 em 20 cm. Na direção horizontal, a maior distância de medição foi igual a 3,6 m.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos, a partir da comparação entre os diferentes espaçamentos adotados.

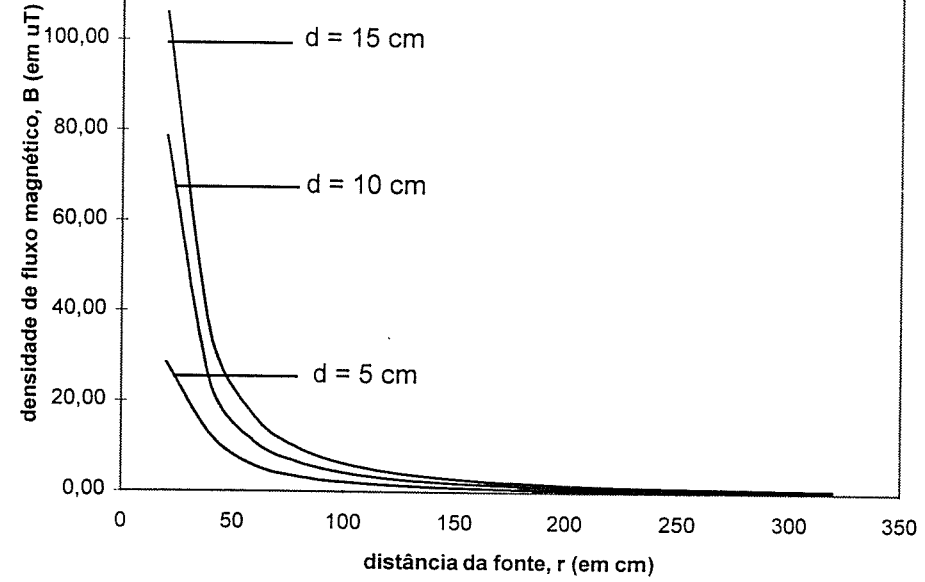


Figura 6.2 - Variação da geometria - medição vertical.

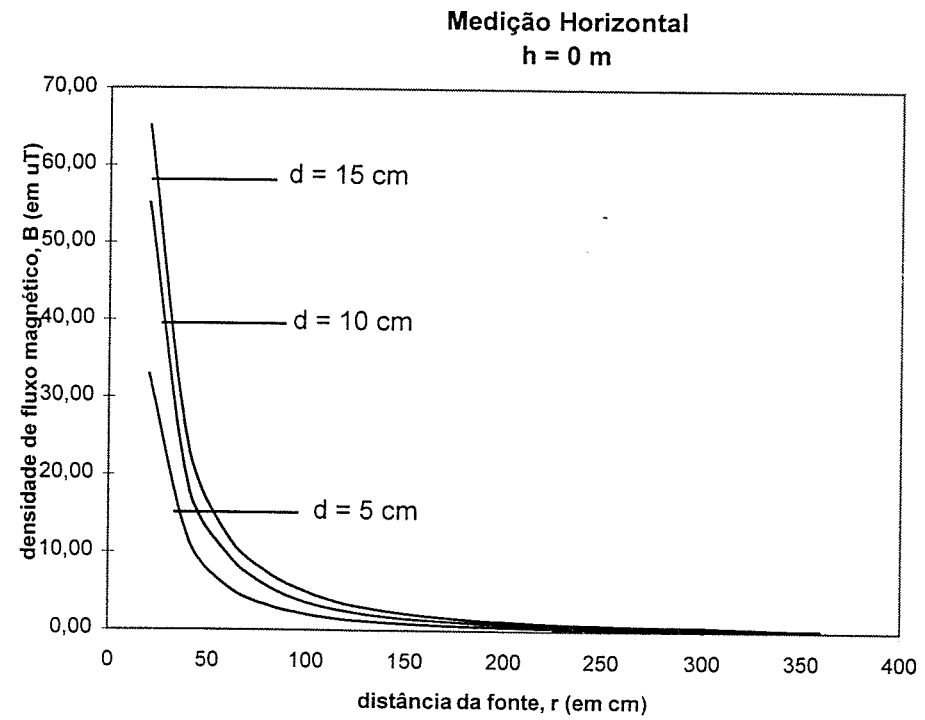


Figura 6.3 - Variação da geometria - medição horizontal, h = 0.

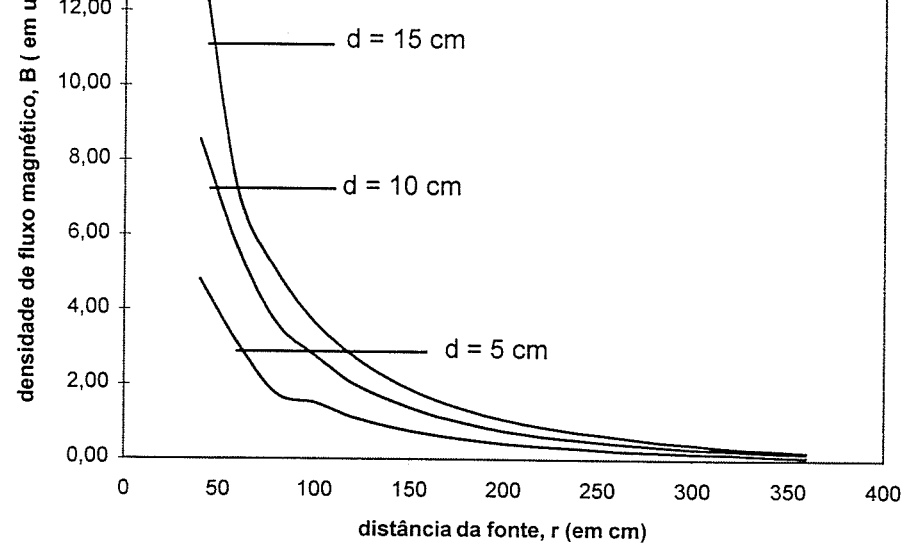


Figura 6.4 - Variação da geometria - medição horizontal,  $h = 48$  cm.

Observa-se que o comportamento da densidade de fluxo magnético em função da distância da fonte é semelhante em todas as direções de medição, para os diferentes espaçamentos adotados, havendo apenas uma redução dos valores de  $B$  para espaçamentos menores. Os melhores resultados são obtidos quando o espaçamento entre fases é menor, ou seja, 5 cm, como observado nas curvas apresentadas.

Para melhor visualizar os valores de campo para pontos distantes, é apresentada a figura 6.5.



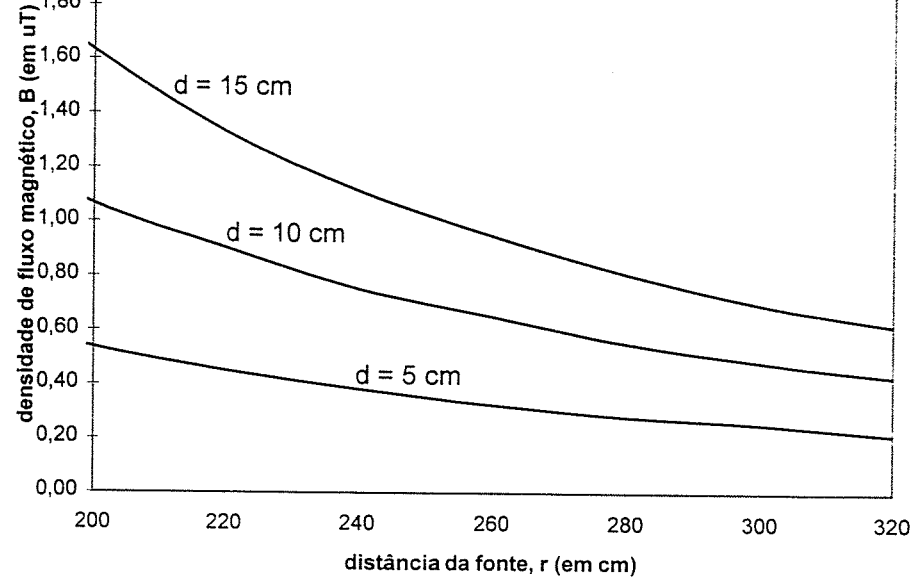


Figura 6.5 - Comportamento de  $B$  para pontos distantes.

Os resultados mostram que a simples aproximação dos barramentos do sistema já gera reduções de até 67%, como pode ser observado na tabela 6.1, onde são apresentados os índices de redução obtidos com a utilização de um espaçamento entre fases igual a 5 cm, comparado ao espaçamento de 15 cm.

Tabela 6.1 - Redução de  $B$  com a variação do espaçamento entre fases - em %.

$r$ (cm)	Vertical	Horizontal - $h=0$	Horizontal - $h=0,48$
40	64,3%	51,1%	64,3%
80	66,3%	57,1%	65,4%
120	67,2%	60,1%	59,5%
160	67,1%	62,0%	60,0%
200	67,2%	61,5%	60,0%
240	65,7%	63,0%	58,0%
320	65,0%	63,0%	58,0%

de medição. Nos casos estudados, essa redução é da ordem de 60%.

Uma redução de cerca de 60% pode ser considerada insuficiente para muitos dos problemas existentes. Se, por exemplo, há um campo de  $6 \mu\text{T}$  incidindo sobre um equipamento [3], uma redução de 60% significa reduzir esse valor para  $2,4 \mu\text{T}$ . Como a susceptibilidade de um monitor de microcomputador, por exemplo, é da ordem de  $0,5 \mu\text{T}$  [9], é preciso que a intensidade do campo magnético seja reduzida ainda mais, ou seja, a redução oferecida pela alteração da geometria pode não ser suficiente para o estabelecimento de níveis de campo considerados satisfatórios.

Neste caso, seria arriscado e dispendioso desenvolver um projeto para atingir reduções de apenas 60% ou pouco mais que isso. Dessa forma, o investimento em meios de redução mais eficazes é requerido.

Entretanto, vale ressaltar que, dependendo do caso, uma redução de 60% pode ser considerada eficiente, ou seja, a simples aproximação dos condutores pode ser suficiente para reduzir os valores de campo aos níveis desejados.

É importante salientar, ainda, que o valor do campo ambiente medido no interior do laboratório onde foram realizadas as medições deste trabalho manteve-se em torno de  $0,1 \mu\text{T}$  durante todas as medições realizadas.

### ***6.3 Blindagem da Fonte com Chapas de Alumínio***

Com o objetivo de se verificar a eficiência de blindagem com a utilização de chapas metálicas, foram feitas medições com as condições representadas na figura 6.6, ou seja, colocando-se chapas sobre a fonte de campo.

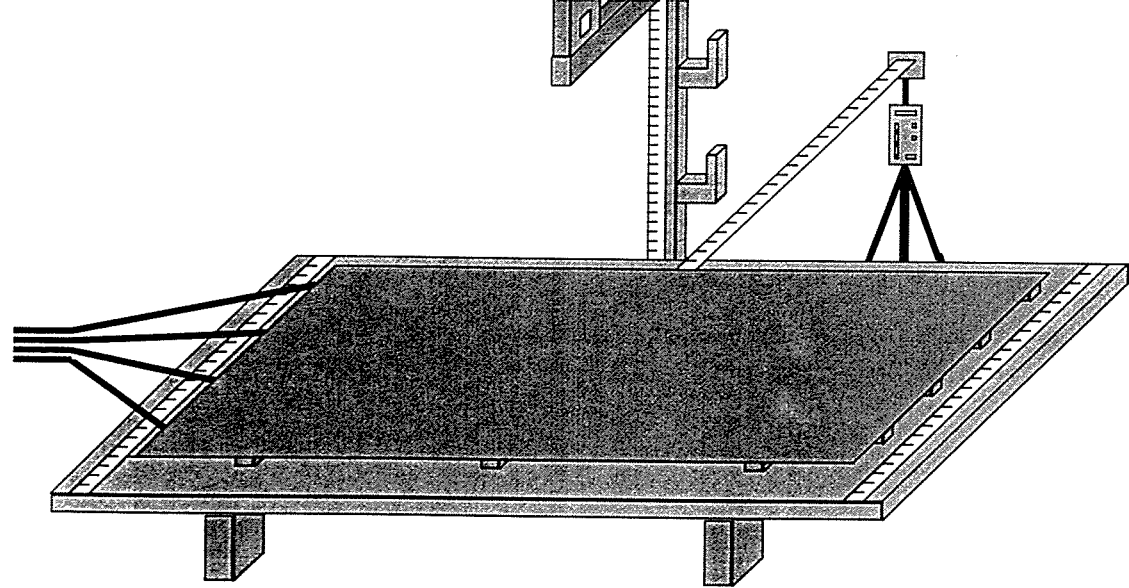


Figura 6.6 - Utilização de chapas de alumínio sobre a fonte.

Foram utilizadas chapas de alumínio de 99% de pureza, 4,76 mm de espessura, 1 m de largura e comprimento de 2 m. As distâncias envolvidas nesta montagem são mostradas na figura 6.7, destacando-se a distância entre barramentos igual a 10 cm e a distância entre esses e a chapa de 8 cm.

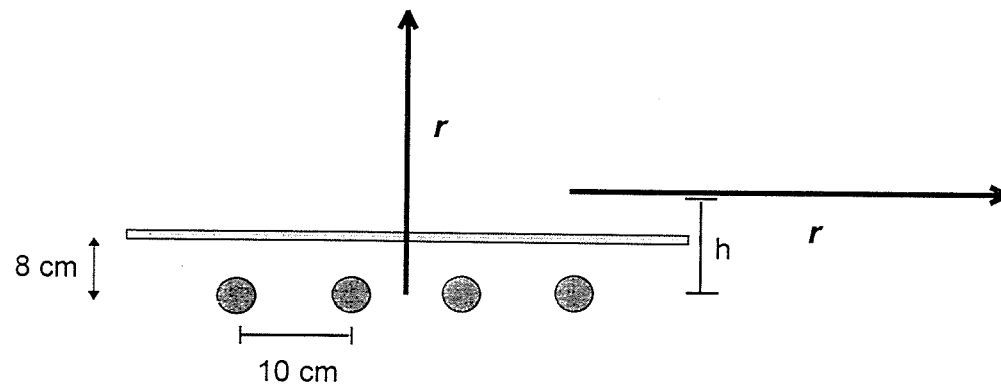


Figura 6.7 - Perfil da medição de  $B$  com a utilização de chapas sobre a fonte.

mostrada a seguir, nas figuras 6.8, 6.9 e 6.10.

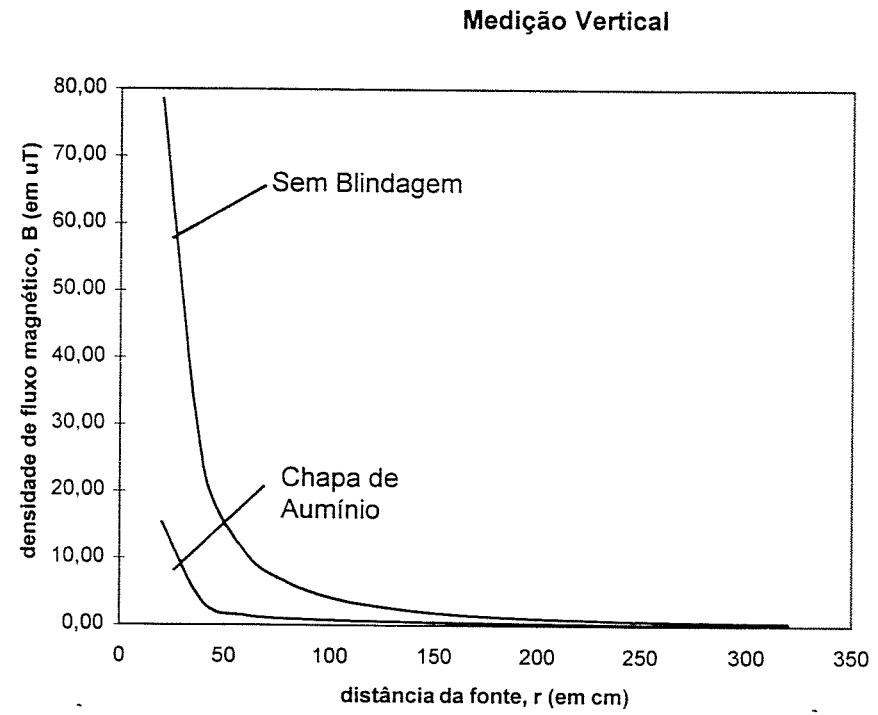


Figura 6.8 - Blindagem da fonte com chapas de alumínio - medição vertical.

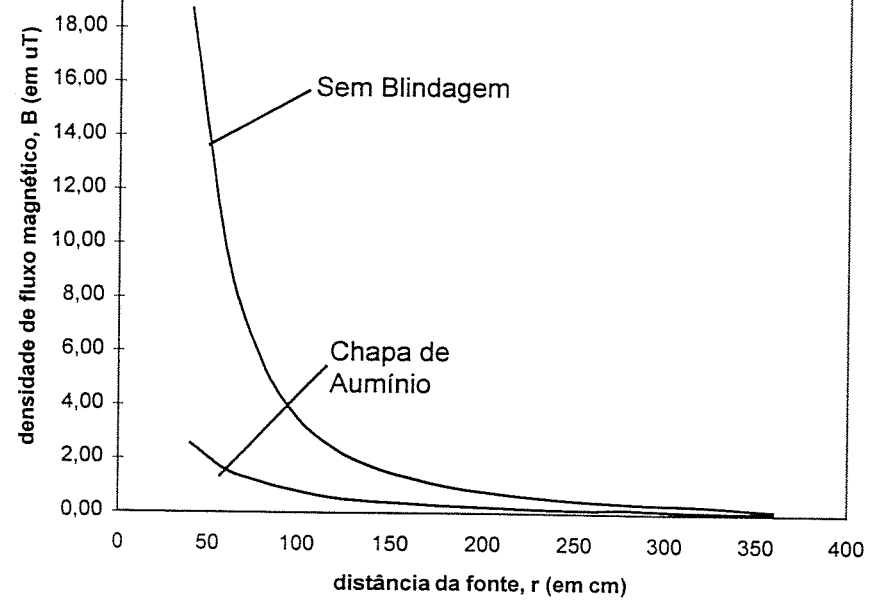


Figura 6.9 - Blindagem da fonte com chapas de alumínio - medição horizontal,  $h = 0$  m.

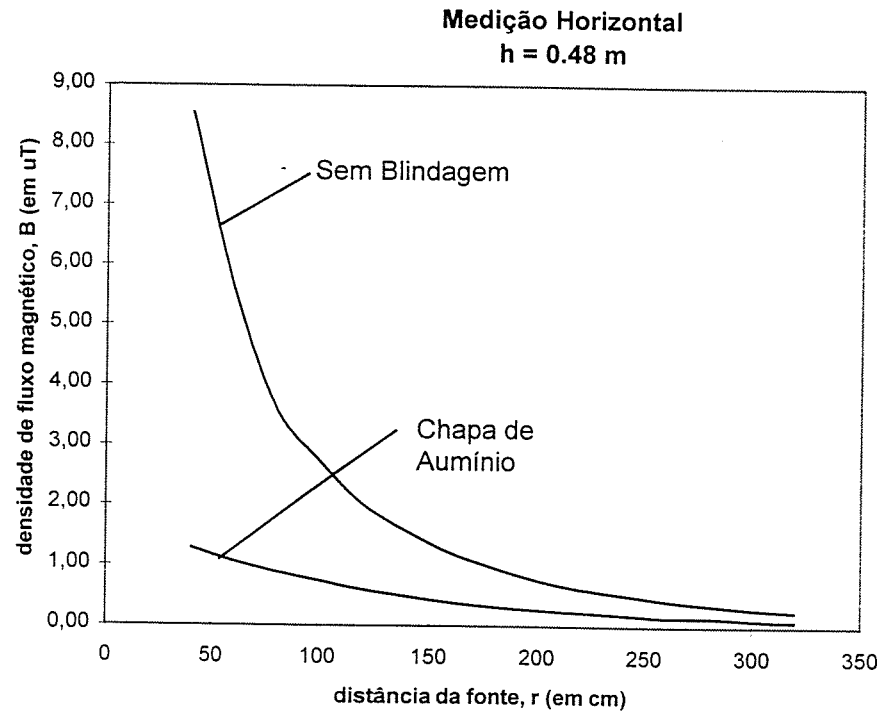


Figura 6.10 - Blindagem da fonte com chapas de alumínio -

### Medição Vertical

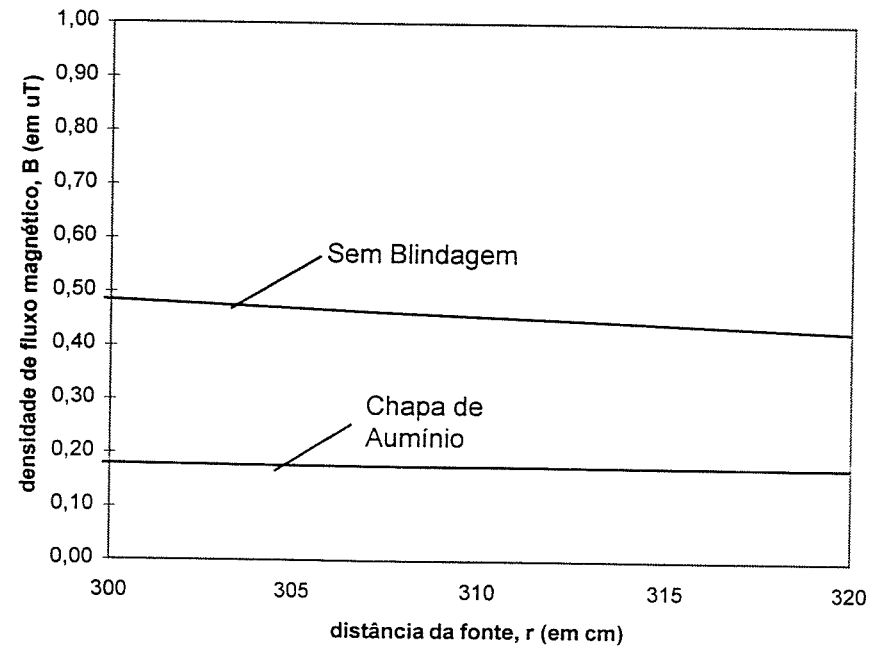


Figura 6.11 - Comportamento de  $B$  para pontos distantes.

As reduções percentuais são mostradas na tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Redução de  $B$  com utilização de chapas de alumínio - em %.

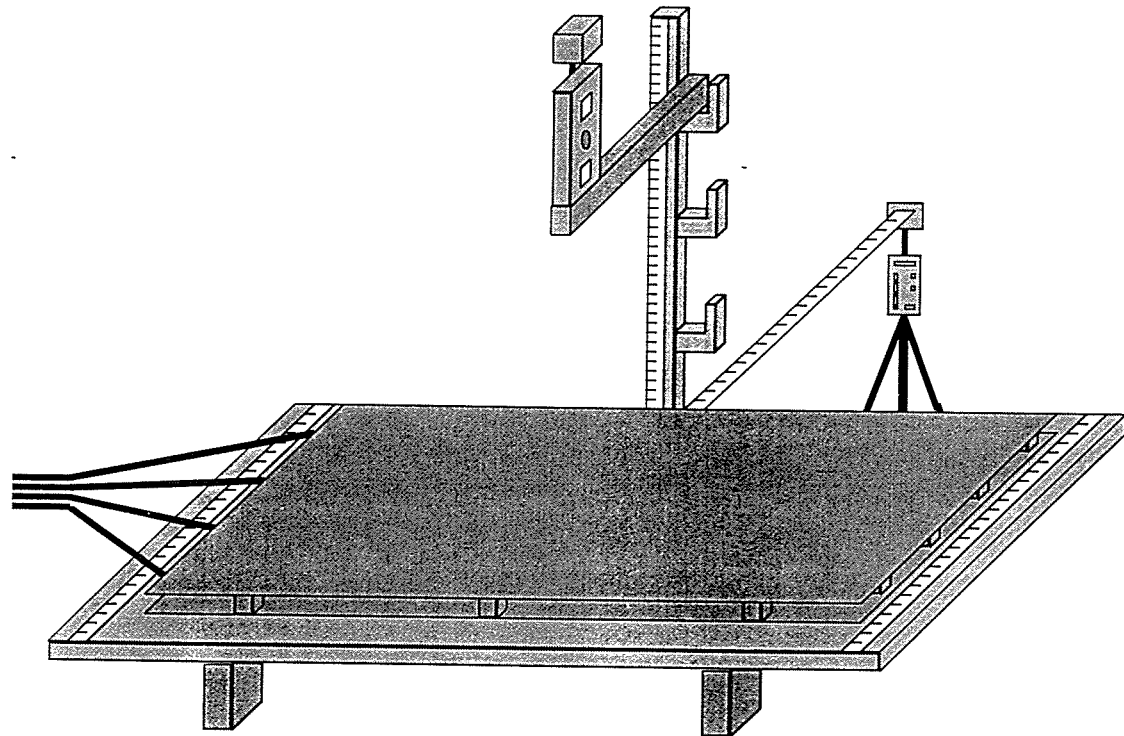
r (cm)	Vertical	Horizontal - h=0	Horizontal - h=0,48
40	85,8%	86,2%	85,0%
80	84,8%	80,0%	75,6%
120	78,5%	76,7%	70,6%
160	73,7%	73,0%	68,0%
200	70,0%	72,6%	65,0%
240	66,6%	72,6%	63,5%
280	64,0%	58,7%	58,5%

valor do campo medido de até 85% para pontos próximos à fonte e de cerca de 60% para pontos mais distantes, conforme observado na tabela 6.2.

### 6.3.1 Utilização de duas chapas de alumínio

Em seguida, foi acrescentada à montagem anterior uma chapa de alumínio sob o barramento trifásico, como mostra a figura 6.12.

Neste caso, foram feitas medições apenas na direção vertical e o espaçamento entre os barramentos foi fixado em 15 cm. A corrente por fase, nesta etapa, foi de 200 A, sendo medida uma corrente no neutro de 9 A.



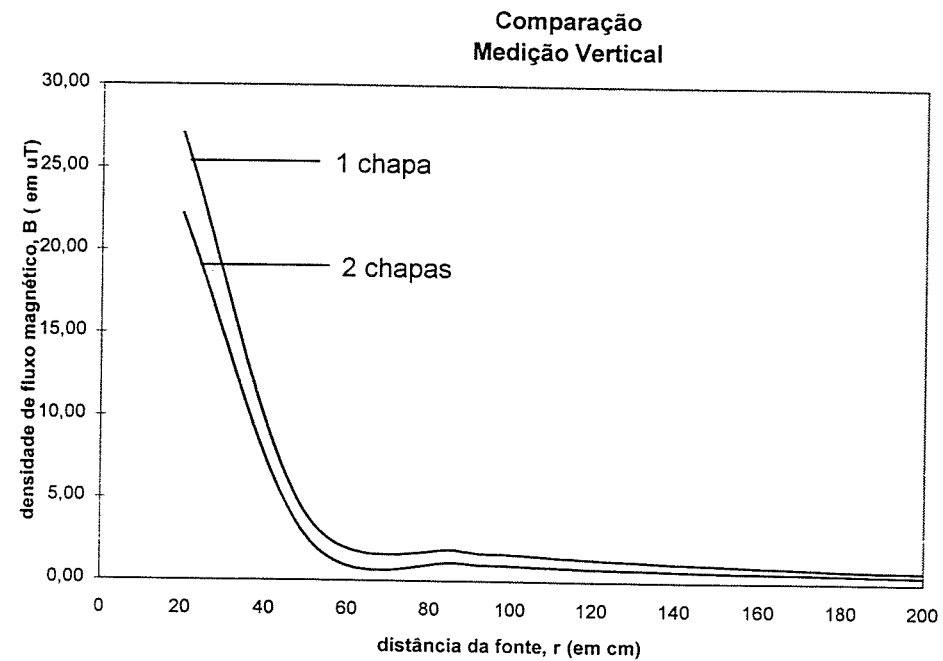


Figura 6.13 - Comparação entre as duas situações de utilização da blindagem com chapas de alumínio.

Observa-se uma semelhança muito grande entre os dois casos. O ganho desta montagem com relação à não utilização da blindagem é de cerca de 90%, ou seja, muito próximo do resultado obtido com apenas uma chapa (aproximadamente 85%). Dessa forma, o ganho com o acréscimo de mais uma chapa na montagem anterior é muito pequeno, não compensando o investimento na utilização de duas chapas para blindagem da fonte.

### 6.3.2 Blindagem em "U"

Há, ainda, a possibilidade de se blindar totalmente o barramento através da confecção de uma caixa metálica ou, ainda, de uma estrutura em "U", conforme mostra a figura 6.14.



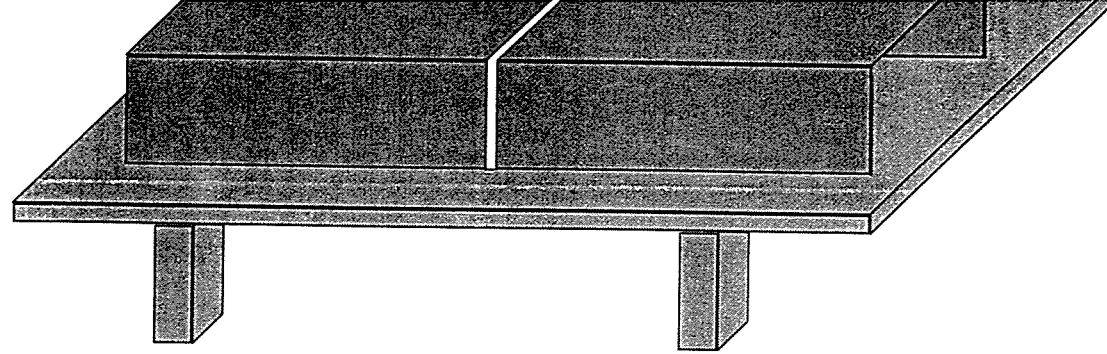
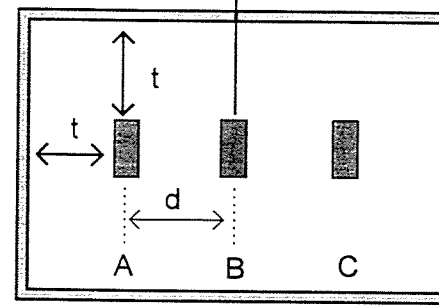


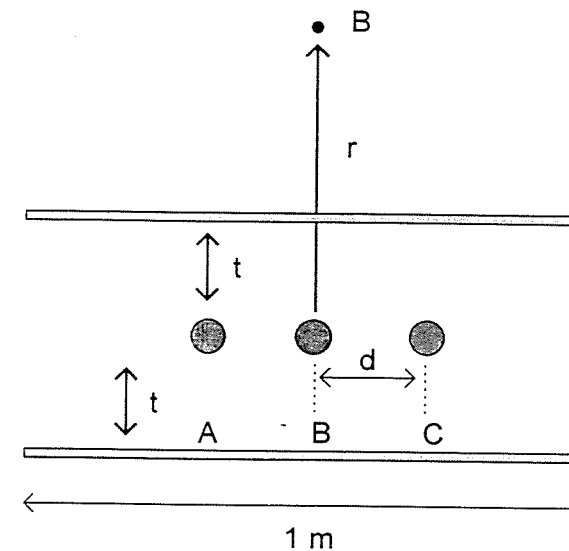
Figura 6.14 - Blindagem em "U".

O custo, no entanto, para a construção de estruturas desse tipo (dobragem da chapa, corte, solda, etc.) é bastante elevado. É interessante, pois, avaliar o ganho que uma estrutura mais complexa poderia oferecer. Para tal, foi feita uma comparação entre os resultados já obtidos da medição deste trabalho com os resultados de Juha [1], que utiliza uma estrutura fechada envolvendo os barramentos. As condições de cada uma dessas situações foram diferentes e são apresentadas na figura 6.15. Apesar de haver diferenças entre as duas condições de medição em questão, pode-se considerar que a aproximação feita para as variáveis  $t$  e  $d$  são bem razoáveis.



$t = 10 \text{ cm}$   
 $d = 14 \text{ cm}$   
 $I = 1000 \text{ A}$

(a)



$t = 8 \text{ cm}$   
 $d = 15 \text{ cm}$   
 $I = 200 \text{ A}$

(b)

Figura 6.15 - (a) condições das medições realizadas em Juha [1];  
 (b) condições das medições deste trabalho.

Para que a comparação entre essas condições fosse possível, foi necessário fazer alguns ajustes nos valores de campo, uma vez que as correntes injetadas foram diferentes nas duas situações. Como o campo é diretamente proporcional à corrente injetada nos barramentos, foi feita uma

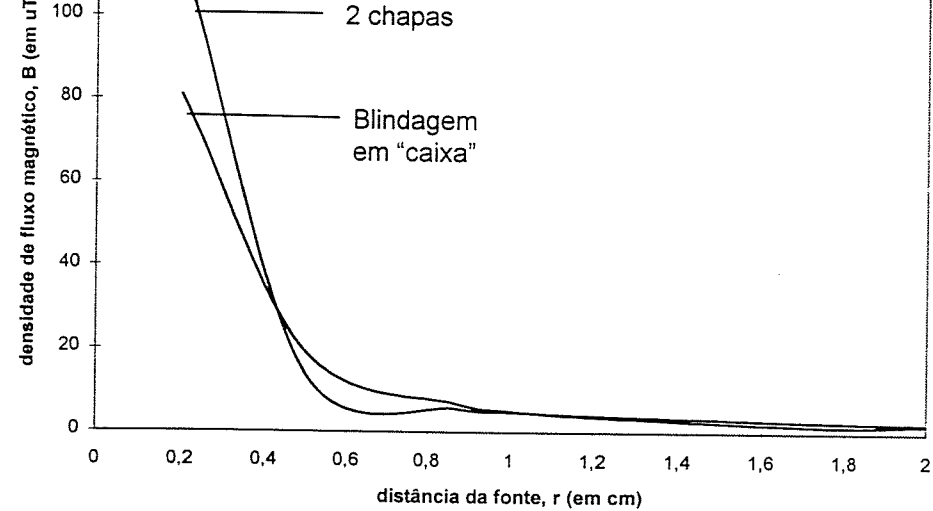


Figura 6.16 - Comparação entre as medições de Juha [1] e deste trabalho.

Verifica-se que, apesar das diferenças observadas na figura 6.16, o comportamento das duas curvas é bastante semelhante e que o ganho obtido com a utilização de uma blindagem totalmente fechada pode ser considerado desprezível se comparado à blindagem com apenas duas chapas. Assim, pode-se afirmar que não compensaria o investimento na construção de uma estrutura fechada ou mesmo em "U", devido ao seu alto custo e baixo ganho. Dessa forma, a opção de construir uma blindagem metálica em uma dessas formas para ser utilizada na bancada experimental foi também descartada.

#### 6.4 *Blindagem do Equipamento*

Uma outra alternativa para redução do campo magnético incidente em um equipamento é a blindagem do mesmo. Para avaliar o efeito da blindagem do equipamento, foi colocada, inicialmente, uma chapa metálica de 2 m x 1 m entre a fonte e o equipamento. O equipamento foi

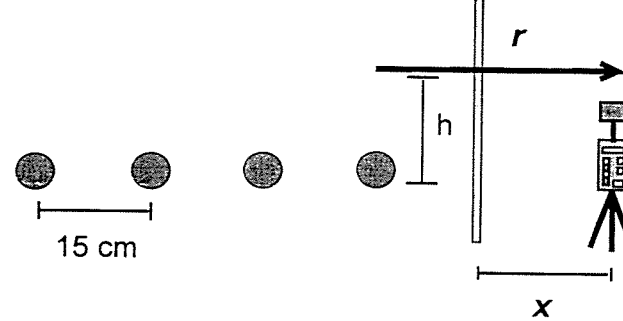


Figura 6.17 - Condições das medições na blindagem do equipamento.

Para cada distância  $r$  da fonte, foi feita uma variação da distância  $x$  entre o ponto de medição e a chapa. A corrente aplicada por fase foi de 140 A, sendo medida uma corrente no neutro de 9 A. A distância entre fases foi de 15 cm e as medições foram feitas apenas na direção horizontal. Os resultados para as medições a 0 m de altura e 0,48 m são apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3 - Resultados das medições com a utilização de uma chapa de alumínio para blindar o equipamento -  $h = 0$  cm.

B ( $\mu$ T)		Chapa de Al						
r (em cm)	S/ Blindagem	x = 50	x = 40	x = 30	x = 20	x = 15	x = 10	x = 5
60	12,14	---	---	---	7,44	7,12	6,68	6,06
100	4,88	3,91	3,76	3,59	3,44	3,32	3,17	3,01
160	1,88	1,63	1,60	1,55	1,50	1,45	1,42	1,35
200	1,16	1,01	0,99	0,97	0,94	0,92	0,90	0,88

r (em cm)	S/ Blindagem	x = 50	x = 40	x = 30	x = 20	x = 15	x = 10	x = 5
60	7,15	---	---	5,83	5,62	5,40	5,17	4,98
100	3,66	3,23	3,23	3,19	3,15	3,10	3,04	2,93
160	1,65	---	1,54	1,52	1,50	1,48	1,45	1,40
200	1,06	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,94	0,92

Os menores valores medidos são para a distância entre o ponto de medição e a chapa,  $x$ , igual a 5 cm, o que indica que quanto mais próximo o equipamento estiver da chapa, maior será a redução do campo. A tabela 6.5 sintetiza as reduções para as diferentes distâncias entre a fonte e o sensor,  $r$ , nas duas alturas de medição quando  $x$  é igual a 5 cm.

Os resultados mostram que, dependendo da altura do sensor, a redução pode ser maior ou menor, sendo que o melhor resultado foi obtido com o sensor na mesma altura da fonte. Além disso, observa-se que a redução torna-se menor para distâncias maiores da fonte. Isso indica que quanto mais próximo o equipamento estiver da chapa e esta estiver da fonte, melhores serão os resultados.

Tabela 6.5 - Redução do campo com a blindagem do equipamento para as duas alturas de medição - chapa colocada a 5 cm do sensor - em %.

r (em cm)	h = 0 cm	h = 48 cm
60	50,0%	30,3%
100	38,3%	19,9%
160	28,2%	15,2%
200	24,1%	13,2%

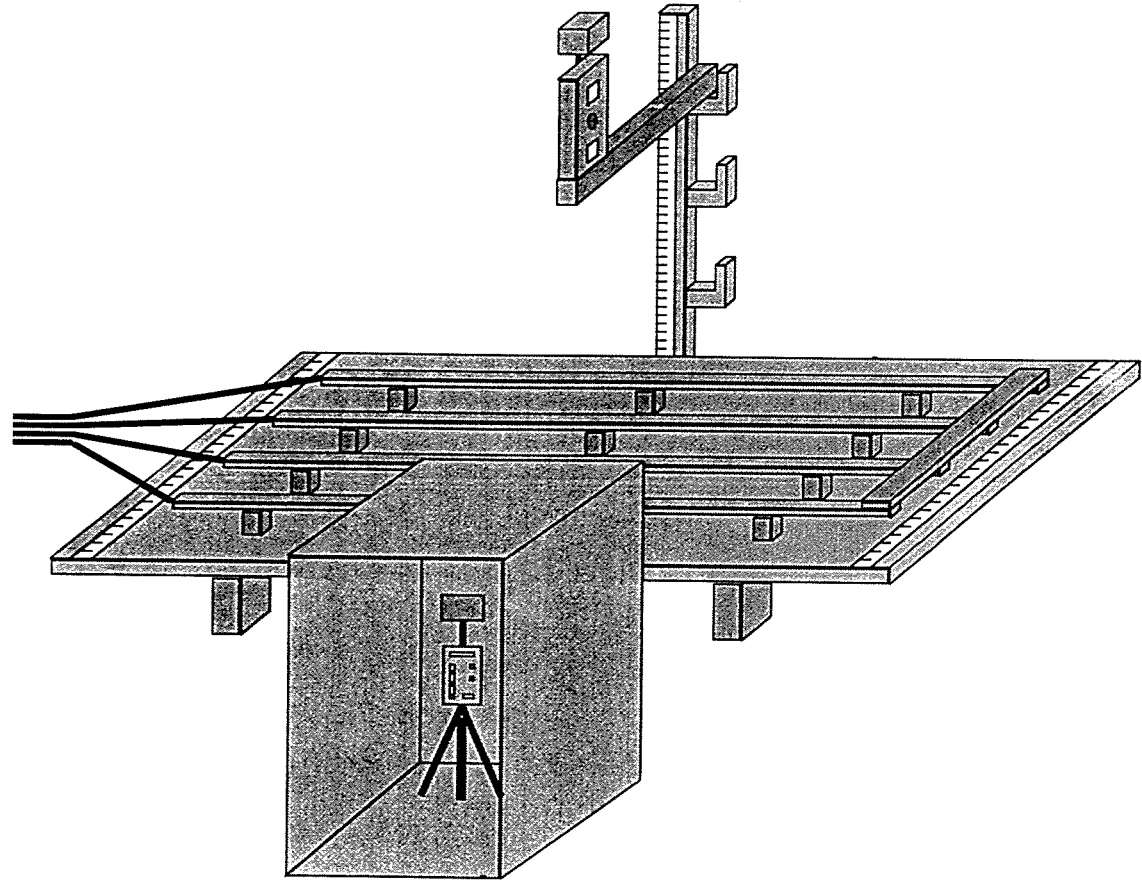


Figura 6.18 - Utilização de uma "caixa metálica" para blindar o equipamento.

Os pontos de medição tomados foram a uma distância de 60 cm da fonte e a alturas de 0 e 48 cm. Os resultados são mostrados na tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Redução obtida com a blindagem do equipamento utilizando uma "caixa metálica".

h	Bmedido ( $\mu T$ )		Redução (%)
	S/ blindagem	"caixa"	
0	12,14	4,16	65,7%

blindagem.

## 6.5 Comparação entre os Resultados Obtidos

A fim de se definir qual das alternativas anteriormente testadas apresenta o melhor resultado, foi feita uma comparação entre elas, apresentada na figura 6.19. As alternativas apresentadas são: alteração da geometria através da aproximação dos condutores e utilização de chapas de alumínio para blindagem da fonte.

A alternativa de blindagem do equipamento não foi apresentada na figura 6.18, uma vez que, para essa situação, não foram realizadas medições na direção vertical.

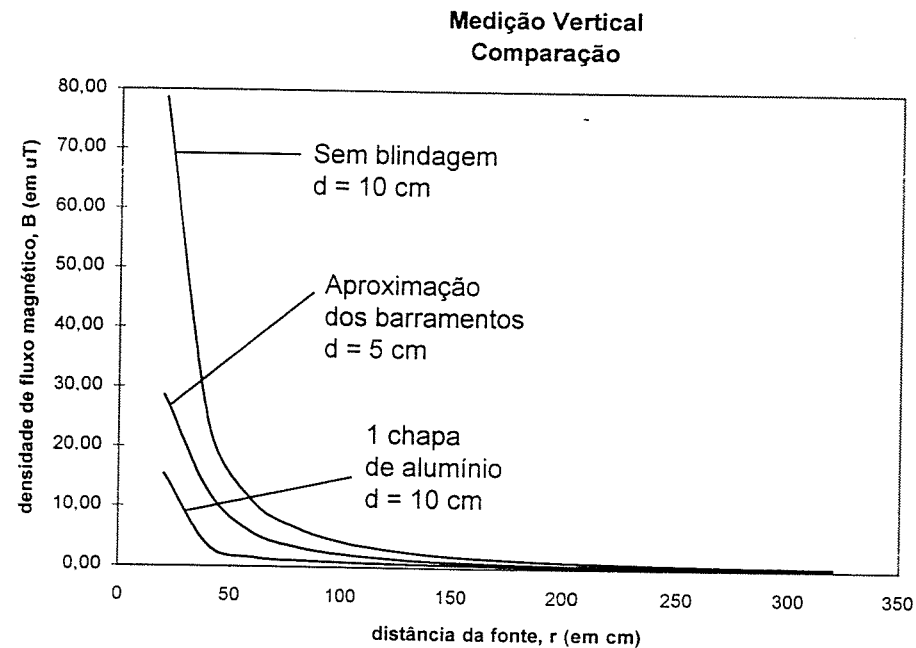


Figura 6.19 - Comparação entre os resultados obtidos.

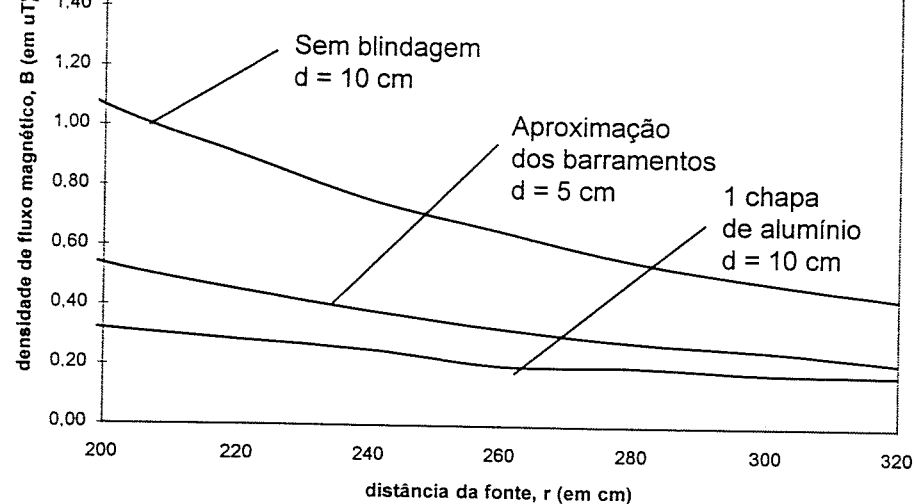


Figura 6.20 - Comparação entre as técnicas de blindagem.

Na figura 6.20, é apresentado o comportamento da densidade de fluxo magnético para pontos mais distantes. Pode-se constatar que, nessa região, a redução relativa da densidade de fluxo magnético com a utilização de chapas de alumínio é bem menor, comparada à redução para pontos próximos à fonte.

A tabela 6.7 sintetiza os ganhos máximos obtidos com as diferentes alternativas implementadas.

Tabela 6.7 - Redução máxima obtida com a utilização das diferentes alternativas.

	Redução Máxima
Alteração da geometria	67,2%
Blindagem da fonte	90,7%
Blindagem do equipamento	65,7%

A maior redução da densidade de fluxo magnético foi encontrada com a utilização de chapas de alumínio, situadas...



barramentos gerou reduções de até 67,2% e a blindagem do equipamento atingiu índices de aproximadamente 66% .

## **6.6 *Blindagem Ativa***

A blindagem ativa é uma alternativa para a redução de campos magnéticos de baixa frequência. Nesta dissertação, foi feito um estudo preliminar de sua utilização, aplicada à bancada experimental.

Para a aplicação da blindagem ativa, os barramentos de alumínio foram substituídos por cabos isolados. Paralelamente ao sistema principal, foi construído um sistema auxiliar com cabos idênticos aos do sistema principal. Além disso, foi projetado e construído um transformador trifásico especificamente para essa aplicação. A montagem realizada pode ser observada na figura 6.21.

Para a construção do transformador, foi utilizado o núcleo de um transformador de 15 kVA de potência cujas bobinas foram retiradas. Para a confecção das novas bobinas foram utilizados os próprios condutores da montagem, fazendo com que as bobinas do primário e as do secundário ficassem dispostas em série com os condutores do sistema principal e auxiliar, respectivamente. As outras terminações das bobinas do secundário foram ligadas em estrela e os condutores do sistema auxiliar tiveram suas extremidades curto-circuitadas. As espiras foram enroladas de tal forma a obter uma relação aproximada de 1:1. O esquema de ligação do transformador pode ser observado na figura 6.22.

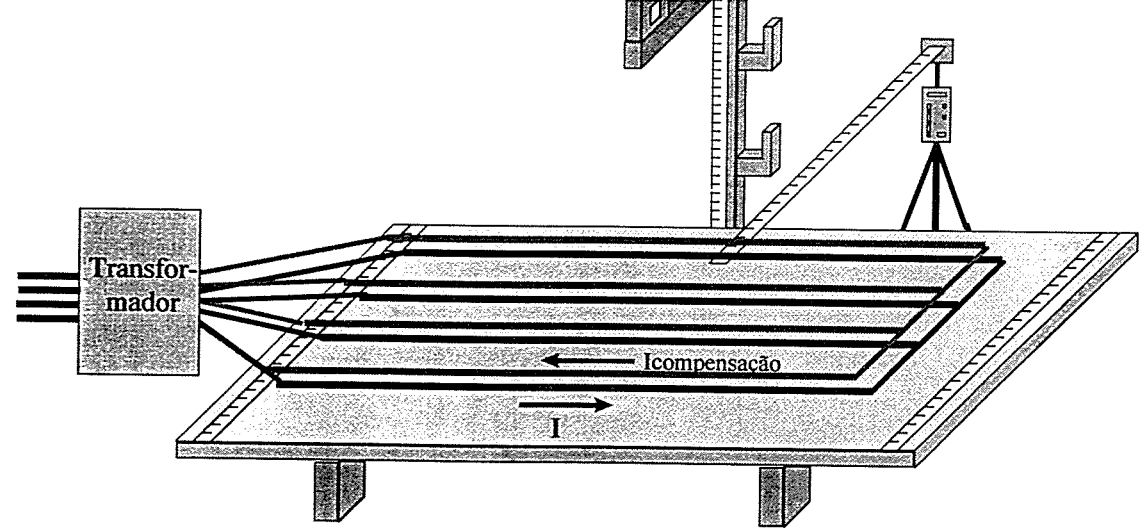


Figura 6.21 - Blindagem ativa.

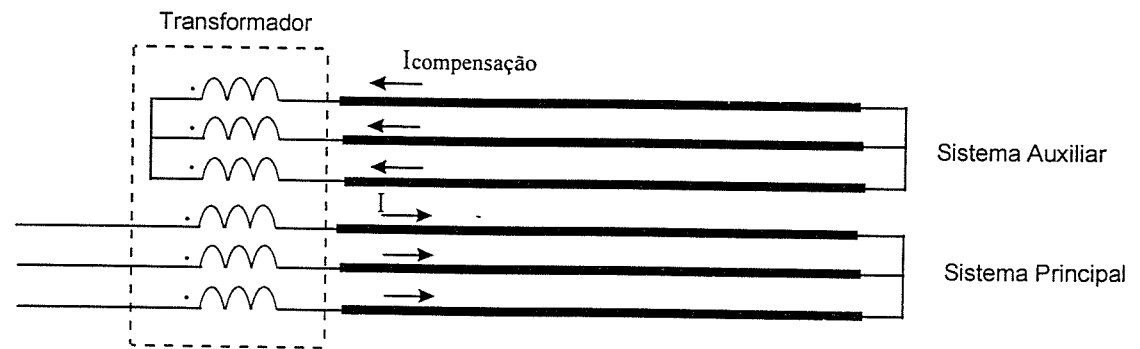


Figura 6.22 - Esquema de ligação da blindagem ativa.

Dessa forma, a partir da circulação de corrente no sistema principal, ou seja, nas bobinas do primário do transformador, são geradas correntes de compensação no secundário do transformador. As espiras do secundário foram enroladas de tal forma a obter correntes de sentido contrário às do sistema principal. Como a relação de transformação é de aproximadamente 1:1, as correntes de compensação são praticamente de mesma intensidade

essa última à mesma altura da fonte. A corrente eficaz medida por fase foi de aproximadamente 40 A. Os resultados são apresentados nas figuras 6.23 e 6.24 e as reduções percentuais nas tabelas 6.8 e 6.9.

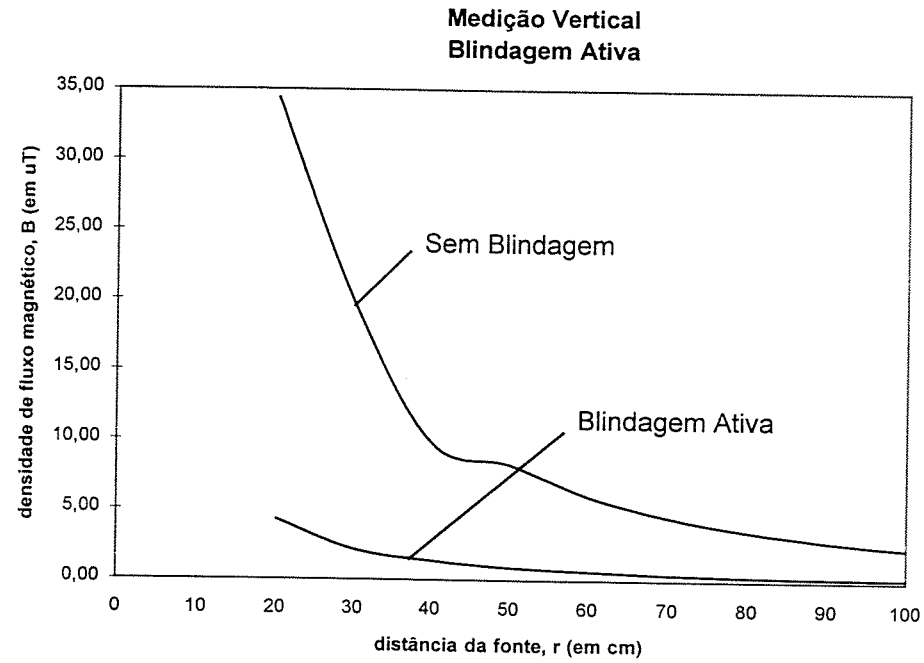


Figura 6.23 - Utilização da blindagem ativa - medição vertical.

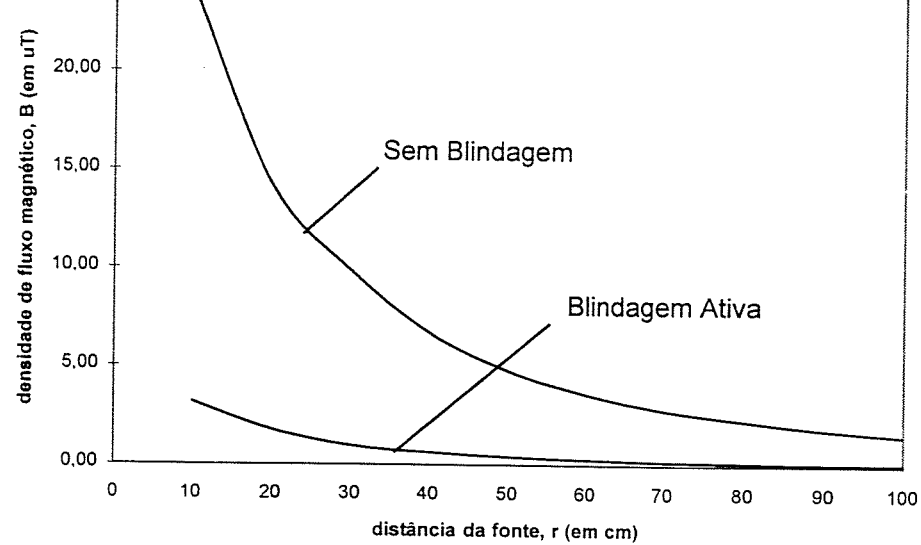


Figura 6.24 - Utilização da blindagem ativa - medição horizontal.

Tabela 6.8 - Valores de  $B$  (em  $\mu T$ ) com a utilização da blindagem ativa e a redução percentual obtida - medição vertical.

$r$ (em cm)	$B_{\text{sem blindagem}}$	$B_{\text{blindagem ativa}}$	redução (%)
20	34,42	4,27	87,58
30	19,80	2,13	89,22
40	9,80	1,35	86,18
50	8,22	0,89	89,16
60	5,99	0,62	89,70
70	4,52	0,44	90,26
80	3,54	0,32	91,06
90	2,84	0,24	91,48
100	2,33	0,20	91,34

10	24,17	3,18	86,85
20	14,20	1,77	87,54
30	9,85	0,94	90,41
40	6,71	0,63	90,64
50	4,79	0,40	91,56
60	3,61	0,26	92,76
70	2,80	0,18	93,57
80	2,26	0,12	94,52
90	1,83	0,08	95,66
100	1,52	0,07	95,13

A partir dos resultados apresentados, observa-se que os ganhos obtidos com a utilização da blindagem ativa foram superiores a todas as outras técnicas até aqui estudadas. Na direção vertical, as reduções situam-se na faixa de 90% e, na direção horizontal, os ganhos chegam a aproximadamente 96%. É importante observar que a redução percentual mantém-se elevada para as várias distâncias de medição, diferentemente da blindagem da fonte com chapas de alumínio, cujos resultados mostraram um decréscimo da redução percentual à medida em que a distância da fonte aumentava.

Vale salientar que o valor do campo ambiente nessas medições foi igual a aproximadamente  $0,07 \mu\text{T}$ . Observando a tabela 6.9, verifica-se que, na medição horizontal, a partir da distância de 90 cm da fonte, o valor do campo medido foi praticamente igual ao valor do campo ambiente, indicando que a blindagem ativa realmente apresentou um alto fator de blindagem, uma vez que o campo proveniente da fonte foi reduzido para um valor próximo ao do campo ambiente.

Vale ressaltar que o sistema trifásico considerado neste trabalho apresentava um fator de potência unitário, uma vez que nenhuma carga indutiva ou capacitiva foi inserida no sistema. A influência de um fator de potência diferente do unitário na eficiência da blindagem ativa não foi estudada neste trabalho. Dessa forma, a variação do fator de potência do sistema é um tópico a ser investigado em trabalhos futuros.

## ***6.7 Análise dos Resultados***

Foram apresentados, neste capítulo, os resultados obtidos com a utilização de diferentes técnicas de blindagem para campos magnéticos de baixa frequência. Com relação às técnicas de blindagem passiva utilizadas, alguns pontos interessantes podem ser ressaltados.

Ao se tratar da redução dos valores de campo magnético de baixa frequência para pontos bem próximos à fonte (até aproximadamente 1 m), a utilização da blindagem com chapas metálicas mostrou-se bastante eficiente, com reduções em torno de 80%, atingindo 90% a 40 cm da fonte. Esses resultados indicam que, dependendo dos níveis de campo, problemas de interferência bem próximos à fonte podem vir a ser solucionados com essa técnica. As reduções obtidas com a alteração da geometria e a blindagem do equipamento foram bem inferiores, situando-se em torno de 67%.

Entretanto, para pontos mais distantes da fonte, a utilização de chapas metálicas apresentou resultados menos eficientes, uma vez que as reduções situaram-se na faixa de 60 a 70%, assim como as outras técnicas.

Dessa forma, as técnicas de blindagem passiva utilizadas podem não ser suficientes para resolver problemas de interferência que necessitem de

reduções significativas em todos os pontos de medição tomados. As reduções obtidas atingiram 96% a 1 m da fonte, o que indica um ganho bastante superior aos anteriormente encontrados. Além disso, a blindagem ativa foi a única alternativa que praticamente zerou o valor do campo proveniente da fonte. Assim, mesmo que o estudo da blindagem ativa tenha sido breve, ele indica que resultados eficazes podem vir a ser alcançados com a sua utilização.

Vale salientar, ainda, que a escolha da técnica de blindagem a ser utilizada dependerá de cada problema em estudo, bem como dos níveis de campo requeridos. Algumas vezes, a simples alteração da geometria do sistema pode ser suficiente para atingir valores de campo que eliminem um problema de interferência.

# 7 Conclusões

A partir do desenvolvimento deste trabalho e dos resultados apresentados, pode-se concluir que seu objetivo básico, ou seja, o estudo de algumas técnicas de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência e suas aplicações foi satisfatoriamente atingido.

O estudo da blindagem magnética de 60 Hz é uma nova área em desenvolvimento na UFMG, sendo encontrada uma bibliografia restrita e poucos trabalhos experimentais. Dessa forma, este trabalho possibilitou um maior conhecimento desta área, bem como a coleta de resultados experimentais importantes para o aprofundamento do assunto.

Foi construída, para este trabalho, uma bancada experimental que permite que experimentos de aplicação de técnicas de blindagem sejam feitos com praticidade e precisão. Essa bancada será utilizada para aulas práticas de alunos de graduação da disciplina Compatibilidade Eletromagnética.

A partir dos resultados obtidos, pode-se considerar que as medições realizadas foram de boa qualidade, sendo obtidas a partir da construção de um sensor de baixo custo e boa precisão. Foi possível, ainda, a obtenção de uma maior sensibilidade com relação à medição de campos magnéticos de 60 Hz.

Com relação às técnicas utilizadas, pode-se concluir que a blindagem metálica com chapas de alumínio proporcionou redução significativa



custo e, muitas vezes, complexa implementação. Já a alteração da geometria do sistema apresentou uma aplicação bastante restrita, dado seu baixo fator de blindagem.

A blindagem ativa surge como uma boa alternativa para blindagem de campos magnéticos de 60 Hz. Embora o estudo realizado tenha sido bastante breve, ele indica que bons resultados podem ser atingidos com a sua utilização, uma vez que altos índices de redução foram alcançados para todos os pontos de medição tomados. Entretanto, estudos mais profundos precisam ser desenvolvidos para que a viabilização dessa técnica seja comprovada. Nesse sentido, sugere-se que um estudo mais abrangente e genérico seja realizado.

### **7.1 *Propostas de Continuidade***

A utilização de materiais ferromagnéticos na aplicação da blindagem metálica é um assunto que não foi discutido nesta dissertação. A variação do material utilizado, buscando avaliar seus efeitos na redução dos níveis de campo magnético de 60 Hz, é um assunto interessante a ser estudado.

Entretanto, tudo indica que o maior investimento deva ser feito em direção à aplicação da blindagem ativa. Com esse objetivo, estudos mais aprofundados e completos devem ser desenvolvidos.

Como já dito anteriormente, o sistema trifásico estudado na bancada experimental foi praticamente equilibrado. Em nenhum momento, os efeitos de um desequilíbrio de cargas foi avaliado no estudo experimental, mas apenas no estudo computacional desenvolvido. Essa avaliação torna-se necessária, uma vez que ela representa uma melhor aproximação de situações reais.

investigado. Se preciso, novas variantes da blindagem ativa devem ser apontadas.

Finalmente, a viabilidade da implementação de técnicas de blindagem ativa em situações reais deve ser analisada, além da especificação dos componentes e da forma de instalação da mesma.

# Bibliográficas

- [1] - JUHA, TIKKANEN; ESA, VIRTANEN, "*Campos Magnéticos Causados por Postos de Transformação Internos*", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 119-128, Abril de 1996.
- [2] - PAULINO, J.O.S., "Análise do Problema de Interferência Eletromagnética no Prédio Lopes Quintas da Rede Globo de Televisão no Município do Rio de Janeiro", *Relatório Técnico - Tesla Kascher/FCO/EEUFMG*, 1997.
- [3] - PAULINO, J.O.S., "Cálculo, Projeto e Especificação de um Sistema de Blindagem para Cabos de Baixa Tensão com o Objetivo de Eliminar Interferências em Telas de Vídeo de Microcomputadores", *Relatório Técnico - CEMIG/FCO/EEUFMG*, 1997.
- [4] - HENSCHER, M.; ZEMANN, E., "Large Scale Measurements of Low Frequency Electromagnetic Fields in Berlin and Field Reducing Activities in Power Stations". *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Italy, September 17 - 20, 1996, p. 840-845.

- [6] - EHRICH, M.; KUHLMANN, J.; NETZLER, D., "Models of a Cable Bunch Formed by Twisted Three-phase Cables". *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, China, September 17 - 20, 1997, p. 463-466.
- [7] - GOEDBLOED, J.J., "*Electromagnetic Compatibility*", Philips Research Laboratories, Eindhoven - translated by Tom Holmes, Prentice Hall, 1990.
- [8] - PAUL, C. R., "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*", Department of Electrical Engineering - University of Kentucky, Lexington. A Wiley-Interscience Publication, 1992.
- [9] - MARTINS, M.C.V., "*Interferências - Distorções nas Imagens de Terminais de Vídeo*", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 166-168, Junho de 1995.
- [10] - FRIX, W.M.; KARADY, G.G., "A Circuital Approach to Estimate the Magnetic Field Reduction of Nonferrous Metal Shields", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, no. 1, pp. 24 - 32, February, 1997.
- [11] - HILES, M.L.; OLSEN, R.G.; HOLTE, K.C.; JENSEN, D.R.; GRIFFING, K.L., "Power Frequency Magnetic Field Management Using a Combination of Active and Passive Shielding Technology", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 171 - 179, January, 1998.

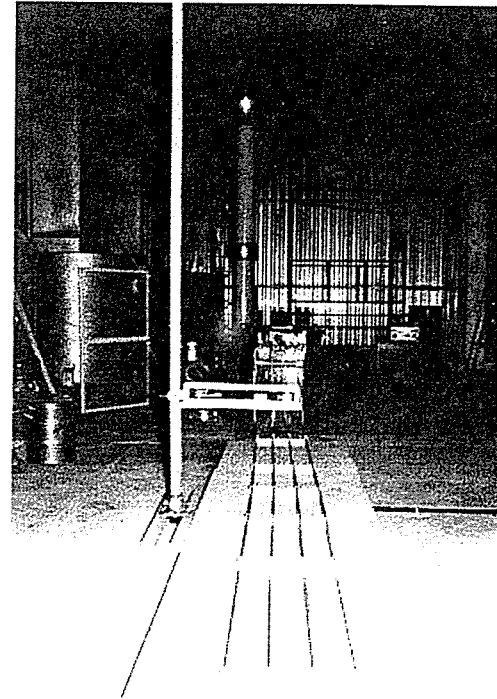
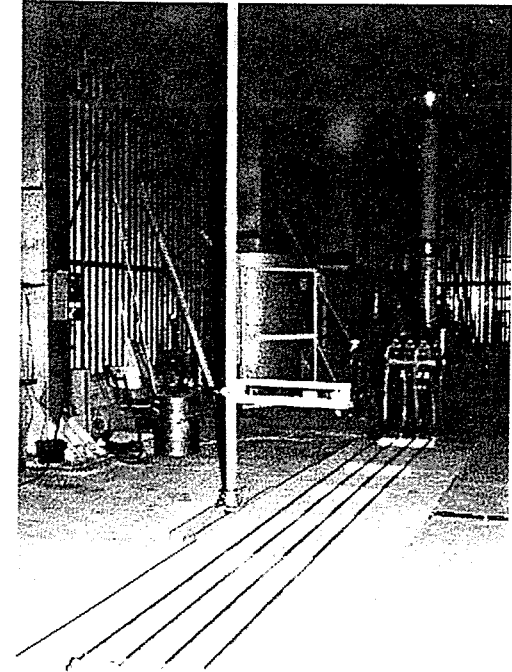
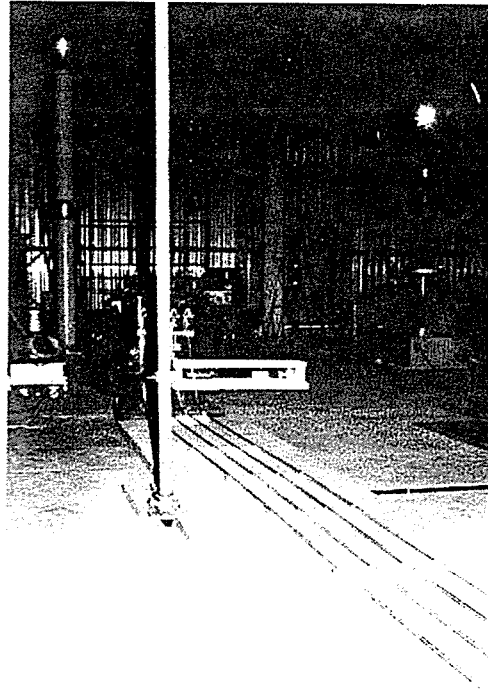
*Cable Systems*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 647 - 654, April, 1998.

- [13] - SOBRAL, S.T.; LAMY, S.L.; OLESKO, J.E.; RESENDE, D.S., "*Controle de Interferência e Compatibilidade Eletromagnética em Subestações*", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 90 - 99, Janeiro de 1996.
- [14] - RASHKES, V.S.; LORDAN, R., "*Magnetic Field Reduction Methods: Efficiency and Cost*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 552 - 559, April, 1998.
- [15] - TSANAKAS, D.; TSALEMIS, D.; AGORIS, D.; VOJAZAKIS, J., "*Optimum Arrangements of the Phase Conductors of Overhead Transmission Lines for the Magnetic Field Minimization*", Cigrè Report 36 - 101, 23 August - 3 September, 1994.
- [16] - SCHROEDER, M.A.O., "Concepção de um Sistema para Extração de Energia Elétrica de Linhas de Transmissão através de Acoplamento Magnético", *Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 1996.
- [17] - PLONSEY, R.; COLLIN, R.E., "*Principles and Applications of Electromagnetic Fields*", Tata Mc-Graw-Hill Publishing Company LTD, New Delhi, 1973.
- [18] - KOHLER, W., "Measurement and Calculation of Low Frequency Electric and Magnetic Fields" *IX International Symposium on High Voltage*

[20] - KRAUS, J.D.; CARVER, K.R., "*Eletromagnetismo*", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.

[21] - Manual do instrumento medidor de campo, *EFA-3*, fabricado pela *Wandell & Goltermann*, utilizado para medição de campos elétricos e magnéticos de baixa frequência na faixa de 5 Hz a 30 kHz.

# Fotos da Bancada Experimental



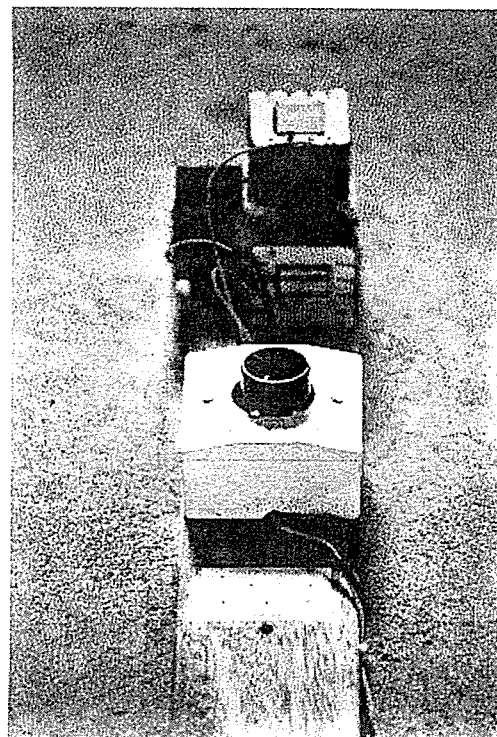
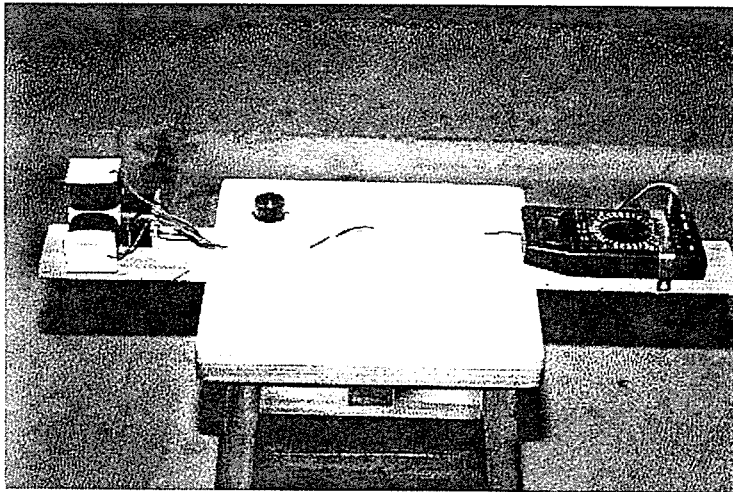


Figura 2. Sensor de campo magnético construído



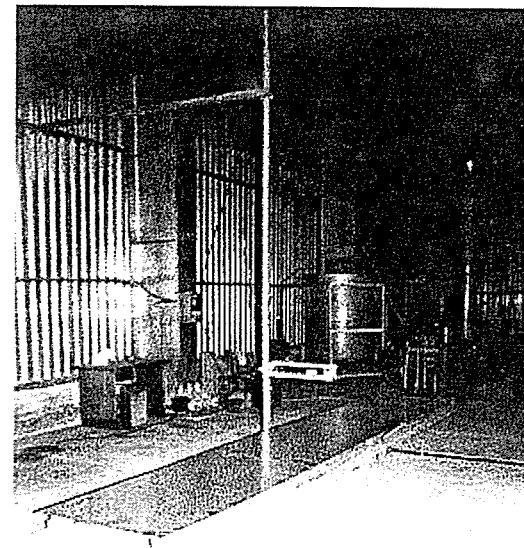
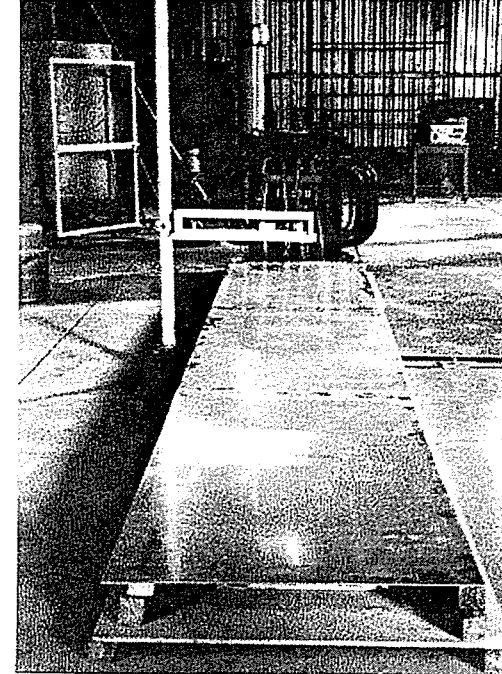


Figura 6 - Blindagem da fonte com chapas de alumínio

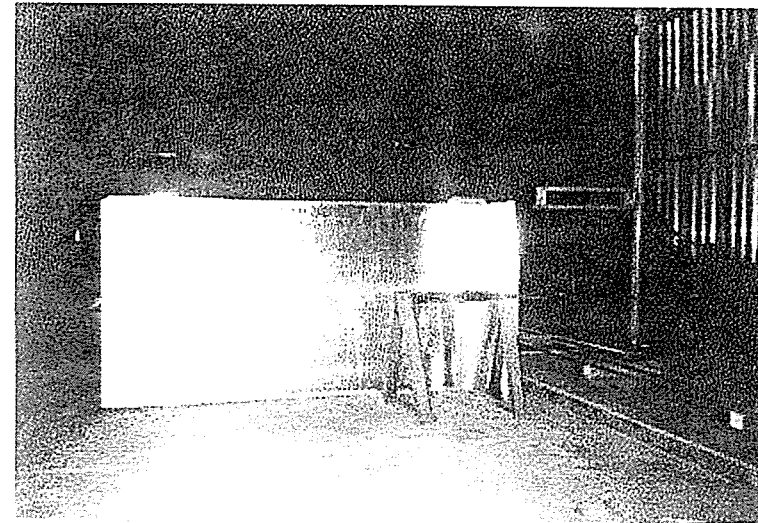
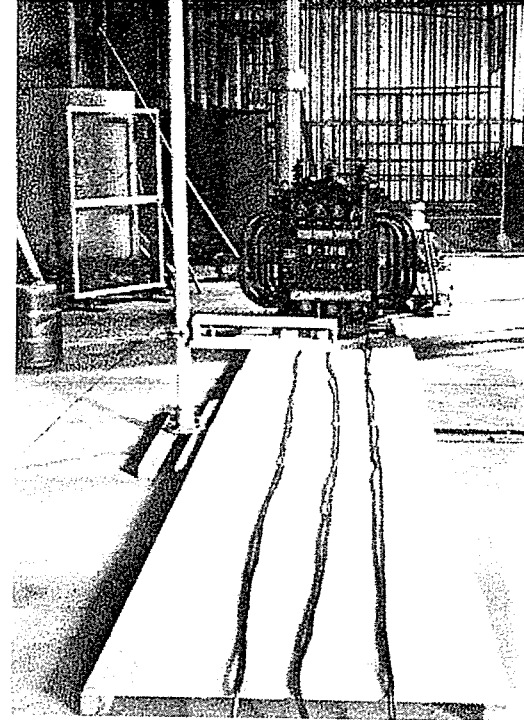
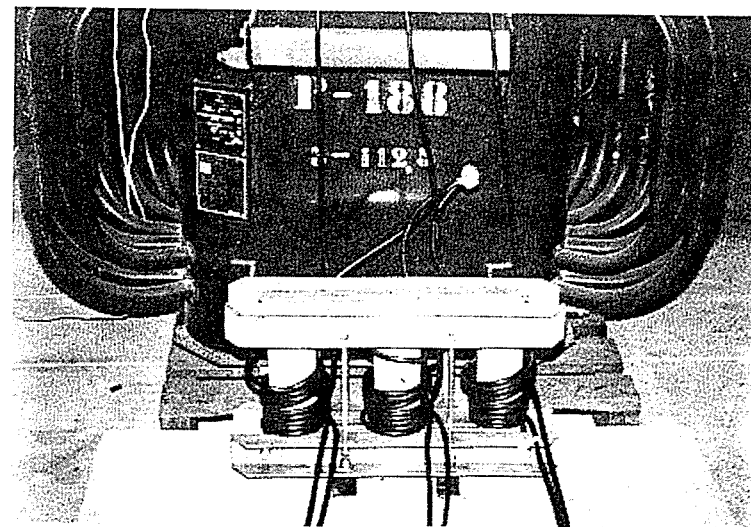


Figura a.4 - Blindagem do equipamento com chapas de alumínio.



(a)



(b)

Figura a.5 - Aplicação da blindagem ativa: