

Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BLINDAGEM ATIVA PARA CAMPOS MAGNÉTICOS  
EM BAIXA FREQUÊNCIA

Marisa Lages Murta

Orientador: José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte – MG  
Outubro de 2002

TESE DE DOUTORADO Nº 024

**BLINDAGEM ATIVA PARA CAMPOS MAGNÉTICOS  
EM BAIXA FREQUÊNCIA**

*Marisa Lages Murta*

DATA DA DEFESA: 11.10.2002

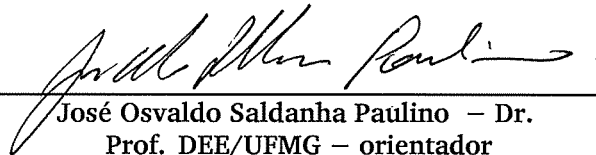
"BLINDAGEM ATIVA PARA CAMPOS  
MAGNÉTICOS EM BAIXA FREQUÊNCIA"

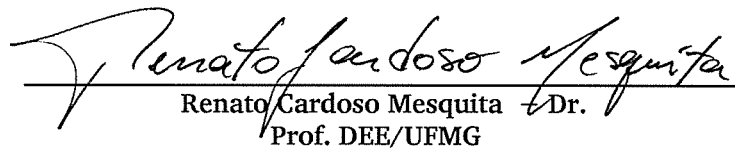
MARISA LAGES MURTA

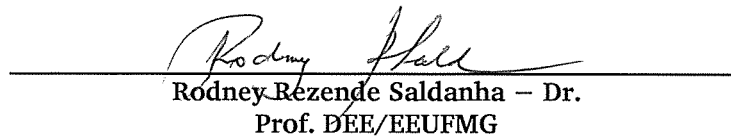
Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

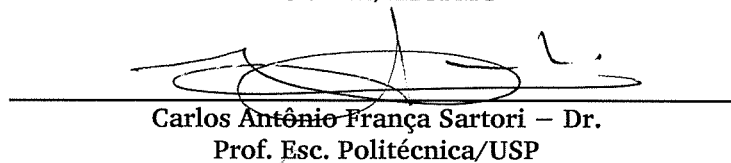
Aprovada em 11 de outubro de 2002.

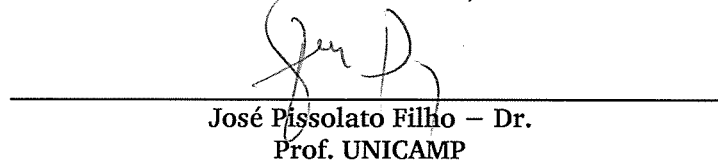
Por:

  
José Osvaldo Saldanha Paulino – Dr.  
Prof. DEE/UFMG – orientador

  
Renato Cardoso Mesquita – Dr.  
Prof. DEE/UFMG

  
Rodney Rezende Saldanha – Dr.  
Prof. DEE/EEUFMG

  
Carlos Antônio França Sartori – Dr.  
Prof. Esc. Politécnica/USP

  
José Pissolato Filho – Dr.  
Prof. UNICAMP

## **Resumo**

As técnicas existentes para redução de campos magnéticos em 60 Hz, tais como utilização de materiais metálicos e alteração da configuração do sistema, são, muitas vezes, ineficientes ou de alto custo. A busca de uma solução que seja, ao mesmo tempo, técnica e economicamente viável torna-se, assim, uma questão de grande relevância.

Dois aspectos principais são avaliados quanto à necessidade de redução de campos magnéticos em baixa frequência: minimização dos níveis aos quais seres vivos encontram-se expostos e eliminação de problemas de interferência. Nesse contexto, este trabalho apresenta a blindagem ativa como alternativa para a redução de campos magnéticos em baixa frequência.

É proposta uma técnica de blindagem ativa para aplicação em sistemas de baixa tensão, baseada na construção de um sistema auxiliar para geração de campos magnéticos que contrariem a fonte de campo original. Para testar sua eficiência, foi construída uma bancada experimental e medições da densidade de fluxo magnético foram realizadas em diferentes condições da fonte de campo. Comparações com outras técnicas, tais como a utilização de materiais ferrosos e não ferrosos para a blindagem da fonte, indicam que a blindagem ativa pode ser uma boa alternativa para redução de campos magnéticos em 60 Hz.

A aplicação da blindagem ativa foi especialmente avaliada para sistemas de alta tensão, mais especificamente as linhas de transmissão. Buscando determinar os parâmetros da blindagem ativa que resultassem na maior redução de campo magnético, foi desenvolvido um programa de otimização. Além disso, as perdas inseridas pela blindagem ativa no sistema original foram avaliadas.

Finalmente, vale ressaltar a importância das linhas de transmissão subterrâneas como significativas fontes de campos magnéticos para o meio ambiente, que têm sido ignoradas pela maioria dos estudos relativos a este tema. O intenso crescimento do número de linhas de transmissão subterrâneas, juntamente com o uso de artifícios buscando o aumento de sua capacidade de transmissão, indicam que técnicas de redução de campo podem ser necessárias em um futuro próximo.

## ***Abstract***

Nowadays, there is an increased public concern about possible health hazards due to the exposure to low frequency magnetic fields. Besides, the number of reports concerning low frequency electromagnetic interference has been significantly increased.

Although there are some methods to reduce the magnetic field values, the existing solutions are usually very expensive and several times the desired reduction is not achieved. The most common techniques used to reduce the magnetic field levels are: changing the system's configuration, using metal plates for shielding the source and/or the equipment and the active shielding.

This work presents the study of active shielding as a technique for low frequency magnetic field reduction. A prototype was built to test the proposed shielding technique and a commercial sensor was used for measurements. Results show that magnetic field from the source can be neglected for relatively short distances, when active shielding is used.

Magnetic fields in the vicinity of power facilities have been extensively surveyed in the past few years. Overhead transmission lines and underground transmission cables have been identified as significant sources of magnetic fields. So, active shielding was studied to reduce magnetic fields generated from transmission lines. An optimization program was developed to determine the active shielding parameters, such as conductors' location and current per phase. Losses of the proposed technique were calculated for some typical overhead transmission lines.

Underground transmission lines are a very important source of 60 Hz magnetic fields. The area of magnetic field reduction techniques for underground cables is a recent area of research and it has not received much attention from researchers and utility engineers. Active shielding applied to underground transmission lines was evaluated. The optimization program was used to determine the technique parameters and losses are calculated.

## ***Agradecimentos***

Ao amigo e professor José Osvaldo Saldanha Paulino, exemplo de vida e profissão, pelo incentivo e orientação em todas as etapas deste trabalho;

Aos funcionários Alisson, Hudson, José Luis e Sergio Edmundo, pelo apoio indispensável na realização dos experimentos;

À equipe técnica da CEMIG, pelo apoio indispensável na realização das medições e pela troca de informações durante as várias fases deste trabalho, especialmente aos colegas Gernan Edson de Oliveira, Edino Barbosa Giudice Filho, Roberto Marcio Coutinho, Rubens de Souza Campos, Francisco de Castro Junior e Luis Fernando Dias.

Aos professores Antônio Emílio Angueth Araújo, Rodney Resende Saldanha e Walmir Matos Caminhas pelas discussões nas várias etapas deste trabalho;

A todos os colegas e amigos do CPDEE, especialmente Gustavo Guimarães Parma, Joaquim Paulo da Silva, José Hissa Ferreira, Maria Luisa Grossi Vieira Santos, Moacir de Souza Jr., Rojane de Castro Batista e Tarcisio de Oliveira Santos;

Aos amigos da CVX (Comunidade de Vida Cristã) *Diakonia* pelo incentivo constante;

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

À Fapemig e ao Fundo Fundep pelo suporte financeiro;

À empresa Tesla-Kascher pelo suporte técnico e financeiro.

# Sumário

|   |            |
|---|------------|
| <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 Os Campos Eletromagnéticos e o Meio Ambiente                    | 1          |
| 1.2 Campos Magnéticos em 60 Hz                                      | 3          |
| 1.3 Objetivo  | 5          |
| 1.4 Organização do Texto  | 6          |
| <b>2 – Blindagem Ativa em Sistemas de Baixa Tensão</b>              | <b>8</b>   |
| 2.1 Introdução  | 8          |
| 2.2 Métodos de Blindagem de Campos Magnéticos em 60 Hz              | 9          |
| 2.3 A Blindagem Ativa   | 10         |
| 2.4 Bancada Experimental e Sensor de Campo                          | 12         |
| 2.5 Blindagem Ativa x Uso de Chapas Metálicas                       | 14         |
| 2.6 Estudo Experimental do Efeito de Carga                          | 20         |
| 2.6.1 Sistema monofásico  | 22         |
| (a) avaliação da influência da blindagem ativa no sistema principal | 22         |
| (b) compensação da blindagem ativa                                  | 23         |
| 2.6.2 Sistema trifásico   | 25         |
| (a) carga resistiva   | 25         |
| (b) carga indutiva  | 26         |
| (c) carga não-linear  | 27         |
| (d) carga mista   | 28         |
| 2.7 Considerações Finais  | 31         |
| <b>3 – Linhas de Transmissão como Fontes de Campo Magnético</b>     | <b>33</b>  |
| 3.1 Introdução  | 33         |
| 3.2 Efeitos Biológicos de Campos Magnéticos em 60 Hz                | 33         |
| 3.3 Campos Magnéticos nas Proximidades de Linhas de Transmissão     | 35         |
| 3.4 Medições nas Proximidades de Linhas de Transmissão Aéreas       | 38         |
| 3.4.1 Linhas de transmissão de 345 kV                               | 39         |
| 3.4.2 Linha de transmissão de 500 kV                                | 41         |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.5 Métodos para Redução de Campos Magnéticos em Linhas de Transmissão         |           |
| Aéreas   | 43        |
| 3.5.1 Alteração da configuração dos condutores                                 | 43        |
| 3.5.2 Blindagem passiva  | 44        |
| 3.5.3 Blindagem ativa  | 46        |
| 3.6 Considerações Finais   | 48        |
| <b>4 – Blindagem Ativa em Linhas de Transmissão Aéreas</b>                     | <b>50</b> |
| 4.1 Introdução   | 50        |
| 4.2 Redução do Campo Magnético com a Blindagem Ativa                           | 50        |
| 4.3 A Otimização Aplicada à Blindagem Ativa                                    | 53        |
| 4.3.1 Definição do problema  | 53        |
| (a) variáveis do problema  | 54        |
| (b) restrições   | 55        |
| (c) função objetivo  | 55        |
| 4.3.2 Método utilizado   | 57        |
| 4.3.3 Exemplo de aplicação   | 58        |
| (a) disposição dos condutores sobre as fases                                   | 58        |
| (b) aproveitamento dos cabos pára-raios  | 61        |
| (c) disposição dos condutores sob as fases                                     | 63        |
| 4.4 Influência da Blindagem Ativa na Linha de Transmissão                      | 66        |
| 4.4.1 Modelagem do sistema   | 67        |
| 4.4.2 LT monofásica  | 69        |
| (a) variação dos parâmetros da linha   | 70        |
| (b) cálculo das perdas   | 72        |
| 4.4.3 LT trifásica   | 74        |
| (a) variação dos parâmetros da linha   | 75        |
| (b) cálculo das perdas   | 76        |
| 4.5 Considerações Finais   | 80        |
| <b>5 – Linhas de Transmissão Subterrâneas</b>                                  | <b>82</b> |
| 5.1 Introdução   | 82        |
| 5.2 As Linhas de Transmissão Subterrâneas como Fontes de Campo Eletromagnético | 82        |
| 5.3 Linha de Transmissão Aérea ou Subterrânea?                                 | 83        |
| 5.4 Principais Características das LTS   | 85        |
| 5.4.1 Tipos de cabos   | 85        |

---



---

|  |            |
|--|------------|
| (a) cabo oleostático (PIPE)  | 86         |
| (b) cabo a óleo fluido (OF)  | 86         |
| (c) cabo isolado com dielétrico sólido (extrudado)                                 | 87         |
| 5.4.2 Métodos de instalação  | 87         |
| (a) métodos convencionais  | 87         |
| (b) métodos não destrutivos  | 88         |
| 5.4.3 Configuração dos cabos   | 88         |
| 5.4.4 Sistema de aterramento   | 89         |
| 5.4.5 Melhorias na dissipação térmica  | 89         |
| (a) alteração da resistência térmica do terreno                                    | 90         |
| (b) resfriamento forçado   | 91         |
| (c) monitoramento da temperatura do cabo   | 92         |
| 5.5 A Transmissão Subterrânea no Brasil e no Mundo                                 | 93         |
| 5.6 Medição de Campos Magnéticos Gerados por Linhas Subterrâneas em Belo Horizonte | 96         |
| 5.6.1 Medições nas proximidades de LTS em Belo Horizonte                           | 98         |
| (a) LTS Adelaide – Carlos Prates   | 99         |
| (b) LTS Santa Efigênia – Centro  | 101        |
| (c) LTS Sion – Centro  | 102        |
| 5.6.2 Considerações sobre as medições  | 103        |
| 5.6.3 Linhas de distribuição subterrâneas  | 104        |
| 5.7 Campos Magnéticos Gerados por Outras LTS                                       | 106        |
| 5.7.1 LTS 400 kV com resfriamento natural  | 106        |
| 5.7.2 LTS 400 kV com resfriamento forçado  | 107        |
| 5.7.3 LTS 161 kV   | 108        |
| 5.7.4 LTS 138 kV   | 110        |
| 5.7.5 LTS 345 kV   | 111        |
| 5.8 A Blindagem Ativa Aplicada às LTS  | 112        |
| 5.8.1 Blindagem ativa na LTS 400 kV com resfriamento natural                       | 113        |
| 5.8.2 Blindagem Ativa na LTS 345 kV  | 117        |
| 5.9 Considerações Finais   | 119        |
| <b>6 – Conclusões</b>  | <b>121</b> |
| 6.1 Propostas de Continuidade  | 124        |
| <b>Referências Bibliográficas</b>  | <b>126</b> |
| <b>Apêndice A</b>  | <b>132</b> |

---

# ***1 – Introdução***

## ***1.1 – Os Campos Eletromagnéticos e o Meio Ambiente***

No atual cenário do setor elétrico brasileiro, a busca do fornecimento de energia elétrica com qualidade é primordial para suprimento das necessidades de consumo, bem como o melhor aproveitamento e desempenho dos sistemas de energia. O desenvolvimento tecnológico e econômico do país requer maior confiabilidade e qualidade no fornecimento da energia elétrica.

Com a expansão do setor elétrico, além do planejamento técnico das futuras instalações, torna-se necessário o estabelecimento de um planejamento estratégico com vistas à questão ambiental. Nesse sentido, a busca do fornecimento de energia elétrica que interaja com o meio ambiente da melhor forma possível é essencial.

As instalações do setor elétrico, tais como subestações e linhas de transmissão, podem causar grande impacto ao meio ambiente. Com o crescimento das cidades, esses sistemas, que antes ficavam distantes dos centros populacionais, estão, hoje, muito perto das edificações urbanas. Novas instalações devem minimizar a agressão ao meio ambiente, o que pode ser feito, por exemplo, a partir de instalações compactas com melhor aceitação pela população. O projeto de novas estruturas esteticamente mais condizentes com o meio pode também minimizar o impacto visual ao ambiente [1,2,3].

As recomendações de proteção ao meio ambiente estabelecem diretrizes para projetos de engenharia. Em todos os projetos, estudos de impacto ambiental devem ser feitos para que os mesmos sejam liberados para sua execução. Dentre os fatores ambientais a serem observados no sistema elétrico, destacam-se o impacto visual e o ruído audível gerados por suas instalações.

Na questão ambiental, o debate em torno das emissões eletromagnéticas geradas pelos sistemas elétricos vem ganhando destaque. Só muito recentemente, a emissão de campos eletromagnéticos passou a ser vista como poluente ambiental. Nos últimos anos, observou-se um enorme aumento da quantidade de energia eletromagnética no meio ambiente, a partir da emissão de campos nas mais

---

diversas frequências. As linhas de transmissão, distribuição e as subestações contribuem significativamente para o aumento dos níveis de campo em baixa frequência.

Por outro lado, a exposição a campos eletromagnéticos em baixa frequência tem sido apontada como responsável pelo surgimento de doenças, tais como câncer no cérebro e leucemia [4,5]. Nesse contexto, as linhas de energia elétrica e as subestações têm sido alvo de intensos questionamentos, a partir da crescente preocupação da população, que tem cobrado respostas às concessionárias de energia [6,7].

Para tentar controlar essa situação, alguns organismos internacionais estabeleceram normas e recomendações que limitam os níveis emitidos pelas mais diversas fontes [8]. No entanto, o assunto é polêmico e tem gerado controvérsias na comunidade científica mundial, além de preocupação junto aos órgãos de saúde, empresas do setor e o público em geral.

Além disso, a discussão quanto à geração de campos traz risco econômico ao parque industrial das concessionárias, podendo inviabilizar novas instalações da expansão do sistema. Alguns casos de embargo de obras devido aos níveis de campos eletromagnéticos gerados pelo sistema, levando a atrasos nos cronogramas de obras e prejuízos econômicos, têm sido relatados no Brasil [9] e em outros países [10].

Nesse contexto, projetos que contemplem a menor emissão de campos eletromagnéticos, com desenvolvimento de estruturas especiais, têm sido relatados [5,11,12,13]. A emissão de campos passa a ser, assim, um aspecto a ser observado nos projetos das instalações do sistema elétrico de potência.

A questão ambiental torna-se, cada vez mais, um elemento decisivo nas tomadas de decisões e projetos de engenharia. Frente às atuais exigências dos órgãos reguladores, as atividades ambientais devem, além de prever medidas que minimizem o impacto ecológico, prover programas voltados ao relacionamento empresa-comunidade [14].

Assim, essa situação requer um posicionamento das concessionárias de energia no sentido de esclarecer o público em geral quanto aos possíveis efeitos dos campos eletromagnéticos e dos níveis de campo existentes nas proximidades de suas instalações. A medição dos campos existentes e posterior divulgação de

---

---

relatórios técnicos são iniciativas de grande relevância e que podem contribuir para o melhor relacionamento entre empresa e comunidade.

O desconhecimento quanto aos reais níveis que poderiam afetar a saúde dos seres humanos tem levado à medição dos níveis existentes por algumas empresas brasileiras. No entanto, essa iniciativa ainda é pouco expressiva.

As normas internacionais que estabelecem os níveis máximos permitidos são baseadas em estudos científicos e diferem bastante entre os diversos países [15]. Além disso, por se basearem em estudos científicos ainda não conclusivos, estão sujeitas a constantes alterações.

Independente dos níveis estabelecidos pelas normas, observa-se uma tendência mundial no desenvolvimento de programas de medição e cálculo dos níveis de campo eletromagnético existentes nas proximidades dos sistemas de energia, bem como de buscas de técnicas que possam efetivamente reduzir tais níveis [16,17,18,19]. Grandes investimentos vêm sendo feitos em outros países, buscando uma maior compreensão do tema em questão. No Brasil, no entanto, a iniciativa de estudo e investimento nessa área ainda é muito pequena.

As empresas do setor elétrico devem ficar atentas a esse problema em potencial e tomarem consciência da importância de investimento na área. A adoção de programas de medição e controle da emissão dos campos eletromagnéticos, bem como o estudo de técnicas de redução devem ser avaliados.

## ***1.2 – Campos Magnéticos em 60 Hz***

Nos últimos anos, o difundido uso da energia elétrica para todos os fins representou um aumento das fontes de campo eletromagnético presentes nos ambientes residenciais, comerciais e industriais. Conseqüentemente, os níveis de campo aos quais as pessoas inseridas nesses ambientes ficam expostas podem se tornar elevados.

Dentre os diversos tipos de fontes, as de campo magnético são caracterizadas por elementos de circuito carregados com altos valores de corrente. Geralmente, os campos magnéticos em 60 Hz são produzidos pela rede de distribuição interna de edifícios, subestações, linhas de distribuição, linhas de transmissão ou mesmo

---

---

equipamentos eletro/eletrônicos. Nesses ambientes, os níveis de campo magnético podem ser bastante superiores aos naturais.

Basicamente, duas fontes de campo magnético em 60 Hz merecem destaque: fontes de baixa tensão, geralmente caracterizadas por sistemas de distribuição prediais, e fontes de alta tensão, caracterizadas por linhas de transmissão e subestações.

No primeiro caso, campos gerados por sistemas de distribuição prediais, altas correntes circulam em cabos localizados em bandejas e canaletas muito próximas da região onde se encontram pessoas e equipamentos sensíveis. Os campos gerados podem ser, então, relativamente altos. Muitos casos de interferências causadas pela exposição de equipamentos sensíveis, tais como micro-computadores, a campos magnéticos têm sido relatados nessa situação [20,21,22]. Nesses casos, medidas de controle devem ser tomadas. 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 alguns meios de se minimizar os campos magnéticos produzidos. Entretanto, em instalações já existentes, a melhor solução para redução dos campos ainda não é totalmente conhecida [23,24].

No segundo caso, os campos gerados por linhas de transmissão de alta tensão têm sido questionados por pessoas que residem em suas proximidades. Conseqüentemente, algumas empresas têm investido na busca de alternativas que minimizem os campos magnéticos gerados por seus sistemas. As soluções apresentam, no entanto, eficiência relativamente baixa [25,26].

Existem algumas medidas que podem ser tomadas para minimização dos campos magnéticos. Entretanto, ainda não se conhecem soluções totalmente garantidas que sejam economicamente viáveis, o que motiva o estudo de novas técnicas de blindagem para campos magnéticos em 60 Hz.

A utilização de materiais metálicos na redução de campos magnéticos em baixa frequência tem apresentado baixa eficiência em diversos trabalhos de pesquisa [27,28]. Além disso, os custos do material e da instalação são, muitas vezes, bastante elevados. Nesse sentido, atualmente, estão sendo desenvolvidas duas teses de doutorado na UFMG visando encontrar alternativas que minimizem os

---

---

campos magnéticos de baixa frequência. Duas linhas de pesquisa foram escolhidas: o estudo de materiais e a blindagem ativa.

Idealmente, a utilização de materiais que possuíssem, ao mesmo tempo, alta permeabilidade e alta condutividade poderia garantir grande eficiência de blindagem. No entanto, os materiais disponíveis no mercado que possuem tais características apresentam custo bastante elevado, o que inviabiliza, muitas vezes, sua utilização. Além disso, a utilização da blindagem sanduíche (composta por chapas de diferentes características) mostra-se, muitas vezes, inviável devido, principalmente, ao custo e peso da instalação. Nesse sentido, está sendo desenvolvida uma tese de doutorado na UFMG buscando desenvolver um material especial que garanta um alto fator de blindagem a partir de suas características físicas.

Por outro lado, a blindagem ativa tem-se demonstrado uma alternativa viável na redução de campos magnéticos em 60 Hz em algumas situações específicas. Assim, simultaneamente ao estudo de materiais especiais, a blindagem ativa está sendo proposta como alternativa para blindagem de campos magnéticos, resultando no desenvolvimento do presente trabalho.

Nesse contexto, este trabalho é uma tentativa de auxiliar na busca de soluções eficazes para a blindagem de campos magnéticos em baixa frequência.

### **1.3 – Objetivo**

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da blindagem ativa como técnica para redução de campo magnético em 60 Hz. Duas abordagens são feitas: a proposição de um sistema de blindagem ativa para redes de baixa tensão e a blindagem ativa aplicada a linhas de transmissão.

Uma técnica de blindagem ativa baseada na utilização de transformadores de corrente (TC's) para injeção de corrente no sistema de blindagem é apresentada. A partir de testes realizados em uma bancada experimental, a eficiência da blindagem ativa é comparada à eficiência da utilização de chapas metálicas para blindar a fonte de campo. A eficiência da técnica em circuitos com diferentes cargas é também discutida. A utilização de TC's para a injeção de correntes no sistema de blindagem ativa em sistemas de baixa tensão pode apresentar um custo mais baixo quando

---

---

comparado ao de outras técnicas. Assim, essa técnica pode ser uma interessante alternativa para solucionar problemas de interferência causados por campos magnéticos em 60 Hz gerados por sistemas internos de distribuição de edifícios, por exemplo.

Em seguida, é apresentado um estudo teórico/computacional da utilização da blindagem ativa para reduzir os campos magnéticos gerados por linhas de transmissão. Um programa de otimização, desenvolvido em *Matlab*<sup>®</sup>, foi utilizado para auxiliar na determinação dos parâmetros da blindagem, como a localização e a corrente em seus condutores. A influência do sistema de blindagem na linha de transmissão foi avaliada a partir de simulações realizadas utilizando o software *Microtran*<sup>®</sup>. A eficiência de blindagem ativa nas linhas de transmissão foi, então, avaliada.

Finalmente, as linhas de transmissão subterrâneas são apresentadas como importantes fontes de campo magnético e um estudo da blindagem ativa para reduzir os níveis de campo magnético por elas gerados é desenvolvido.

Vale ressaltar que medições de campo magnético em 60 Hz foram realizadas para diferentes linhas de transmissão aéreas e subterrâneas. Os resultados das medições são comparados com simulações utilizando um programa de cálculo de campo desenvolvido no software *Matlab*<sup>®</sup>.

Este trabalho busca, então, dar sua contribuição na discussão sobre as técnicas de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência e sua aplicação em sistemas de energia.

## **1.4 – Organização do Texto**

Este texto é composto de seis capítulos e um apêndice, conforme descrito a seguir.

O presente capítulo, *Introdução*, apresenta a relevância do tema em investigação, bem como os principais objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo, *Blindagem Ativa*, apresenta as características de uma técnica de blindagem ativa proposta para aplicação em sistemas de baixa tensão. Um estudo experimental da eficiência da blindagem ativa para diferentes tipos de carga é apresentado.

---

---

No capítulo 3, *Linhas de Transmissão como Fontes de Campo Magnético*, as linhas de transmissão são avaliadas como importantes fontes de campo magnético em 60 Hz. Medições realizadas nas proximidades de linhas de transmissão aéreas são apresentadas, bem como as principais alternativas para redução do campo magnético gerado por linhas aéreas de transmissão.

O capítulo 4, *Blindagem Ativa em Linhas de Transmissão Aéreas*, apresenta a redução de campo obtida com a aplicação da blindagem ativa em linhas de transmissão aéreas. Um programa de otimização dos parâmetros da blindagem, buscando melhorar sua eficiência, é também apresentado. Em seguida, as alterações resultantes da inserção da blindagem ativa na linha de transmissão original, bem como as perdas envolvidas são discutidas.

A avaliação da blindagem ativa em linhas de transmissão subterrâneas é feita no capítulo 5, *Linhas de Transmissão Subterrâneas*. Aspectos gerais das linhas subterrâneas são apresentados, indicando que os níveis de campo magnético em suas proximidades podem ser significativamente maiores que nas linhas aéreas. Em seguida, a redução de campo com a blindagem ativa é apresentada para algumas configurações de linhas.

O último capítulo, *Conclusões*, apresenta as conclusões alcançadas com o desenvolvimento deste trabalho e propostas de continuidade.

Finalmente, algumas fotos da bancada experimental construída e os locais onde foram feitas as medições de campo são apresentados no apêndice A.

---



## ***2 – Blindagem Ativa em Sistemas de Baixa Tensão***

### ***2.1 – Introdução***

Com a crescente preocupação da população quanto aos possíveis efeitos biológicos da exposição a campos eletromagnéticos, o conhecimento dos níveis de campo gerados por instalações e possíveis técnicas de sua redução tornam-se interessante.

Além da redução de campo visando segurança pessoal, ou seja, reduzir os níveis de campo aos quais pessoas encontram-se expostas, a blindagem eletromagnética pode ter como função a eliminação de problemas de interferência causados por campos eletromagnéticos.

Devido à alta susceptibilidade de alguns equipamentos eletrônicos, muitas vezes ocorrem problemas de interferência ou mau funcionamento devido à exposição a campos magnéticos em baixa frequência [20,21,22]. Nesses casos, a redução dos níveis de campo torna-se necessária e pode ser alcançada com a utilização de algumas técnicas de blindagem.

Neste capítulo, são apresentados alguns métodos utilizados para a blindagem de campos magnéticos em baixa frequência, bem como uma técnica de blindagem ativa que pode ser utilizada em alguns casos particulares, como, por exemplo, sistemas de distribuição prediais.

A descrição da técnica de blindagem ativa proposta, o sensor de campo utilizado, bem como a bancada experimental construída no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG são apresentados.

Em seguida, os resultados obtidos com a utilização da blindagem ativa são comparados com a utilização de chapas metálicas. Vale ressaltar que a análise de chapas metálicas para blindagem de campos magnéticos em 60 Hz foi objeto de estudo de duas dissertações de mestrado desenvolvidas na UFMG [27,28].

Finalmente, um breve estudo experimental do funcionamento da blindagem ativa com diferentes cargas é apresentado.

## **2.2 – Métodos de Blindagem de Campos Magnéticos em 60 Hz**

A Blindagem Eletromagnética é, conceitualmente, uma barreira para a transmissão de campos eletromagnéticos [29]. Nesse contexto, qualquer técnica que venha a reduzir a intensidade de campos eletromagnéticos pode ser considerada uma blindagem.

A eficiência de uma blindagem pode ser avaliada por meio do cálculo do fator de blindagem, definido como a razão entre os valores do campo antes e depois da utilização da blindagem [29]. O fator de blindagem depende diretamente da frequência e da natureza do campo, bem como das propriedades do material que constitui a blindagem. Para campos magnéticos em baixas frequências, o fator de blindagem é muito baixo, o que torna o problema crítico nessas condições [28].

A blindagem de campos magnéticos em baixa frequência não é uma tarefa trivial e ainda não se conhecem soluções totalmente garantidas que sejam economicamente viáveis [27]. No entanto, existem algumas medidas que podem ser tomadas com o objetivo de se minimizar a interferência em um equipamento causada pela exposição a campos magnéticos em baixa frequência, 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 [19,30,31].

Geralmente, são feitas combinações entre algumas dessas técnicas, mas cada situação apresenta características específicas que devem ser analisadas para que as melhores medidas de controle sejam tomadas.

A alteração da configuração do sistema pode ser feita a partir da alteração da geometria dos cabos, da seqüência de fases, variação do número de condutores por fase e transposição das fases do sistema. A simples alteração da seqüência de fases ou a transposição podem gerar reduções de até 30% [19,25,32]. Para redução de campos em linhas de transmissão, a alteração da configuração das fases, com o projeto de torres e arranjos especiais, é uma boa alternativa quando adotada na fase

de projeto [23]. No entanto, as modificações de instalações em operação são geralmente trabalhosas, problemáticas e dispendiosas [24].

Na utilização de chapas metálicas para blindar a fonte, tanto materiais ferrosos quanto não ferrosos são utilizados, sendo os materiais mais comuns o aço e o alumínio. As reduções encontradas situam-se na faixa de 80% para pontos bem próximos da fonte. No entanto, para distâncias maiores, a eficiência pode não ser tão grande [33].

A blindagem ativa, ou compensação ativa, é uma outra alternativa para a redução dos níveis de campo magnético em baixa frequência. O seu funcionamento consiste, basicamente, na criação de um campo magnético idealmente igual e oposto ao campo indesejado.

A blindagem ativa é utilizada, geralmente, em conjunto com outras técnicas, sendo que seu uso com chapas metálicas pode prover reduções de até 80% [34]. Geralmente, são usadas fontes externas para garantir a criação do campo magnético que se opõe à fonte de campo indesejado [35].

### 2.3 – A Blindagem Ativa

Na blindagem ativa, a criação do campo magnético oposto ao campo indesejado pode ser feita com a inserção de fontes externas, controladas de tal forma que a maior redução de campo seja obtida. No entanto, uma alternativa para injeção de corrente no sistema de blindagem, proposta neste trabalho, é apresentada na figura 2.1.

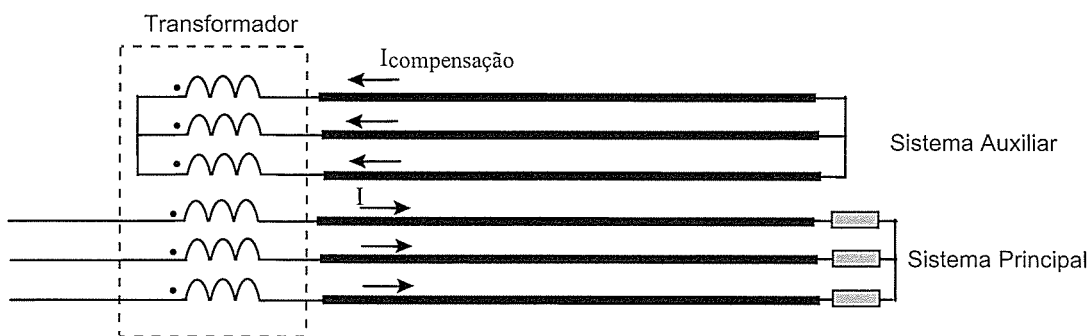


Figura 2.1 - Esquema de ligação da blindagem ativa.

A técnica de Blindagem Ativa proposta consiste na construção de um sistema auxiliar de condutores dispostos paralelamente ao sistema principal, que constitui a fonte de campo. O objetivo é prover a circulação de correntes nos condutores auxiliares que sejam contrárias às do sistema principal. O mecanismo através do qual é garantida a injeção de correntes no sistema auxiliar é feito a partir da inserção de transformadores de corrente no sistema principal.

As bobinas do primário e as do secundário do transformador ficam dispostas em série com os condutores do sistema principal e auxiliar, respectivamente. As outras terminações das bobinas do secundário são ligadas em estrela e os condutores do sistema auxiliar têm suas extremidades curto-circuitadas. O projeto correto do transformador garante que o número de espiras resulte em uma relação de transformação aproximada de 1:1.

Assim, a partir da circulação de corrente no sistema principal são geradas correntes de compensação no secundário do transformador. As espiras do secundário são 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 do sistema que as gerou. Assim, a corrente que circula no sistema auxiliar tende a compensar o efeito da corrente do sistema principal, minimizando o valor do campo magnético gerado pelo sistema como um todo.

A relação de transformação deve ser calculada para que a maior redução de campo seja atingida. Dependendo da localização dos condutores dos sistemas principal e auxiliar, diferentes relações de transformação devem ser utilizadas.

Dentre os sistemas nos quais esta técnica de blindagem ativa pode ser aplicada, destacam-se os sistemas de alimentação e distribuição de edifícios e as linhas de transmissão.

Uma grande vantagem da técnica de blindagem ativa proposta é a característica de auto-realimentação, isto é, a corrente de compensação acompanha a variação de amplitude e fase da corrente que a gerou, o que torna o sistema de grande simplicidade. Uma grande diferença entre o sistema proposto e as outras técnicas de blindagem ativa encontradas na literatura [35] está no fato de que não é necessária a injeção de correntes por uma fonte de potência externa, ou seja, o sistema original alimenta o sistema de blindagem. No entanto, os efeitos da inserção

---

da blindagem ativa em um sistema real já existente devem ser avaliados para a sua implementação.

A técnica proposta foi testada em uma bancada experimental construída para o estudo de técnicas de blindagem de campos magnéticos em baixa frequência. Essa bancada já foi utilizada em trabalhos anteriores para determinação da eficiência de blindagem na utilização de chapas de aço e alumínio [27,28]. Os resultados obtidos com a utilização dos diferentes tipos de chapa são aqui apresentados e comparados com a blindagem ativa.

As medições foram realizadas com um sensor de campo magnético comercial. A seguir são apresentadas as características da bancada experimental utilizada nesta etapa do trabalho, bem como as características do sensor de campo.

## ***2.4 – Bancada Experimental e Sensor de Campo***

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. Visando a minimização da influência das parcelas da indução magnética provenientes das extremidades dos condutores, as medições foram realizadas no centro do sistema, ou seja, no ponto central do comprimento dos condutores.

Um outro fator importante diz respeito à intensidade das correntes. O valor do campo magnético deve ser tal que ele seja influenciado, da menor forma possível, por campos externos e parasitas, contribuindo para a qualidade das medições. Assim, é interessante que o valor de corrente seja o maior possível, sendo limitado pelos equipamentos elétricos disponíveis. Os valores de corrente obtidos na montagem experimental chegam até aproximadamente 150 A, gerando densidades de fluxo magnético da ordem de algumas centenas de microteslas ( $\mu\text{T}$ ) em pontos bem próximos à fonte.

Tendo em vista as características necessárias, a bancada experimental utilizada neste trabalho consiste basicamente de quatro condutores (três fases e um neutro) de 6 m de comprimento cada um, dispostos paralelamente entre si. As extremidades

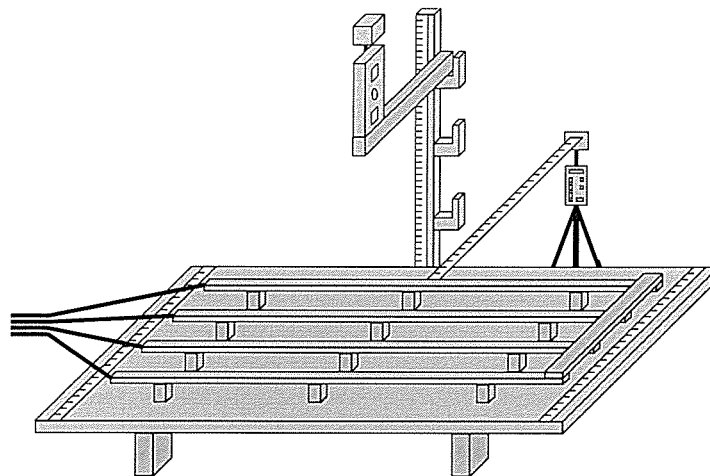


Figura 2.2 – Bancada experimental onde o campo magnético é gerado.

dos condutores foram curto-circuitadas a fim de que altos valores de corrente fossem obtidos com uma tensão relativamente baixa. Dessa forma, é garantido um sistema gerador de altos valores de campo magnético. A figura 2.2 mostra um esquema da montagem experimental.

Os medidores utilizados para medir campos magnéticos de baixa frequência consistem basicamente de duas partes: o sensor de campo (ou ponta de prova) e o detector que processa o sinal do sensor [18]. Os sensores de campo magnético em baixa frequência mais comumente utilizados são de características basicamente indutivas, sendo, geralmente, constituídos de várias espiras para atingir a sensibilidade desejada [36]. Outros tipos de sensores, tais como sensores de efeito Hall e sensores eletro-ópticos não são suficientemente sensíveis [36] e não serão tratados neste trabalho.

O instrumento utilizado é o medidor comercial marca *Wandell & Goltermann*, modelo *EFA-3*. Ele é utilizado para medição da densidade de fluxo magnético em baixa frequência na faixa de 5 Hz a 30 kHz, sendo disponíveis alguns filtros para determinadas frequências. Nas medições realizadas neste trabalho, foi utilizado o filtro para medir apenas a componente do campo magnético em 60 Hz. O medidor possui uma ponta de prova que permite detectar e medir a indução magnética. A medição é isotrópica, considerando a parcela de campo em cada direção do espaço. O valor da densidade de fluxo magnético é calculado a partir da seguinte equação [37]:

$$B_{TOTAL} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (2.1)$$

onde  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  são as parcelas em cada direção do espaço, x, y e z.

## 2.5 – Blindagem Ativa x Uso de Chapas Metálicas

Para a aplicação da blindagem ativa na bancada experimental, foi construído um sistema auxiliar com cabos idênticos aos do sistema principal, dispostos paralelamente a ele. Além disso, foi projetado e construído um transformador trifásico especialmente para essa aplicação. O esquema da montagem realizada pode ser observado na figura 2.3.

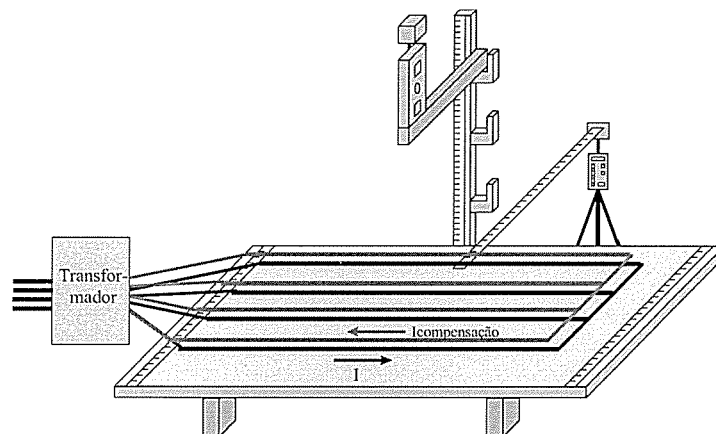


Figura 2.3 - Blindagem ativa.

Para a construção do transformador, foi utilizado o núcleo de um transformador de 15 kVA de potência. Para a confecção de suas bobinas foram utilizados os próprios condutores da montagem, conforme já mostrado pela figura 2.1. As espiras foram enroladas de tal forma a obter uma relação aproximada de 1:1.

As condições da bancada experimental para a realização dos testes estão mostradas na figura 2.4. A distância entre condutores que constituem a fonte de campo foi mantida igual a 10 cm. Os cabos da blindagem ativa foram dispostos ao lado deles. Os valores de campo foram medidos na direção vertical, conforme indica

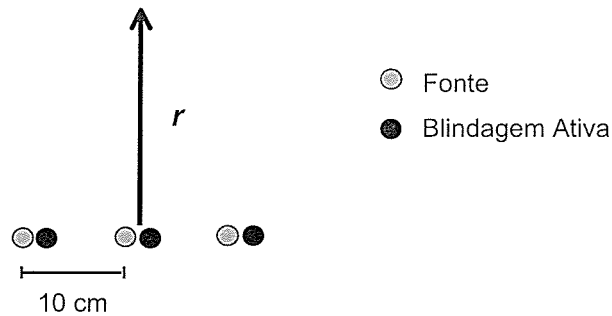


Figura 2.4 - Características da bancada experimental para medição de  $B$  com a blindagem ativa.

a seta na figura 2.4. A corrente por fase nos condutores da fonte foi mantida em aproximadamente 40 A. Neste caso, o condutor neutro foi suprimido da montagem.

Os valores da densidade de fluxo magnético medidos com e sem a blindagem ativa são mostrados na tabela 2.1. Para melhor compreensão dos resultados, são também apresentadas as reduções percentuais dos valores da densidade de fluxo magnético. Uma redução de 80%, por exemplo, significa que o campo magnético com a blindagem vale 20% de seu valor sem a blindagem.

As reduções obtidas situam-se em torno de 90% para todos os pontos de medição. Vale salientar que o valor do campo ambiente nessas medições foi igual a aproximadamente  $0,07 \mu\text{T}$ .

Tabela 2.1 - Valores de  $B$  (em  $\mu\text{T}$ ) com a utilização da blindagem ativa e a redução percentual obtida.

| $r$ (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       |



Em trabalhos anteriores, foram testados materiais metálicos para blindagem da fonte de campo magnético, resultando na elaboração de duas dissertações de mestrado [27,28]. Os materiais testados foram o aço e o alumínio. Com o objetivo de comparar a eficiência das diferentes técnicas, o resumo dos trabalhos e seus resultados são apresentados a seguir.

Para atingir uma eficiência de blindagem satisfatória, seria ideal a utilização de materiais com alta condutividade e alta permeabilidade [28]. Assim, o alumínio, caracterizado por sua boa condutividade, e o aço, material de alta permeabilidade, foram testados separadamente e em conjunto, constituindo uma blindagem sanduíche (uma chapa de alumínio sobre uma de aço). No caso do aço, foram testados diferentes tipos de material [28].

As características básicas dos materiais analisados são:

- Alumínio: chapas de alumínio com 99% de pureza, 4,76mm de espessura, 1m de largura e 2m de comprimento.
- Aço SAE1010: chapas de aço-carbono SAE1010 (aço carbono comum, contendo 0,1% de carbono), 3mm de espessura, 1m de largura e 2m de comprimento.
- Aço E125SP: chapas de aço elétrico semi-processado, 0,35mm de espessura, 1m de largura e 1m de comprimento.
- Aço E125TP: chapas de aço elétrico totalmente processado, 0,35mm de espessura, 1m de largura e 1m de comprimento.

No caso das chapas de aço elétrico, o seu posicionamento com relação à direção de laminação influencia a eficiência de blindagem [28]. Buscando avaliar esse efeito, duas situações foram analisadas no caso do aço E 125 TP: direção de laminação paralela ao campo magnético (indicado por “//”) e direção de laminação perpendicular ao campo (indicado por “⊥”). Os melhores resultados são esperados se as chapas forem posicionadas paralelamente ao fluxo magnético, uma vez que a orientação dos grãos será paralela à direção da indução magnética [28].

Na bancada experimental, os condutores que representam a fonte de campo mantiveram a mesma disposição anterior, utilizada no teste da blindagem ativa, possibilitando, assim, a comparação das técnicas. As chapas foram colocadas sobre os condutores a uma distância de 8 cm, conforme indica a figura 2.5.

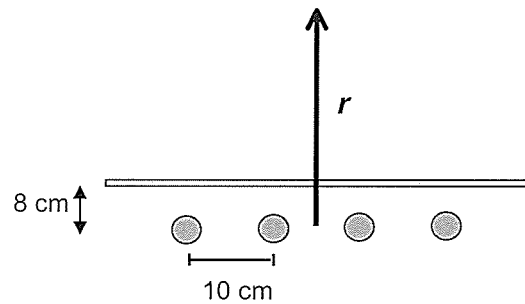


Figura 2.5 – Características da bancada experimental para medição de  $B$  com a utilização de chapas sobre a fonte.

Os valores da densidade de fluxo magnético medidos na blindagem com chapas metálicas são mostrados na tabela 2.2, bem como os valores medidos sem a blindagem da fonte. A corrente injetada por fase foi de aproximadamente 140 A.

Na tabela 2.3 são apresentadas as reduções percentuais de cada material testado, juntamente com as reduções da blindagem ativa.

Tabela 2.2 – Densidades de Fluxo Magnético ( $B$ , em  $\mu\text{T}$ ) para os materiais testados.

| Distância da fonte (m) | $B$ , sem blindagem | $B$ , com blindagem |        |                    |                        |          |         |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------|--------------------|------------------------|----------|---------|
|                        |                     | SAE 1010            | E125SP | E125TP ( $\perp$ ) | E125TP ( $\parallel$ ) | Alumínio | AL +SAE |
| 0,2                    | 93,31               | 13,10               | 75,04  | 27,50              | 18,47                  | 18,32    | 2,56    |
| 0,4                    | 27,17               | 5,51                | 24,29  | 12,99              | 9,92                   | 3,87     | 1,24    |
| 0,6                    | 12,44               | 3,17                | 11,50  | 7,43               | 6,20                   | 1,68     | 1,37    |
| 0,8                    | 7,01                | 2,18                | 6,59   | 4,79               | 4,14                   | 1,07     | 1,20    |
| 1,0                    | 4,51                | 1,60                | 4,30   | 3,29               | 2,95                   | 0,83     | 0,81    |
| 1,2                    | 3,11                | 1,24                | 2,95   | 2,41               | 2,20                   | 0,67     | 0,60    |
| 1,4                    | 2,28                | 1,00                | 2,19   | 1,83               | 1,71                   | 0,55     | 0,50    |
| 1,6                    | 1,74                | 0,81                | 1,68   | 1,44               | 1,36                   | 0,46     | 0,40    |
| 1,8                    | 1,38                | 0,67                | 1,33   | 1,16               | 1,10                   | 0,38     | 0,35    |
| 2,0                    | 1,11                | 0,57                | 1,08   | 0,95               | 0,90                   | 0,33     | 0,30    |

Tabela 2.3 - Redução percentual (%) para cada técnica testada.

| Distância da fonte (m) | Redução Percentual na Indução Magnética |          |        |                    |                        |          |         |
|------------------------|---|----------|--------|--------------------|------------------------|----------|---------|
|                        | ATIVA                                   | SAE 1010 | E125SP | E125TP ( $\perp$ ) | E125TP ( $\parallel$ ) | Alumínio | AL +SAE |
| 0,2                    | 87,58                                   | 85,96    | 19,58  | 70,53              | 80,20                  | 80,37    | 97,26   |
| 0,4                    | 86,18                                   | 79,72    | 10,60  | 52,19              | 63,49                  | 85,76    | 95,44   |
| 0,6                    | 89,70                                   | 74,52    | 7,56   | 40,27              | 50,16                  | 86,50    | 88,99   |
| 0,8                    | 91,06                                   | 68,90    | 6,00   | 31,67              | 40,94                  | 84,74    | 82,88   |
| 1,0                    | 91,34                                   | 64,52    | 4,66   | 27,05              | 34,59                  | 81,60    | 82,04   |
| 1,2                    | -                                       | 60,13    | 5,14   | 22,51              | 29,26                  | 78,46    | 80,71   |
| 1,4                    | -                                       | 56,14    | 3,95   | 19,74              | 25,00                  | 75,88    | 78,07   |
| 1,6                    | -                                       | 53,45    | 3,45   | 17,24              | 21,84                  | 73,56    | 77,01   |
| 1,8                    | -                                       | 51,45    | 3,62   | 15,94              | 20,29                  | 72,46    | 74,64   |
| 2,0                    | -                                       | 48,65    | 2,70   | 14,41              | 18,92                  | 70,27    | 72,97   |

Observando a tabela 2.3, importantes conclusões podem ser apontadas.

Os ganhos obtidos com a utilização da blindagem ativa foram superiores ao uso de chapas metálicas, situando-se na faixa de 90%. A redução percentual mantém-se elevada para as várias distâncias de medição, diferentemente da blindagem da fonte com chapas, cujos resultados mostraram um decréscimo da redução percentual à medida em que a distância da fonte aumenta. Na blindagem ativa, a redução torna-se ainda maior para pontos mais distantes. A uma distância de apenas 1 m da fonte o campo medido é da ordem do campo ambiente.

O pior resultado foi obtido com o uso de aço elétrico semi-processado (E 125SP) que, apesar do baixo custo, apresentou reduções muito pequenas: 20% para pontos próximos à fonte e 3% a 2m da fonte. O ganho obtido com esse material pode ser considerado praticamente desprezível e sua aplicação pode ser descartada.

O uso de aço elétrico totalmente processado (E 125TP) mostrou bons resultados, principalmente quando a direção de laminação foi colocada paralelamente ao fluxo magnético.

O aço carbono (SAE 1010) e o alumínio apresentaram boas reduções quando utilizados separadamente, mas a espessura das chapas era consideravelmente maior se comparada ao aço elétrico.

O melhor resultado no uso dos materiais foi atingido com a blindagem composta pelo conjunto do alumínio e aço carbono. No entanto, deve-se estudar a viabilidade

ou não de utilização desta alternativa. O seu resultado é uma blindagem de aproximadamente 0,8 cm de espessura, o que é inviável na maioria das aplicações, devido principalmente ao peso, custo do material e dificuldade de instalação. Apesar da menor redução do aço elétrico totalmente processado, comparado com o alumínio e com a blindagem sanduíche, talvez seja uma solução mais viável técnica e economicamente, devido à menor espessura e menor custo.

Além da análise da viabilidade ou não da utilização de chapas metálicas, um outro ponto deve ser destacado. Observa-se que, à medida que a distância da fonte aumenta, a redução percentual diminui para todos os materiais testados. Assim, grandes reduções são obtidas para pontos muito próximos à fonte (70 a 97%), enquanto para pontos mais distantes, a redução é bem inferior (40 a 73%). Reduções da ordem de 70% para pontos a apenas 2 m da fonte de campo muitas vezes não são suficientes para resolver um problema de interferência [27]. No entanto, para pontos bem próximos à fonte, a blindagem com chapas metálicas pode ser uma boa solução.

Um fator a ser analisado como possível causa do decaimento da eficiência da blindagem metálica com a distância é o efeito das extremidades das chapas. Quanto mais distante da fonte, maior será a contribuição das parcelas de campo que saem das extremidades das chapas. A partir de simulações computacionais em estudos preliminares desenvolvidos em [38], pode-se confirmar que esse comportamento realmente ocorre para o alumínio, ou seja, o efeito das extremidades reduz a eficiência de blindagem para pontos mais distantes da fonte. Se a largura da chapa for aumentada, esse efeito é minimizado e a eficiência de blindagem torna-se maior. Vale ressaltar, no entanto, que nem sempre é possível a utilização de grandes larguras de chapas, tanto do ponto de vista técnico como econômico.

Nos testes experimentais e estudos computacionais realizados, a blindagem com chapas metálicas apresentou baixa redução, principalmente para pontos mais distantes da fonte. Assim, torna-se justificável o investimento em estudos de outras técnicas de blindagem para campos magnéticos de 60 Hz. Além desse aspecto, deve-se ressaltar que certos sistemas, como linhas de transmissão por exemplo, não podem ser envolvidos por chapas metálicas. A blindagem ativa pode ser, então, uma boa opção.

As reduções obtidas com a blindagem ativa são superiores às reduções com chapas metálicas. Além disso, a blindagem ativa mantém reduções significativas em todos os pontos de medição, sendo a única alternativa cujo valor de campo proveniente da fonte é praticamente anulado. Assim, esses dados indicam que resultados eficazes podem vir a ser alcançados com a utilização da blindagem ativa.

Na blindagem ativa, um ponto a ser observado é a disposição dos condutores auxiliares da blindagem com relação aos condutores do sistema principal. Na realização do experimento, foi possível uma proximidade muito grande entre os cabos dos dois sistemas, apresentando uma pequena assimetria devido apenas à espessura do isolamento dos cabos. No entanto, em casos reais, há dificuldades e limitações que impedem uma grande proximidade entre os cabos, principalmente quando são utilizados barramentos, e a distância de isolamento deve ser respeitada. Uma assimetria muito grande entre os condutores dos dois sistemas pode comprometer a eficiência da blindagem ativa, principalmente para pontos próximos à fonte. Para pontos mais distantes, a assimetria tende a ter menor influência e a blindagem ativa pode alcançar maiores reduções.

O sistema trifásico considerado nesta etapa do trabalho não levou em consideração a influência de um sistema com carga na efetividade da blindagem ativa, já que os condutores encontravam-se curto-circuitados. A influência de um fator de potência diferente do unitário na eficiência da blindagem ativa, a partir da consideração de um sistema com carga (resistiva, capacitiva, indutiva ou mista) deve ser, então, analisada. Esse estudo é apresentado a seguir.

## ***2.6 – Estudo Experimental do Efeito de Carga***

Com o objetivo de se determinar qual seria a influência da carga e de um fator de potência não unitário na eficiência da blindagem ativa com a utilização de TC's, foram realizados experimentos com diferentes cargas.

Por facilidade de operação e tendo como limitação as cargas disponíveis no laboratório, outra bancada experimental foi construída. A fonte de campo, ou sistema principal, da nova bancada é constituída de três fios condutores de  $1,5 \text{ mm}^2$  de área

---

espaçados de 7 cm entre si. A blindagem ativa é constituída de três condutores idênticos dispostos ao lado dos condutores fase.

Nesta etapa, há a limitação do valor de corrente que pode ser injetada na bancada devido às cargas disponíveis. A corrente máxima que pode ser injetada no sistema é de aproximadamente 3 A. O valor do campo magnético gerado por esse sistema será, portanto, muito baixo e o medidor de campo pode não fazer a medição com precisão adequada, dada a influência do campo magnético ambiente. Assim, nesta etapa, optou-se pelo monitoramento das correntes nos condutores dos dois sistemas. O objetivo é verificar se as correntes nos condutores do sistema auxiliar encontram-se defasadas de  $180^\circ$  e possuem a mesma amplitude dos respectivos condutores do sistema principal. Se essa condição for atingida, garante-se que os campos gerados pela blindagem ativa serão contrários aos do sistema principal, tendendo a zerar o campo magnético total proveniente da montagem.

O esquema da blindagem ativa nesta etapa do trabalho pode ser observado na figura 2.1, onde o sistema principal é um sistema com carga, diferentemente da condição em curto, anteriormente analisada.

Apesar do sistema principal estar com carga, o sistema auxiliar de blindagem ativa continua em curto. Os transformadores foram construídos utilizando núcleos de ferro de 200 VA e foram necessárias 35 espiras no primário e 33 no secundário. As bobinas foram enroladas de forma a obter correntes no sistema auxiliar contrárias às do sistema principal.

A medição de corrente nos condutores foi feita com a utilização de pontas de prova de corrente da Tektronix, modelo A622, que medem correntes de até 100 A. A escala utilizada foi de 10mV/A e as correntes medidas foram da ordem de 1 A. As pontas são ligadas diretamente no osciloscópio e as formas de onda podem ser analisadas em amplitude e fase.

Um ponto importante a ser investigado é o estudo do efeito da inserção dos TC's (transformadores de corrente) e dos condutores do sistema auxiliar no sistema principal, ou seja, quais as alterações que ocorrem quando da utilização da blindagem ativa. Com esse objetivo, foi feito um estudo preliminar com um sistema monofásico. Em seguida, o comportamento de um sistema trifásico com quatro tipos de cargas foi avaliado e os resultados são apresentados.

### 2.6.1 – Sistema monofásico

#### a) avaliação da influência da blindagem ativa no sistema principal

Foi feito um teste preliminar em um sistema monofásico a fim de se verificar a influência da inserção da blindagem ativa no sistema principal. Foram feitas medições para três situações distintas, conforme indica a figura 2.6.

Foram medidos os valores de tensão, fator de potência, potência entregue à carga e as correntes envolvidas, para o caso de uma carga resistiva de  $104,5 \Omega$ . Os resultados são apresentados na tabela 2.4.

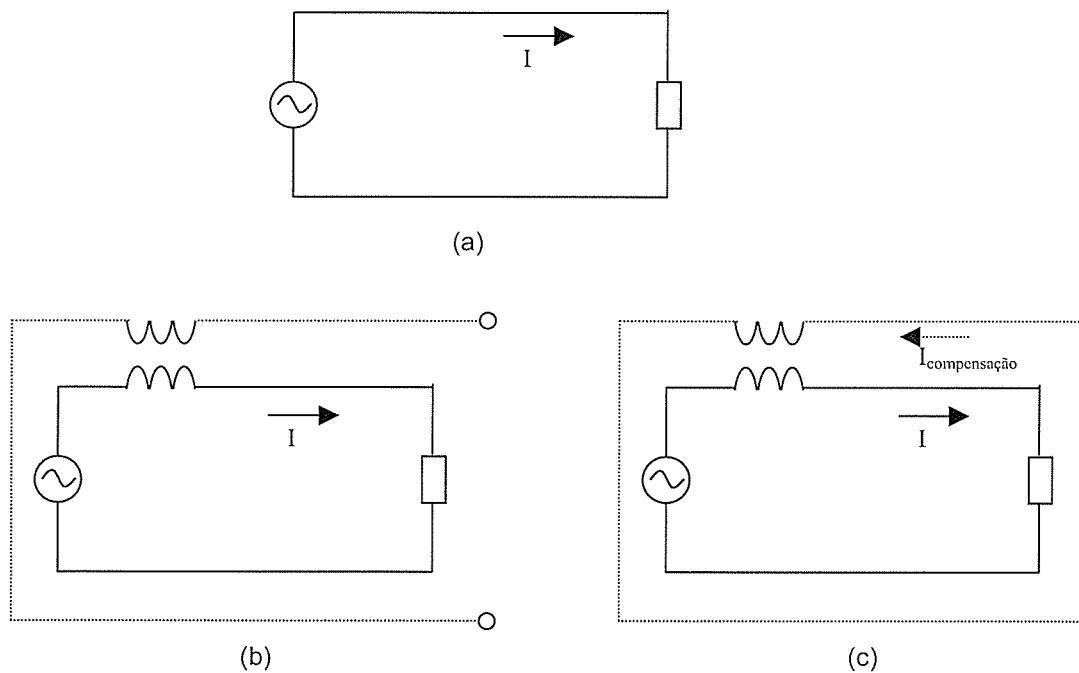


Figura 2.6 – Medições para avaliar a influência da blindagem ativa no sistema principal:

- (a) sistema principal sem o TC, sem a blindagem ativa;
- (b) sistema principal com o TC, sem a blindagem ativa;
- (c) sistema principal com o TC, com a blindagem ativa.

Tabela 2.4 – Valores de tensão, corrente, potência e fator de potência nas três situações testadas para uma carga resistiva,  $R = 104,5 \Omega$ .

|     | $V$    | $I$    | $P_{1\phi}$ | $FP$ |
|-----|--------|--------|-------------|------|
| (a) | 87,5 V | 900 mA | 37,5        | 1,0  |
| (b) | 88,0 V | 902 mA | 37,5        | 0,99 |
| (c) | 88,7 V | 903 mA | 38          | 0,99 |

As alterações observadas nas grandezas medidas quando acrescentamos a blindagem ativa ao sistema são muito pequenas. No capítulo 4, as perdas inseridas pela blindagem ativa serão calculadas e discutidas.

#### **b) compensação da blindagem ativa**

Com o objetivo de verificar se a corrente do sistema auxiliar compensa a corrente do sistema principal, isto é, se a blindagem ativa é efetiva para um sistema com cargas, foram medidas as correntes dos dois sistemas para as seguintes cargas:

- (a) carga resistiva fixa de  $104,5\Omega$ ;
- (b) carga capacitiva de  $24 \mu\text{F}$ ;
- (c) carga indutiva de  $0,2 \text{ H}$ , com resistência interna de  $11,5 \Omega$ ;
- (d) carga não linear, constituída por uma lâmpada mista de  $500 \text{ W}$  e  $220 \text{ V}$ .

Os resultados são apresentados na figura 2.7.



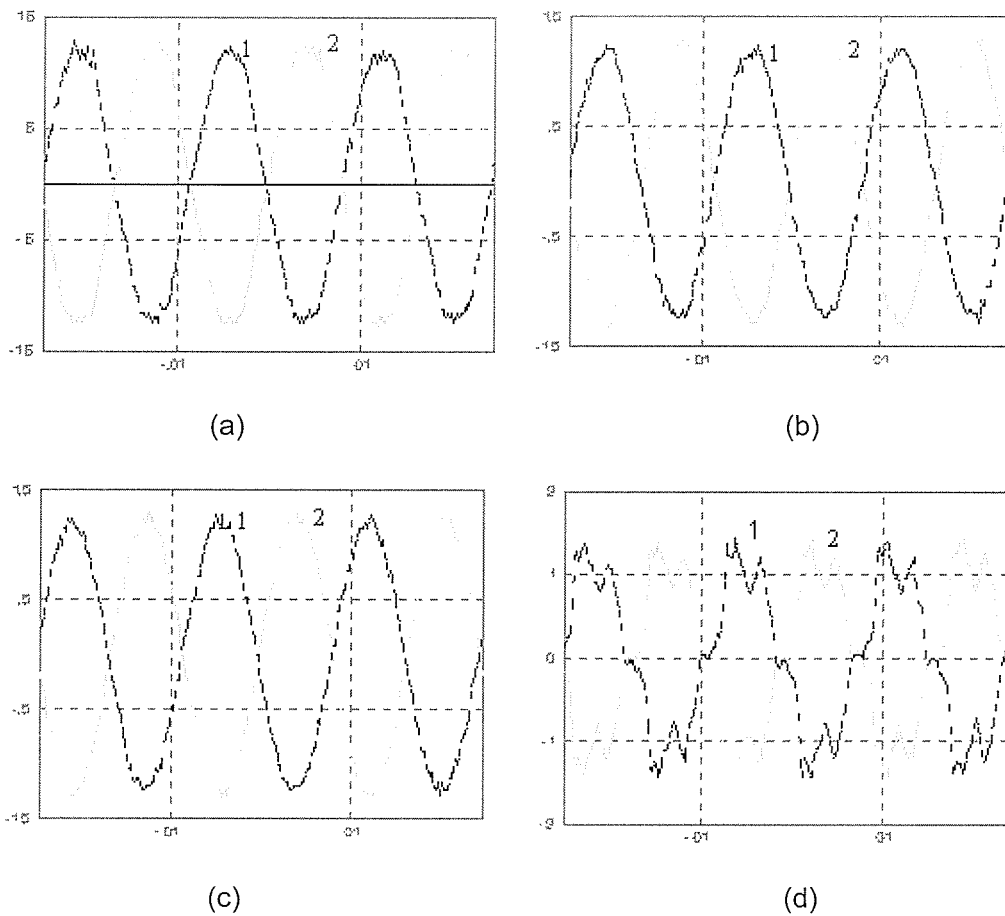


Figura 2.7 – Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2) para as quatro cargas: (a) resistor; (b) capacitor; (c) indutor; (d) carga não-linear.

Observa-se que, independente da carga utilizada, em todos os casos, a corrente do sistema auxiliar foi praticamente de mesma amplitude da corrente do sistema principal e defasada de  $180^\circ$ . Mesmo para uma onda de corrente muito distorcida, como a observada no caso da carga não-linear, o sistema de blindagem ativa é capaz de gerar correntes iguais e contrárias. Dessa forma, garante-se que o campo magnético proveniente da fonte como um todo seja praticamente desprezível, obtendo-se um alto fator de blindagem.

A análise da efetividade da técnica proposta deve ser estudada principalmente em sistemas trifásicos, que são os representativos de fontes de campo reais mais comumente encontrados. Este estudo é apresentado a seguir.

### **2.6.2 – Sistema trifásico**

O comportamento da blindagem ativa para sistemas trifásicos com diferentes cargas é aqui apresentado. Para cada carga, foram medidas as tensões aplicadas no sistema principal, as correntes por fase no sistema principal e as correntes de compensação. Os valores medidos, bem como as formas de onda de corrente, são apresentados a seguir. O sistema auxiliar refere-se ao circuito da blindagem ativa.

#### **a) carga resistiva**

Os valores dos resistores utilizados na montagem foram 105,1  $\Omega$ , 104,5  $\Omega$  e 111,6  $\Omega$ . As tensões fase-fase aplicadas foram 160,3 V, 158,8 V e 160,4 V.

A figura 2.8 mostra as correntes nas fases a, b e c com as respectivas correntes de compensação geradas pela blindagem ativa.

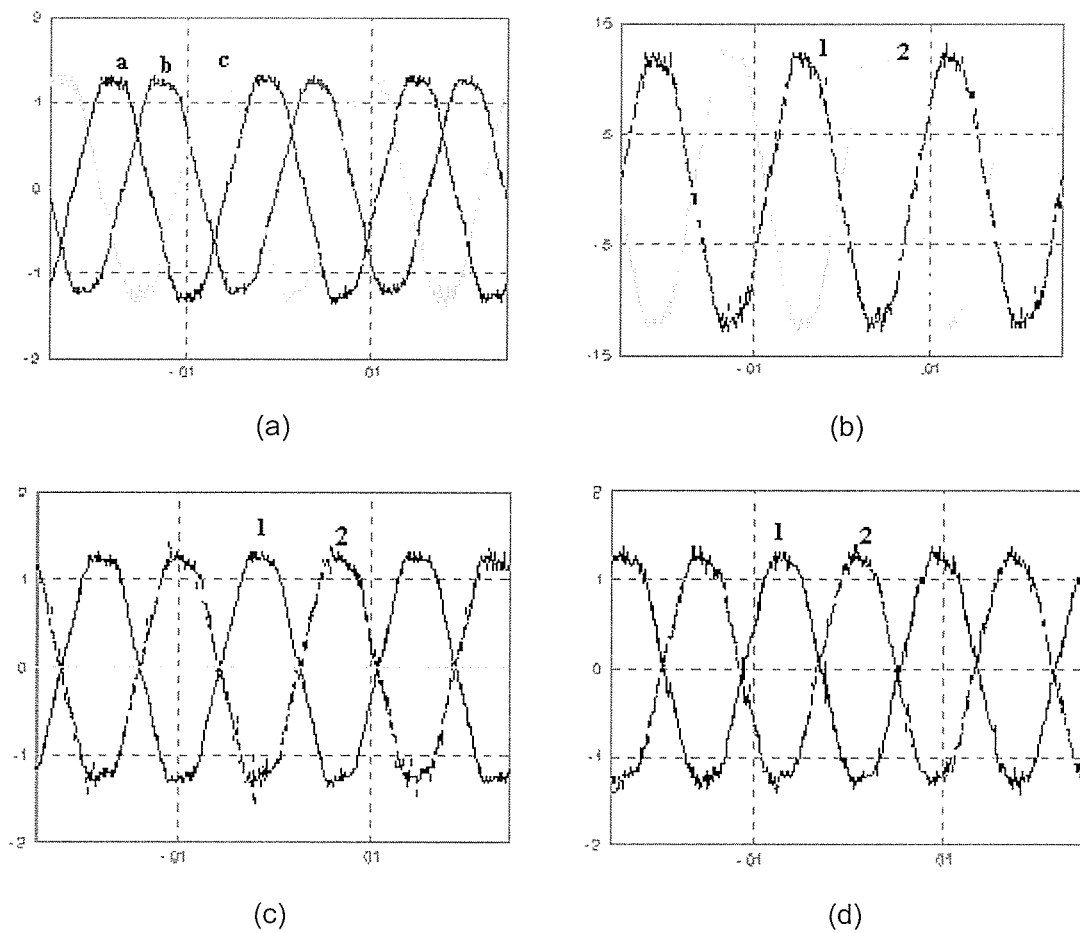


Figura 2.8 – Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2): (a) fases a, b e c; (b) fase a:  $I_a = 907$  mA e  $I_a' = 874$  mA; (c) fase b:  $I_b = 931$  mA e  $I_b' = 917$  mA; (d) fase c:  $I_c = 923$  mA e  $I_c' = 909$  mA:

### b) carga indutiva

O valor dos indutores utilizados na montagem foi de aproximadamente 0,2 H, com uma resistência interna de 11,5  $\Omega$ . As tensões fase-fase aplicadas foram 103,1 V, 101,7 V e 102,4 V.

A figura 2.9 mostra as correntes nas fases a, b e c do sistema principal e as respectivas correntes de compensação geradas pela blindagem ativa para um sistema com carga indutiva.

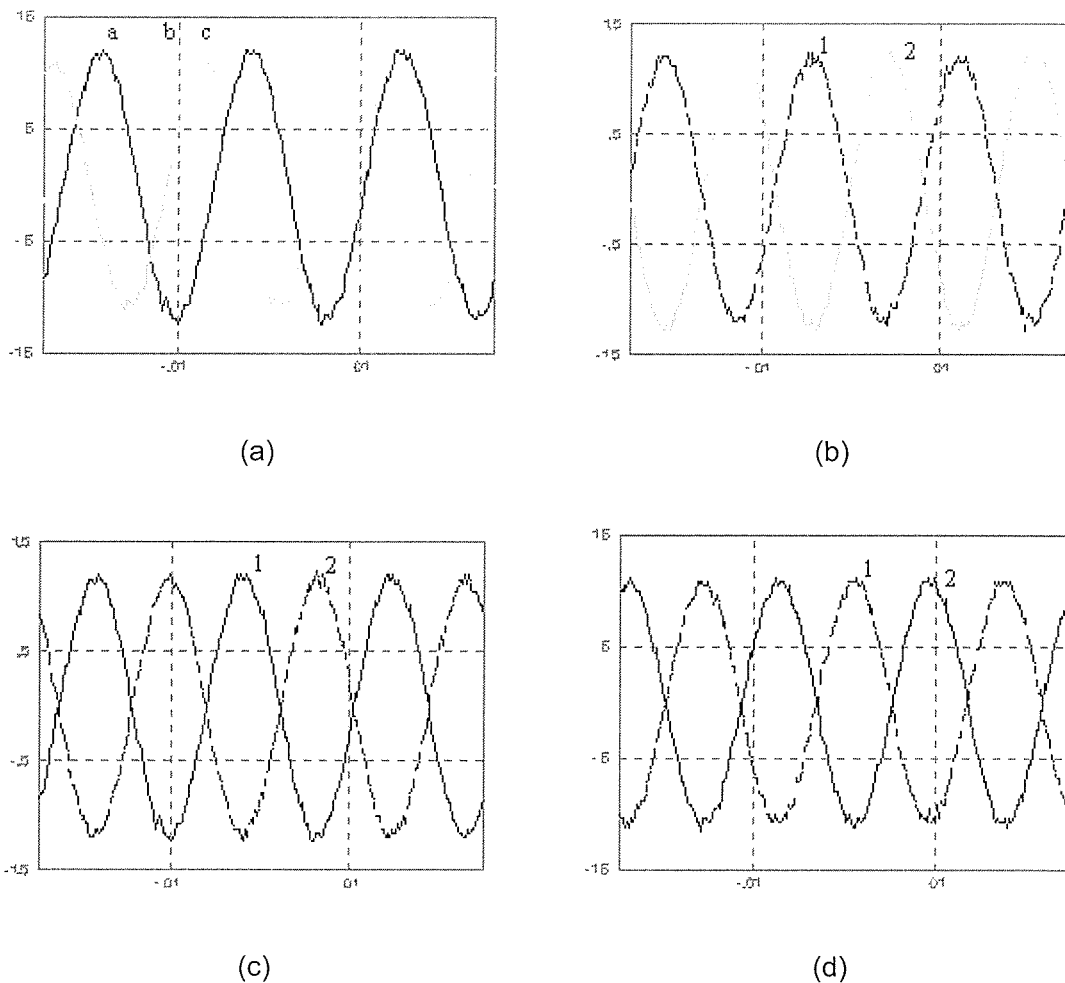


Figura 2.9 - Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2): (a) fases a, b e c; (b) fase a:  $I_a = 896$  mA e  $I_a' = 849$  mA; (c) fase b:  $I_b = 839$  mA e  $I_b' = 823$  mA; (d) fase c:  $I_c = 780$  mA e  $I_c' = 755$  mA:

### c) carga não-linear

As cargas utilizadas, neste caso, foram três lâmpadas mistas idênticas de 500 W e 220 V. As tensões fase-fase aplicadas foram 155,5 V, 153,5 V e 150,3 V.

A figura 2.10 mostra as correntes nas fases a, b e c do sistema principal e as respectivas correntes de compensação geradas pela blindagem ativa.

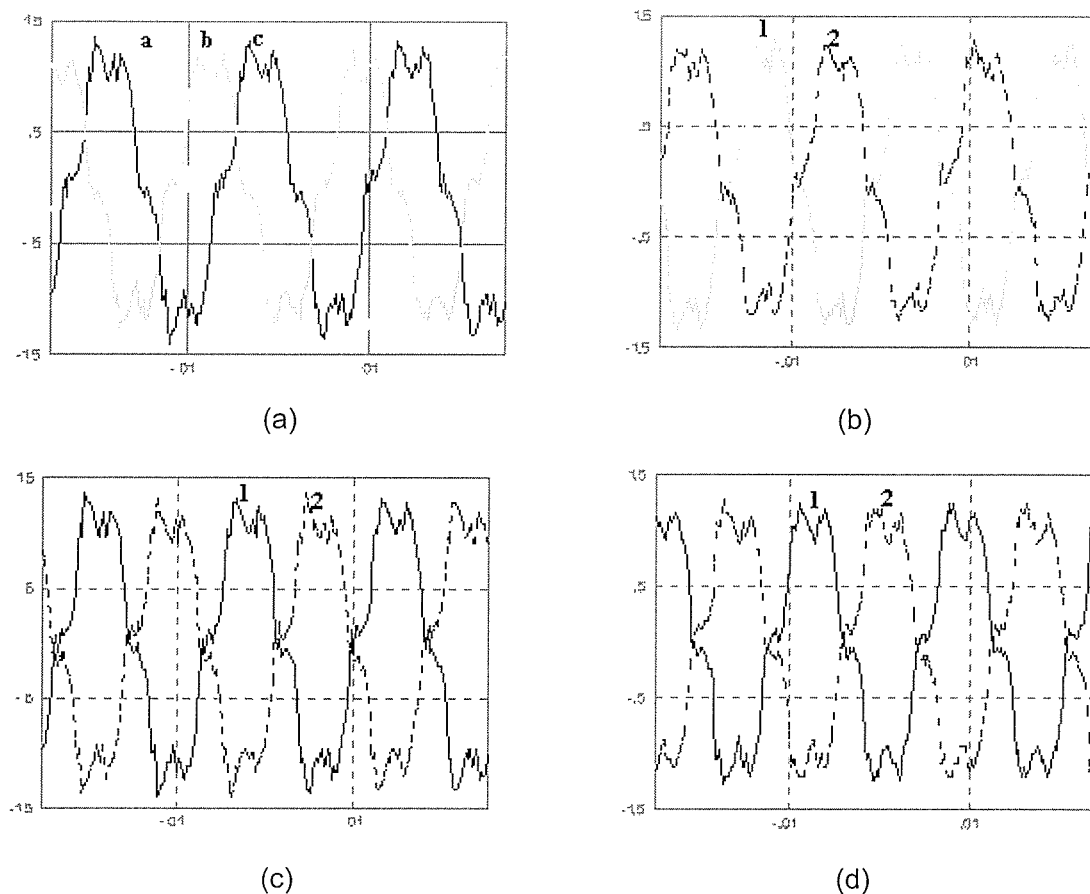


Figura 2.10 – Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2): (a) fases a, b e c; (b) fase a:  $I_a = 906$  mA e  $I_a' = 848$  mA; (c) fase b:  $I_b = 890$  mA e  $I_b' = 860$  mA; (d) fase c:  $I_c = 845$  mA e  $I_c' = 837$  mA:

#### d) carga mista

Para a caracterização de carga mista, os resistores ( $\approx 100 \Omega$ ) e indutores ( $\approx 0,2H$ ) anteriormente utilizados foram colocados em série. Assim, foi obtida uma carga de  $135 \angle 34^\circ \Omega$ . O fator de potência calculado para essa carga é igual 0,83 e o medido foi de 0,84. O fator de potência medido é próximo do calculado, mesmo utilizando um medidor inadequado para a faixa de corrente medida. O medidor é para correntes de 5 A e a corrente dos condutores foi de aproximadamente 1 A. O fator de potência de 0,8 pode ser considerado característico para muitos sistemas reais. As tensões fase-fase aplicadas foram 203 V, 199 V e 199 V.

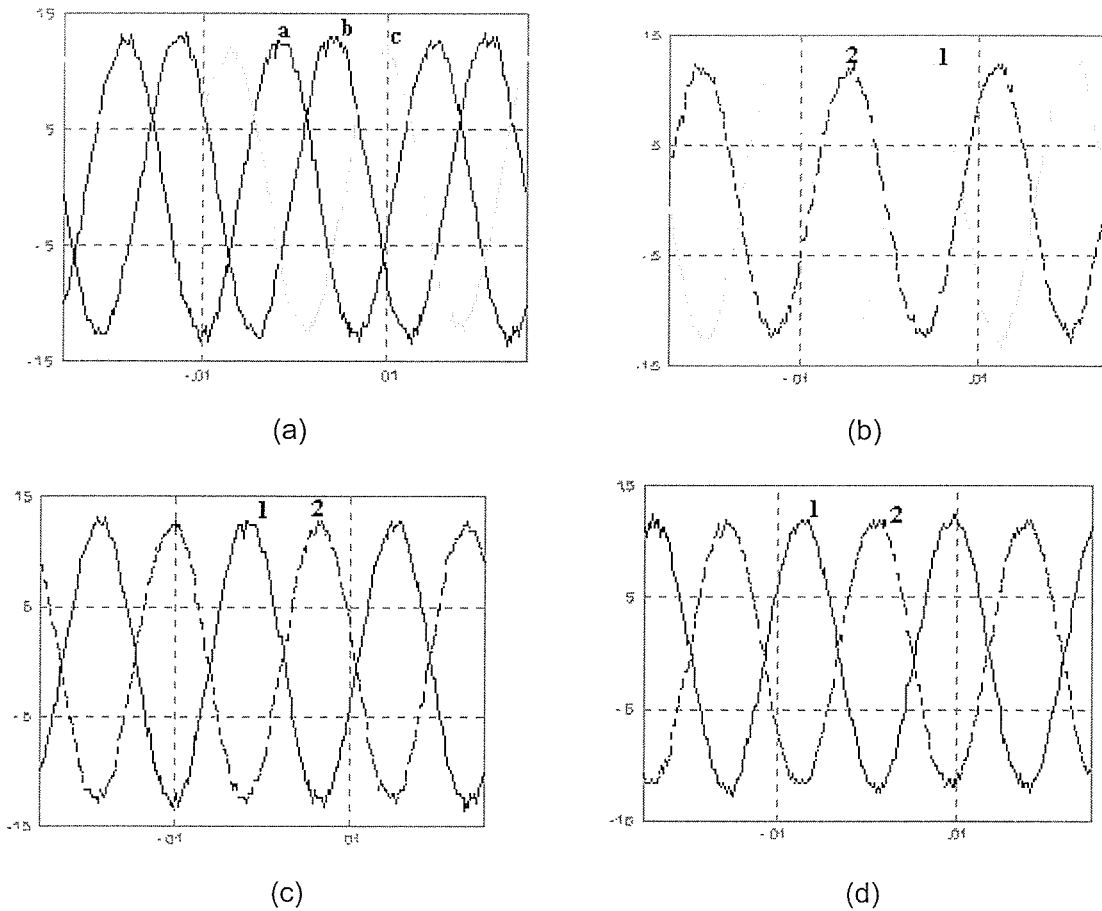


Figura 2.11 - Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2): (a) fases a, b e c; (b) fase a:  $I_a = 908$  mA e  $I_a' = 854$  mA; (c) fase b:  $I_b = 903$  mA e  $I_b' = 886$  mA; (d) fase c:  $I_c = 855$  mA e  $I_c' = 834$  mA:

A figura 2.11 mostra as correntes nas fases a, b e c do sistema principal e as respectivas correntes de compensação geradas pela blindagem ativa para um sistema com fator de potência próximo de 0,8.

Para todas as situações testadas observa-se que as correntes de compensação geradas pela blindagem ativa encontram-se praticamente defasadas de  $180^\circ$  com relação às correntes do sistema principal e as suas amplitudes são bem próximas. Mesmo para o caso de carga não-linear, onde as correntes apresentaram grande distorção, a blindagem ativa é capaz de gerar correntes de compensação satisfatórias.

Vale lembrar que uma vez que as correntes geradas pela blindagem ativa são iguais e contrárias às do sistema principal, e os condutores dos dois sistemas

encontram-se bem próximos, o campo magnético proveniente da fonte será minimizado. No entanto, se houver uma distância maior entre os condutores da blindagem ativa e do sistema principal, correntes na blindagem ativa com diferentes amplitudes do sistema principal podem ser necessárias para a maior redução de campo. A variação da amplitude da corrente de compensação pode ser feita com a mudança da relação de transformação dos TC's.

Uma das aplicações da técnica de blindagem ativa proposta pode ser a sua utilização em trechos de linhas de transmissão que necessitam de reduções de campos magnéticos. No entanto, a blindagem ativa não precisaria ser aplicada ao longo de toda linha, uma vez que geralmente apenas um trecho ou trechos são de região habitada. Assim, torna-se necessário o estudo da blindagem ativa como sendo apenas uma parcela do comprimento do sistema principal. Com esse objetivo, foi testada a eficiência da blindagem ativa para a compensação de apenas um trecho do sistema principal. A figura 2.12 ilustra o sistema estudado.

O estudo foi feito para todas as cargas disponíveis, sendo que os resultados foram praticamente os mesmos dos anteriores, em que os comprimentos dos sistemas principal e auxiliar eram iguais. Como exemplo, é apresentada a figura 2.13, com as curvas de corrente para um sistema com carga resistiva.

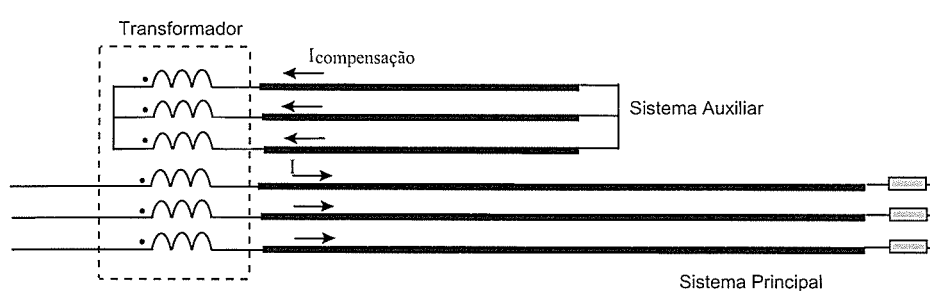


Figura 2.12 – Blindagem ativa aplicada a apenas um trecho da fonte:  $L_{\text{sistema auxiliar}} = 2,6 \text{ m}$ ;  
 $L_{\text{sistema principal}} = 5,8 \text{ m}$

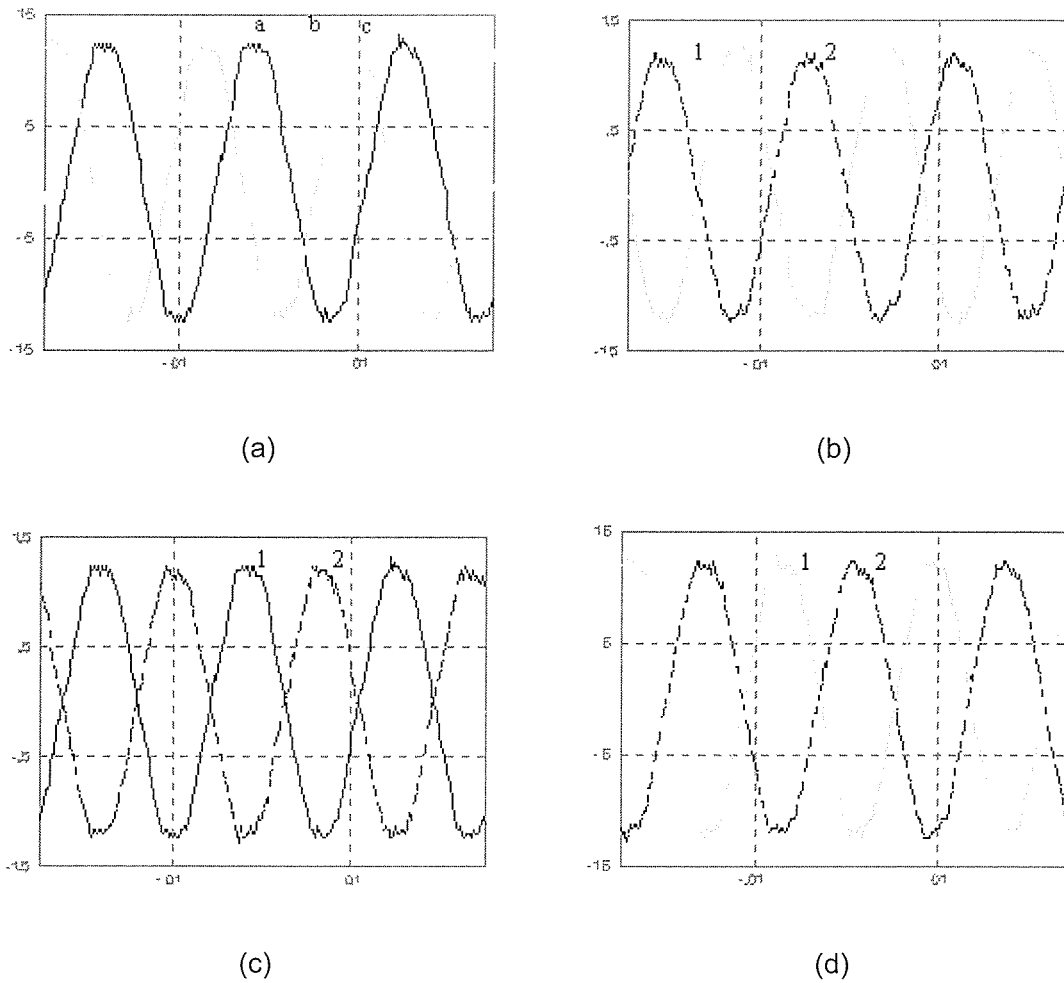


Figura 2.13 – Correntes nos sistemas principal (1) e auxiliar (2): (a) fases a, b e c; (b) fase a:  $I_a = 900$  mA e  $I_a' = 848$  mA; (c) fase b:  $I_b = 890$  mA e  $I_b' = 868$  mA; (d) fase c:  $I_c = 884$  mA e  $I_c' = 870$  mA:

## 2.7 – Considerações Finais

A blindagem ativa apresentou reduções significativas para os vários pontos de medição, quando comparada com o uso de chapas metálicas. No entanto, sua aplicação deve ser bem avaliada, uma vez que quando há uma grande assimetria no sistema, sua eficiência pode ser pequena para pontos muito próximos à fonte. Na presença de assimetria, sua instalação é indicada quando grandes reduções são necessárias a maiores distâncias da fonte.



---

Dependendo da localização dos condutores da blindagem com relação à fonte, correntes específicas deverão ser injetadas no sistema. A escolha dos melhores valores de corrente e a melhor localização dos condutores da blindagem podem ser feitas com o auxílio de um programa de otimização dos parâmetros da blindagem, conforme será discutido nos capítulos seguintes.

A técnica de blindagem ativa proposta pode, a princípio, ser utilizada em sistemas com diferentes fatores de potência, independente das características da carga, conforme indicam os resultados experimentais apresentados.

A blindagem ativa do campo magnético em sistemas industriais é também uma importante aplicação. Nesses ambientes, altos valores de campo são facilmente encontrados, juntamente com equipamentos sensíveis, cada vez mais utilizados nos processos industriais das mais diversas áreas. A redução de campo pode-se tornar, assim, uma exigência para o eficaz desenvolvimento do processo.

A utilização dessa técnica é especialmente indicada para sistemas de tensão relativamente baixa, uma vez que o custo do projeto pode ser bem menor se comparado com o uso de chapas metálicas, por exemplo. Além disso, a blindagem ativa apresenta como vantagens a característica de ser um sistema auto-realimentado e possuir um menor tempo de interrupção do serviço para sua instalação. Para sistemas de alta tensão, um estudo técnico/econômico deve ser desenvolvido para que a melhor solução seja adotada.

Como discutido anteriormente, a técnica de blindagem ativa poderá ser utilizada para eliminação de interferências causadas por campos magnéticos de baixa frequência como também na redução dos níveis de exposição aos seres humanos.

Nos capítulos seguintes, será avaliada a aplicação da blindagem ativa em linhas de transmissão trifásicas aéreas e subterrâneas, objetivando a redução dos níveis de campo magnético aos quais pessoas que residem nas proximidades das linhas encontram-se expostas.

---

## ***3 – Linhas de Transmissão como Fontes de Campo Magnético***

### ***3.1 – Introdução***

As linhas de transmissão são, por natureza, importantes fontes de campos eletromagnéticos, uma vez que, geralmente, estão presentes altas tensões e correntes e, conseqüentemente, os campos podem ser elevados.

Nesse contexto, a avaliação dos níveis dos campos eletromagnéticos presentes nas proximidades de linhas de transmissão torna-se interessante. A comparação dos valores existentes com os níveis máximos permitidos por normas poderá indicar a necessidade ou não de redução dos campos gerados por linhas.

Neste capítulo, é apresentado um resumo dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos na determinação dos campos magnéticos provenientes de linhas, ressaltando a grande importância dada pela comunidade científica a esse assunto.

Medições de campos realizadas nas proximidades de linhas de transmissão em Minas Gerais são apresentadas. Os valores de campo magnético em 60 Hz medidos são comparados com valores calculados por um programa computacional.

Finalmente, os métodos encontrados na literatura utilizados para a redução dos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão são apresentados.

### ***3.2 – Efeitos Biológicos de Campos Magnéticos em 60 Hz***

A maior parte das discussões sobre a associação entre linhas de transmissão e riscos à saúde surge da solicitação de estudos por pessoas que residem nas proximidades das linhas. Diversos estudos vêm sendo realizados em vários países buscando avaliar essa associação. Um desses primeiros estudos, realizado em 1979, indica uma relação entre leucemia e câncer no cérebro em crianças que residem nas proximidades de linhas de transmissão [39].

Há certo consenso na comunidade científica de que ainda não foi estabelecida nenhuma associação entre a incidência de câncer e proximidade a linhas de transmissão. No entanto, existem questões não respondidas e pesquisas adicionais devem ser realizadas. Nesse contexto, vários trabalhos continuam sendo desenvolvidos buscando determinar quais os limites seguros de exposição a campos magnéticos em baixa frequência [40,41].

Vários órgãos, governamentais ou não, vêm buscando o estabelecimento dos níveis seguros de exposição a campos eletromagnéticos, dentre os quais pode-se citar o NRPB-UK (*UK National Radiation Protection Board*) e o ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*). Para o público em geral, os níveis máximos estabelecidos por esses órgãos para exposição de campos magnéticos de 60 Hz são [40]:

- NRPB-UK: 1330  $\mu\text{T}$ ;
- ICNIRP: 83,3  $\mu\text{T}$ .

Além dessas recomendações, alguns países têm adotado legislações próprias, estabelecendo limites para os níveis de campo magnético nas proximidades de instalações de alta potência, tais como subestações e linhas de transmissão. Algumas delas estabelecem limites bastante rigorosos. A norma suíça, por exemplo, propõe um valor de 1  $\mu\text{T}$  para a densidade de fluxo magnético nas proximidades de sistemas de energia [42].

No Brasil, este assunto está em discussão. No início de 2002, a sociedade civil, representada pela Sociedade Amigos do Alto dos Pinheiros – SAAP, em São Paulo, apresentou solicitação junto ao Ministério da Saúde para que o mesmo se posicionasse sobre o assunto. Em abril do mesmo ano, foi, então, organizado o Seminário Nacional “Efeitos à saúde relacionados à exposição humana a campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão de energia elétrica”. Como resultado, a FUNASA (Fundação Nacional de Saúde) decretou a Portaria Nº 220/02, de 20 de junho de 2002, instituindo um Grupo de Trabalho com o objetivo de propor normas e procedimentos referentes aos limites de exposição humana a campos eletromagnéticos provenientes de linhas de transmissão de alta tensão. Esse grupo é formado por representantes de órgãos públicos, universidades e

empresas do setor elétrico [43]. Até o presente momento, os trabalhos não foram concluídos.

Desconsiderando os limites estabelecidos, a controvérsia pública permanece. Cada vez mais a população exige e interfere na tomadas de decisão com relação à execução de linhas de transmissão e subestações [10]. A preocupação pública é sustentada pelo extensivo relato desse assunto pelos meios de comunicação e pela incapacidade dos cientistas garantirem que não existem riscos.

Grandes investimentos vêm sendo feitos tanto na pesquisa da determinação dos níveis nocivos, quanto em alternativas que reduzam os campos magnéticos gerados pelas linhas de transmissão, distribuição e subestações. No entanto, a dúvida com relação aos níveis nocivos à saúde permanece e muitos estudos e pesquisa ainda serão necessários para esclarecimento desse assunto.

### ***3.3 – Campos Magnéticos nas Proximidades de Linhas de Transmissão***

Muitos estudos de levantamento dos níveis de campo próximos a linhas de transmissão, distribuição e subestações têm sido solicitados principalmente por pessoas que residem nas proximidades desses sistemas [16]. Nesse sentido, vários esforços vêm sendo feitos para o levantamento dos níveis de campo próximos a linhas e subestações já existentes, bem como o impacto de novas linhas.

Já existem alguns casos em que foi feito o monitoramento de campos magnéticos por tempo prolongado antes e depois da expansão de uma subestação, como parte de requerimentos legais. Isso indica a grande preocupação com relação ao impacto do aumento dos níveis de campo [44]. Devido à preocupação de autoridades e da população sobre os possíveis efeitos na saúde devido à exposição a campos elétricos e magnéticos de frequência industrial, é quase certo que a maioria das aplicações para novas instalações ou expansão de instalações já existentes em alguns países exijam um processo de consulta pública [44].

Em 1992, foi relatado o cancelamento dos planos de construir uma subestação em Los Angeles, seguindo petições e reclamações da população com receio dos efeitos dos campos eletromagnéticos. Isso é uma clara evidência da importância política e sócio-econômica deste assunto.

---

Devido à recente preocupação quanto aos níveis de campo, torna-se necessário haver um conhecimento mais detalhado de tais níveis nos diferentes ambientes [17]. Nesse sentido, diversos trabalhos de levantamento dos níveis de campo magnético presentes no ambientes residenciais, comerciais e industriais vêm sendo desenvolvidos.

Campos magnéticos de frequência industrial em ambientes residenciais são causados por um número diverso de fontes. De forma geral, duas categorias de fonte podem ser identificadas. A primeira fonte é proveniente de correntes fluindo em instalações de potência como as linhas de transmissão, que podem estar localizadas na vizinhança da residência. A segunda fonte é composta por correntes fluindo na fiação interna das residências e os campos provenientes de eletrodomésticos. A caracterização dos níveis de campo desse complexo ambiente eletromagnético tem sido feita através de medições e também de cálculos estatísticos [45].

Campos magnéticos provenientes da fiação interna de residências, de eletrodomésticos e equipamentos elétricos são muito difíceis de se prever e geralmente são obtidos a partir de medições [46,47,48].

Outros estudos são desenvolvidos buscando avaliar a influência de linhas de transmissão de alta tensão nos campos magnéticos em ambientes residenciais. Várias configurações de linhas vêm sendo estudadas e os perfis laterais de campo para condições normais de operação vêm sendo determinados [17,49,50]. Os resultados apresentados mostram, claramente, que as intensidades de campo magnético bem como as exposições aos campos são maiores para os grupos de casas mais próximos às linhas [48].

No Brasil, medições realizadas em linhas de transmissão entre 138 kV e 500 kV, no estado de Minas Gerais, indicam campos magnéticos de até  $10 \mu\text{T}$  na faixa de servidão da linha [51].

Um ponto interessante a ser destacado é a comparação dos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão aéreas e linhas de distribuição. Devido ao maior desbalanceamento das correntes em linhas de distribuição, os campos magnéticos próximos a elas podem ser comparáveis ou até maiores que os campos de linhas de transmissão [52,53].

Uma outra situação de interesse, além da existência de residências próximas às linhas, é a utilização da faixa de passagem para outros fins.

No Canadá, um programa de utilização secundária das faixas de servidão de linhas de transmissão para atividades comerciais, educacionais, industriais e de recreação têm existido por vários anos [54]. A concessionária pode alugar essas propriedades para utilização de jardins ou usos recreativos. Mesmo no ambiente urbano, as propriedades são utilizadas para atividades como trilhas de ciclismo, espaços para esportes, jardins comunitários, cursos de mini-golfes e estacionamentos. O perfil de campo criado por linhas de 735, 315, 230 e 120 KV foram calculados, levando-se em consideração diversos fatores que afetam esse perfil (variações temporais e o desequilíbrio das correntes). Foram encontrados valores de aproximadamente 30  $\mu\text{T}$  para regiões logo abaixo das linhas e de 10  $\mu\text{T}$  a cerca de 30 m para a linha de 735 kV.

No caso do Brasil, a utilização indevida da faixa da servidão pela população é uma realidade, conforme mostrado nas fotos do Apêndice A. Existem diversas famílias que residem logo abaixo dos condutores de linhas de transmissão, às vezes ao lado das torres. Os níveis de campo nessas regiões podem ser elevados, já que a proximidade é grande. Além do problema do campo, há ainda o problema da segurança quanto a contatos diretos com os cabos de alta tensão, podendo causar graves acidentes.

Muito pouca atenção tem sido dada aos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão subterrâneas. Na literatura consultada, não foram encontradas referências a medições de campo nas proximidades de sistemas subterrâneos. As linhas de transmissão subterrâneas (LTS) merecem destaque, uma vez que estão localizadas em regiões onde a circulação de pessoas é grande, o que torna importante a avaliação dos níveis de campo por elas gerados. Geralmente, as linhas subterrâneas estão instaladas em grandes centros urbanos onde a instalação de linhas aéreas é inviável. Muitas vezes, os campos magnéticos gerados por cabos subterrâneos são maiores que os gerados por linhas aéreas, conforme será apresentado nos capítulos seguintes. Essa importante fonte de campo merece atenção tanto do ponto de vista de mapeamento dos valores de campo em suas proximidades como na busca de técnicas de redução. A abordagem das linhas subterrâneas como fonte de campo magnético e a aplicação da blindagem ativa para sua redução são apresentadas no capítulo 5.

### 3.4 – Medições nas Proximidades de Linhas de Transmissão Aéreas

Foram realizadas medições de campo nas proximidades de duas linhas aéreas de transmissão operadas pela Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG. Os valores da densidade de campo magnético em 60 Hz medidos foram confrontados com valores calculados por um programa computacional desenvolvido em [27]. Esse programa utiliza a Lei de Biot-Savart para o cálculo da densidade de fluxo magnético,  $\mathbf{B}$ , gerado por Linhas de Transmissão. A Lei de Biot-Savart possibilita calcular o campo magnético,  $\mathbf{H}$ , de forma direta em função da corrente que o gera e da distância entre a fonte do campo e o ponto de interesse, segundo a equação:

$$dH_{j,i} = \frac{I_i dL_i \times a_{R_{ij}}}{4\pi R_{ij}^2}. \quad (3.1)$$

A figura 3.1 explicita as variáveis da equação 3.1.

Uma vez determinado  $\mathbf{H}$ , a densidade de fluxo magnético é facilmente obtida a partir da relação:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (3.2)$$

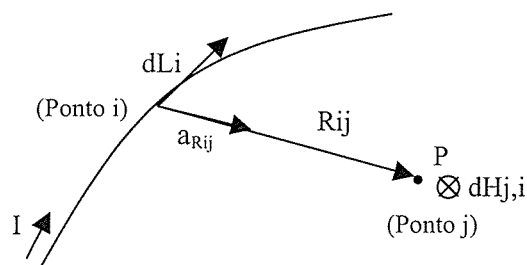


Figura 3.1 – Geometria para descrição da Lei de Biot-Savart.

Nos cálculos realizados, foi considerado o modelo de linha longa, onde o campo é orientado em um plano perpendicular à linha. Para simplificação do cálculo, foram feitas as seguintes considerações:

- a altura dos condutores sobre o plano da terra e a separação entre eles são constantes;
- as correntes são grandezas complexas e equilibradas (linhas trifásicas);
- a contribuição da corrente de retorno para a terra é desprezível.

A descrição detalhada do programa computacional pode ser obtida em [27].

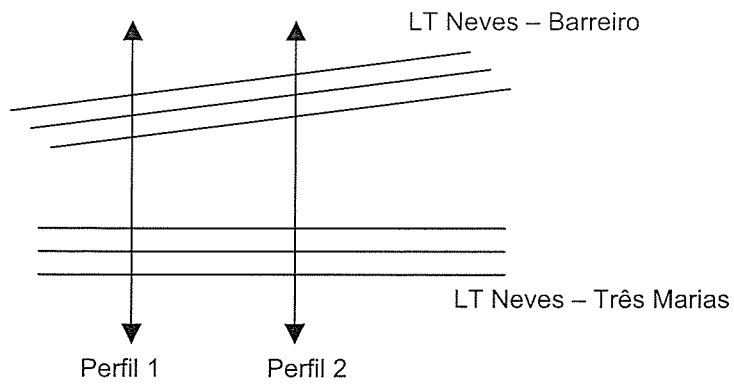
As medições de campo foram feitas nas proximidades de linhas de transmissão de 345 e 500 kV. Uma equipe da CEMIG acompanhou os procedimentos de medição, fornecendo todos os dados relativos à configuração das linhas nos pontos de medição, bem como os valores das correntes de carregamento no momento da medição.

### **3.4.1 – Linhas de transmissão de 345 kV**

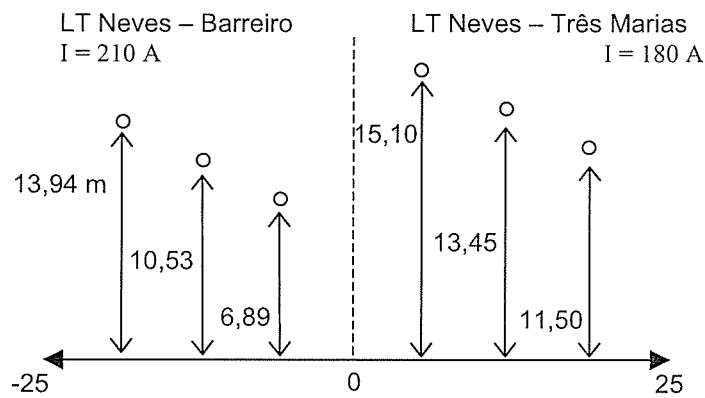
A medição na tensão de 345 kV foi feita no bairro Darcy Ribeiro, no município de Contagem, Minas Gerais. O local escolhido é atravessado por duas linhas de transmissão de 345 kV: LT Neves – Três Marias e LT Neves – Barreiro. Foram medidos os campos em dois eixos de medição, denominados “Perfil 1” e “Perfil 2”, representados na figura 3.2(a). A disposição dos condutores na medição relacionada ao “Perfil 1” é indicada na figura 3.2(b). As alturas foram determinadas por medição no local, com a utilização do medidor de altura “*Cable Height meter*”, modelo 300, da marca “*SupaRule Systems LTD*”. As correntes medidas por fase nas subestações no momento da medição são também indicadas. Todas as medições foram feitas com os sensores de campo colocados a 1 m de altura.

A figura 3.3 mostra os valores da densidade de fluxo magnético em 60 Hz medidos e os valores calculados pelo programa computacional, para o “Perfil 1”. Somente os valores medidos para o “Perfil 2” são indicados na figura 3.4, uma vez que não foi possível determinar a altura dos cabos com o instrumento medidor de altura disponível, o que impossibilitou o cálculo computacional.





(a)



(b)

Figura 3.2 – Disposição dos condutores para o perfil 1 – LT 345 kV.

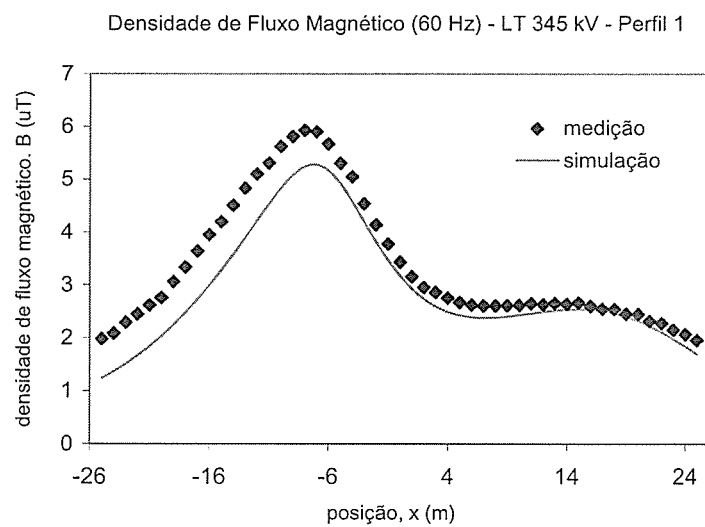


Figura 3.3 – Densidade de fluxo magnético – LT 345 kV – Perfil 1: valores medidos e calculados.

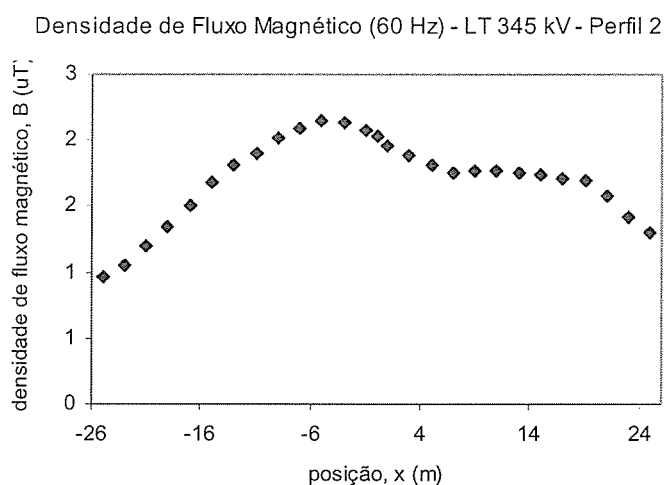


Figura 3.4 – Densidade de fluxo magnético – LT 345 kV – Perfil 2: valores medidos.

Os valores medidos e calculados para a densidade de fluxo magnético em 60 Hz para o “Perfil 1” são muito próximos. Há algumas fontes de erro na medição que não foram levadas em consideração nos cálculos, tais como a irregularidade do terreno, a variação instantânea da corrente e a influência de outras linhas localizadas nas proximidades. Os resultados preliminares indicam que o programa de cálculo pode ser utilizado como ferramenta na previsão dos níveis de campo existentes nas proximidades de linhas de transmissão.

### 3.4.2 – Linha de transmissão de 500 kV

A linha de transmissão de 500 kV escolhida para a medição de campo é a LT Neves – Mesquita. A configuração dos cabos da linha, bem como a corrente por fase no momento da medição são indicadas na figura 3.5.

Os valores medidos da densidade de fluxo magnético nas proximidades da linha de transmissão, juntamente com os valores calculados são indicados na figura 3.6.

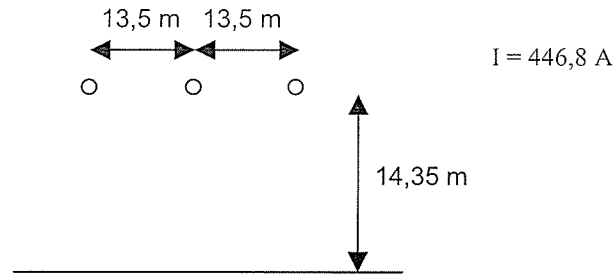


Figura 3.5 – Disposição dos condutores para a LT 500 kV.

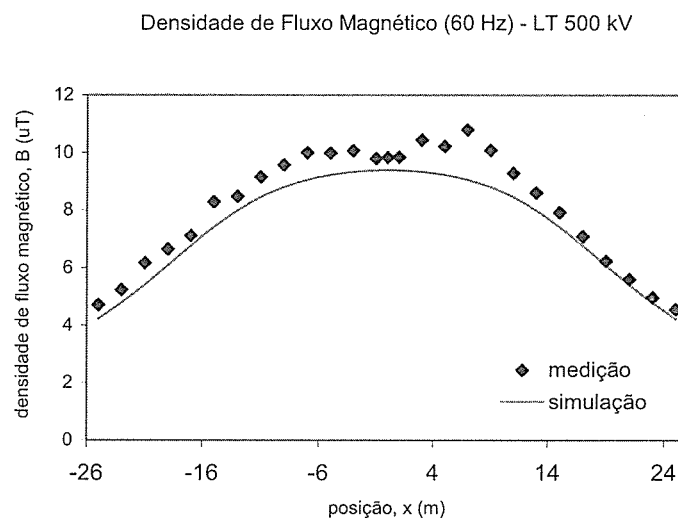


Figura 3.6 – Densidade de fluxo magnético – LT 500 kV: valores medidos e calculados.

Verifica-se, novamente, uma boa concordância entre os valores medidos e simulados. A medição da altura, neste caso, foi possível apenas para uma das fases, já que o sensor não foi capaz de determinar as outras alturas, devido à irregularidade do terreno, o que introduz certa discordância entre medição e simulação.

Os valores obtidos nas medições realizadas encontram-se bem abaixo dos valores recomendados pelo ICNIRP. O maior valor de densidade de fluxo magnético medido foi de  $10,8 \mu\text{T}$ , para a linha de 500 kV. O valor limite estabelecido pelo ICNIRP para a frequência de 60 Hz é igual a  $83,3 \mu\text{T}$ . Vale ressaltar, no entanto, que as linhas não estavam operando em sua capacidade máxima e que, com projetos de recapacitação, os valores de campo podem se tornar significativamente maiores.

A seguir, os métodos encontrados na literatura para redução de campo magnético aplicados em linhas de transmissão serão discutidos.

### **3.5 – Métodos para Redução de Campos Magnéticos em Linhas de Transmissão Aéreas**

Diferentes métodos para minimização de campos magnéticos de linhas de transmissão vêm sendo propostos ao longo dos últimos anos. Os métodos sugeridos variam desde novas configurações de linhas até instalações de sistemas adicionais de blindagem passiva ou ativa formados por “*loops*” de condutores colocados na região na qual se deseja alterar o perfil de campo.

A seguir serão apresentadas as alternativas que estão sendo estudadas para redução do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão.

#### **3.5.1 – Alteração da configuração dos condutores**

Os campos magnéticos próximos a uma linha de transmissão podem ser reduzidos aumentando-se a altura das torres de transmissão, alterando o espaçamento e configuração dos condutores ou utilizando-se um maior número de condutores por fase e fazendo uma alternância de fases.

Nesse sentido, vários esforços vêm sendo canalizados para projetos de torres de transmissão que forneçam uma geometria dos condutores capaz de produzir menores níveis de campo. A mudança da configuração da linha de transmissão exige uma avaliação da eficiência e custo nas linhas existentes, bem como de novos projetos [55]. Na realidade, a redução de campo não é o propósito final do projeto, mas um dos fatores a serem levados em consideração no projeto de uma nova linha.

A utilização de linhas compactas, com estruturas especiais em linhas de transmissão não convencionais, tem demonstrado a possibilidade da concepção de linhas com baixa geração de campos eletromagnéticos [56].

Na Suécia, a utilização de linhas compactas com baixa emissão de campo foi testada em um trecho de 250 m de uma linha experimental de 245 kV. A nova configuração adota dois condutores por fase e os campos gerados por ela chegam a um terço do correspondente à configuração horizontal [12].

---

A CHESF, Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco, fez o estudo de linhas compactas para utilização em novas linhas de transmissão de 230 e 500 kV. O uso de linhas compactas pode prover, dentre outros fatores, a redução de campo magnético. Os valores de campo magnético calculados provenientes de uma nova configuração de uma linha com dois circuitos de 230 kV são da ordem de 20 a 30  $\mu\text{T}$ , enquanto o valor calculado para uma linha de 500 kV, configuração horizontal, é de 70  $\mu\text{T}$  [11].

Tais concepções de mudança da configuração dos condutores da linha e projeto de novas torres são eficientes na redução dos níveis de campos magnéticos, mas somente aplicáveis a novas linhas. A transposição de condutores e a utilização de configurações especiais, adicionadas à possível necessidade de projeto e construção de torres especiais, tornam essa alternativa de custo bastante elevado para linhas existentes ou aplicações localizadas [57].

### 3.5.2 – *Blindagem passiva*

A blindagem passiva consiste na instalação de condutores adicionais entre o circuito de potência e a extremidade da faixa de passagem. Os condutores são conectados formando um “loop” fechado localizado abaixo da linha, conforme mostra a figura 3.7. A circulação de corrente no “loop” gera um campo magnético que contraria o campo gerado pelas correntes nos condutores da linha de transmissão. O resultado é um cancelamento parcial do campo da linha de transmissão [57].

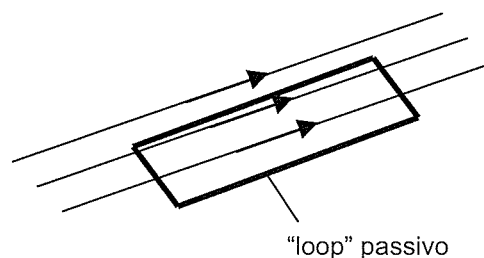


Figura 3.7 – Representação esquemática da blindagem passiva.

No Japão, o estudo da blindagem passiva para uma linha de 170 kV, buscando a redução de campo em casas e edifícios próximos a ela, garantiu reduções de cerca de apenas 18% para os casos estudados [58]. A redução calculada para uma linha de 345 kV indica a possibilidade de redução de até 50% do valor do campo [59].

Há, ainda, a possibilidade de utilização de um maior número de “*loops*” passivos para redução de campo em uma área mais abrangente. A Companhia de Nova York e o EPRI finalizaram, em 1998, o projeto, construção e teste inicial de uma blindagem passiva com dois “*loops*” para reduzir campos magnéticos ao longo de um trecho de uma linha de 345 kV no estado de Nova York [12]. O projeto de dois “*loops*” garantiu a redução simétrica nos dois lados da faixa de passagem em torno de 60%.

Na utilização da blindagem passiva, o valor da corrente é limitado pela resistência e reatância indutiva dos condutores do “*loop*”. A inserção de um capacitor em série com o “*loop*” compensa uma parte da reatância indutiva. Por meio de uma escolha apropriada da capacitância, o aumento de corrente pode ser expressivo e o efeito de blindagem pode ser substancialmente melhorado. Nenhuma fonte externa, além da linha de transmissão, é necessária para suprir a blindagem passiva. No entanto, as perdas do circuito de blindagem são supridas pela linha e devem ser incluídas na avaliação econômica da proposta. As reduções de campo situam-se entre 57 e 85% nas extremidades da faixa de servidão [57,60].

A blindagem passiva pode ser empregada para vãos que atravessem regiões habitadas e, mesmo em sua aplicação mais simples, tem uma importante característica de auto-regulação [60]. Além disso, é relativamente fácil suspender condutores adicionais sob cada fase externa na linha estudada, mas deve-se verificar se a torre comporta o peso adicional. Será necessário, ainda, garantir a distância de isolamento entre fases e o circuito auxiliar.

A blindagem passiva pode apresentar limitações, uma vez que ela precisa ser otimizada para redução do campo em uma região específica [60], não garantindo a redução em outros pontos e distâncias do centro da linha.

Como exemplo, foi estudada a redução de campo para linha de transmissão de 750 kV utilizando a blindagem passiva. Para a distância de 15m do centro da linha, o valor do campo magnético quando a blindagem passiva foi inserida no sistema foi praticamente o dobro do valor sem a blindagem [26]. Devido à proximidade do

circuito de compensação, o campo magnético resultante logo abaixo dos condutores do “loop” tornam-se muito grandes. Esse é um problema encontrado quando o objetivo é a redução de campo logo abaixo dos condutores da linha de transmissão. Assim, essa técnica é muito eficaz quando o local onde será feita a redução de campo é bem definido e somente nele deseja-se reduzir o campo.

### 3.5.3 – Blindagem ativa

Se a blindagem passiva não atingir a redução desejada, uma fonte de corrente pode ser nela inserida. Nesse caso, a técnica utilizada passa a ser caracterizada como uma blindagem ativa.

O princípio de funcionamento da blindagem ativa, ou compensação ativa, consiste, basicamente, na criação de um campo magnético idealmente igual e oposto ao campo indesejado [29]. A criação do campo magnético oposto pode ser feita com a inserção de fontes externas, controladas de tal forma que a maior redução de campo seja obtida, conforme indica a figura 3.8. As extremidades dos condutores que compõem a blindagem são curto-circuitados de forma que os níveis de tensão necessários para injetar correntes que reduzam o campo sejam bem inferiores à tensão nominal da linha.

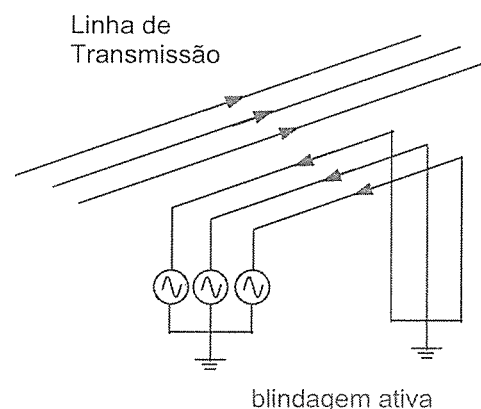


Figura 3.8 – Representação esquemática da blindagem ativa.

Na Suécia, a blindagem ativa foi aplicada a uma linha de transmissão de 420 kV, em um trecho experimental de 3558 m [35]. Foram testadas algumas alternativas para redução de campo magnético: alteração da geometria, blindagem passiva e blindagem ativa. Devido à relevância desse trabalho, ele será detalhadamente descrito a seguir.

A simples alteração da geometria dos condutores de uma configuração horizontal para uma configuração em delta de uma linha de 420 KV já oferece reduções da ordem de 47%.

O estudo das blindagens passiva e ativa foi feito utilizando a configuração em delta apresentada na figura 3.9(a). Os cabos pára-raios são utilizados para compor a blindagem passiva, juntamente com um terceiro cabo construído ao nível do solo. Esse esquema pode ser observado na figura 3.9(b).

Apenas com a adição do terceiro condutor, ocorre uma redução de 13% no valor do campo a 40m do centro da linha. Se condutores com mais baixa resistência forem utilizados e ainda a compensação série for feita, a redução chega a 40%.

Para a aplicação da blindagem ativa a esse sistema, foi utilizado um programa computacional para cálculo das amplitudes e fases de cada condutor da blindagem para reduzir o campo em um ponto específico. A fonte de tensão externa foi conectada a uma das extremidades do trecho experimental nos três condutores da blindagem. As outras extremidades foram aterradas. Amplitudes e fases foram calculadas para as correntes da blindagem em três pontos específicos: 20, 40 e 60m do centro da linha. Para cada um dos pontos, diferentes correntes foram injetadas na blindagem. Os resultados para medições dos campos emitidos pela linha com e sem a blindagem ativa são mostradas na tabela 3.1.

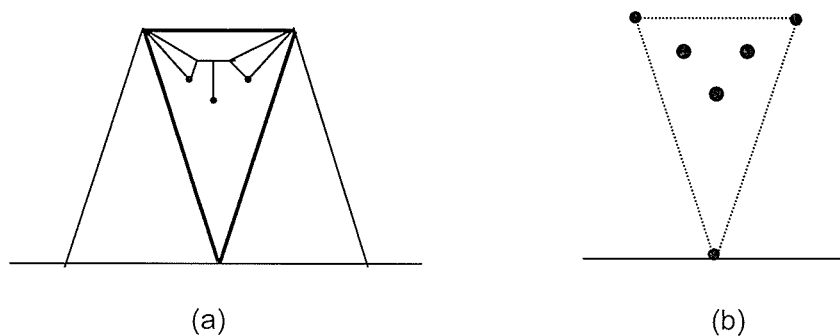


Figura 3.9 – Configuração em delta da linha de 420 kV [35]: (a) Torre; (b) condutores fase e da blindagem.



Tabela 3.1 – Comparação entre valores de campo sem e com a blindagem ativa [35]:  
 $d$  – distância do ponto de cálculo ao centro da LT; valores de  $B$  em  $\mu\text{T}$ .

| $d$ | Medição      |              | Cálculo      |              |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|
|     | S/ Blindagem | C/ Blindagem | S/ Blindagem | C/ Blindagem |
| 20  | 2,39         | 1,47         | 2,27         | 1,38         |
| 40  | 0,90         | 0,43         | 0,81         | 0,38         |
| 60  | 0,46         | 0,21         | 0,39         | 0,17         |

A melhor redução obtida foi de 52% a 40 m do centro da linha, onde o valor de campo original de  $0,90 \mu\text{T}$  foi reduzido para  $0,43 \mu\text{T}$ .

Vale ressaltar que essa técnica fornece a redução de campo em um ponto específico, não garantindo a redução ao longo de toda a faixa de servidão. Na realidade, apenas a partir da distância de 15 m do centro da linha reduções foram obtidas. Para distâncias menores que 15 m, o campo aumentou com a utilização da blindagem, devido à proximidade do condutor enterrado [35].

Os custos avaliados para essa técnica são da ordem de 20% superiores aos de uma linha típica. No entanto, a técnica precisa ser aplicada apenas a alguns trechos da linha nas proximidades de regiões habitadas. Além disso, a alteração de poucos trechos da linha com a introdução da blindagem não afeta os parâmetros da linha nem a operação do sistema.

Alguns outros pesquisadores vêm se dedicando ao projeto de um sistema de blindagem ativa para campos magnéticos gerados por linhas de transmissão [61]. Os resultados preliminares indicam que a blindagem ativa é possivelmente a técnica mais eficiente nas reduções de campos gerados por linhas de transmissão.

### 3.6 – Considerações Finais

As linhas de transmissão constituem importantes fontes de campo magnético de 60 Hz. Alguns métodos para redução dos níveis de campo provenientes de linhas foram apresentados, mas as reduções alcançadas por eles podem ser, muitas vezes, insuficientes.

Buscando reduções superiores às obtidas com as diferentes técnicas até aqui apresentadas, torna-se necessário avaliar as reduções possíveis com a aplicação da blindagem ativa em linhas de transmissão.

Nesse sentido, o capítulo seguinte discute alguns aspectos específicos da utilização da blindagem ativa em linhas de transmissão. A eficiência da blindagem ativa é calculada e as alterações inseridas na linha de transmissão original são avaliadas.

---

## ***4 – Blindagem Ativa em Linhas de Transmissão Aéreas***

### ***4.1 – Introdução***

Neste capítulo, a aplicação da blindagem ativa para redução de campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão aéreas será avaliada, a partir do cálculo dos valores de campo nas proximidades de algumas estruturas típicas com e sem a blindagem.

Buscando aumentar a eficiência da blindagem ativa, um estudo da otimização de seus parâmetros é apresentado, a partir de simulações computacionais.

Finalmente, dois outros importantes aspectos da blindagem ativa são analisados: a alteração dos parâmetros da linha de transmissão e as perdas inseridas no sistema original pela blindagem.

### ***4.2 – Redução do Campo Magnético com a Blindagem Ativa***

No capítulo anterior, foram apresentadas algumas técnicas de redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão e as reduções alcançadas com cada uma delas. A eficiência da blindagem ativa será aqui apresentada, a partir de algumas estruturas típicas de linhas de transmissão de alta tensão.

Como exemplo, quatro estruturas são apresentadas, com as seguintes tensões nominais: 750 kV, 420 kV, 345 kV e 138 kV. A configuração das torres utilizadas e os resultados obtidos, a partir de um programa de cálculo de campo, desenvolvido em [27], são mostrados nas figuras 4.1 a 4.4.

Nas estruturas de 750 e 345 kV, os perfis de campo sem blindagem e com blindagem ativa são comparados com a blindagem passiva, estudada em trabalhos anteriores [26,59], como mostram as figuras 4.1 e 4.2. Na estrutura de 420 kV, os cabos pára-raios são utilizados para compor o sistema de blindagem ativa, junto

com um terceiro condutor, conforme indica a figura 4.3. Finalmente, a blindagem de uma linha de 138 kV é também avaliada.

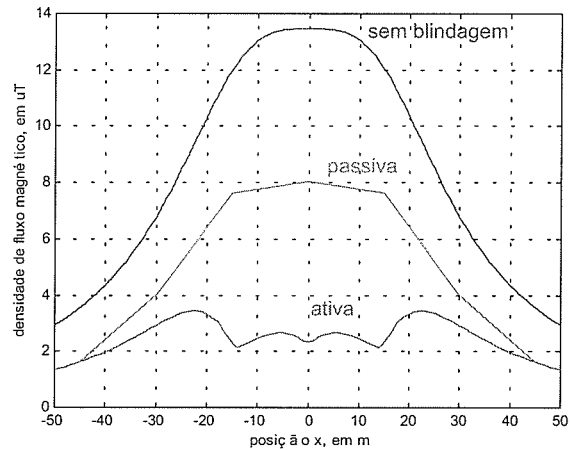
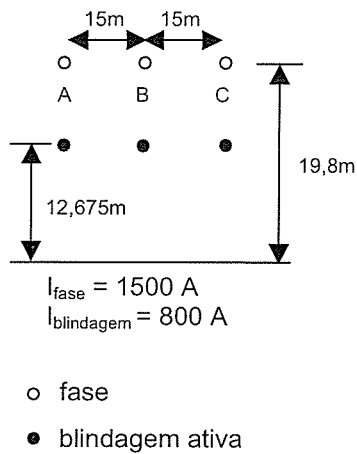


Figura 4.1 – Linha de Transmissão de 750 kV: perfis de campo sem blindagem, com blindagem passiva [26] e blindagem ativa.

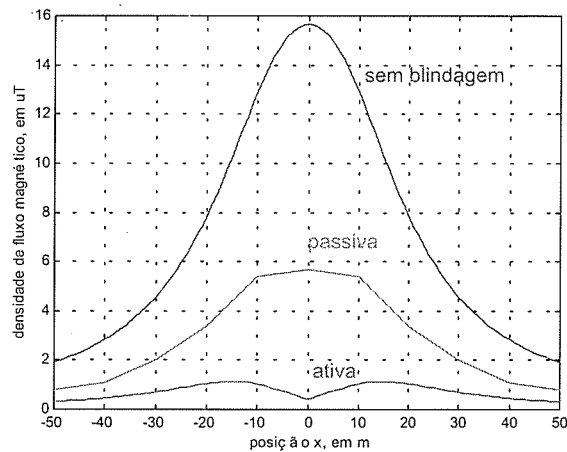
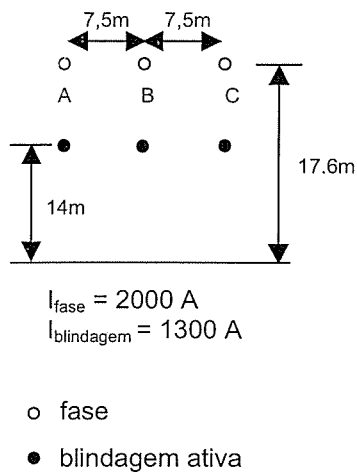


Figura 4.2 – Linha de Transmissão de 345 kV: perfis de campo sem blindagem, com blindagem passiva [59] e blindagem ativa.

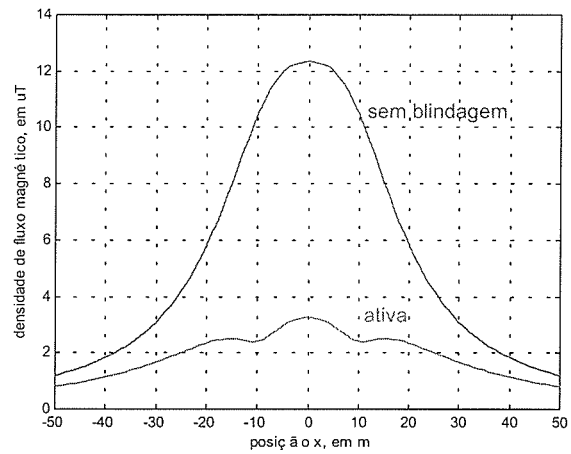
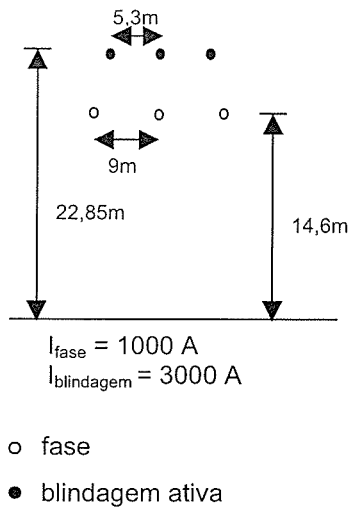


Figura 4.3 – Linha de Transmissão de 420 kV: perfis de campo sem blindagem e com blindagem ativa, utilizando os cabos pára-raios.

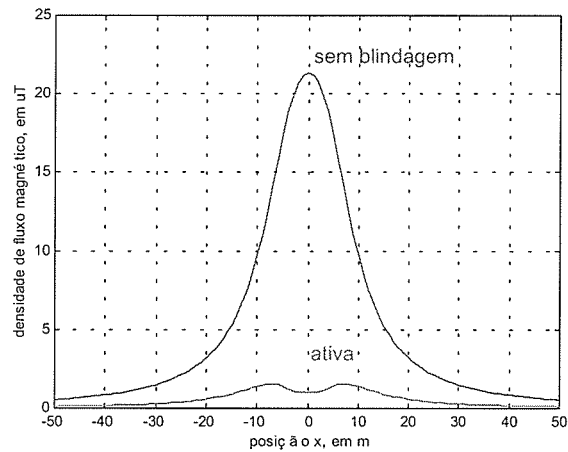
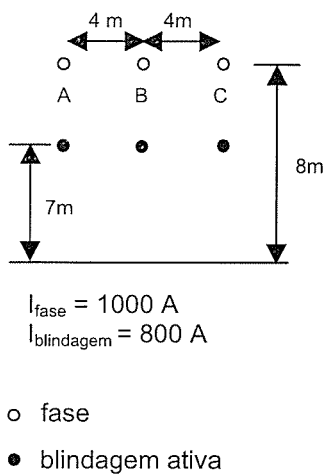


Figura 4.4 – Linha de Transmissão de 138 kV: perfis de campo sem blindagem e com blindagem ativa.

Verifica-se uma eficiência da blindagem ativa bastante superior à blindagem passiva nas linhas de 345 e 500 kV, figuras 4.1 e 4.2. As reduções de campo variam de 66 a 90%, dependendo do ponto de cálculo. No caso do aproveitamento dos cabos pára-raios, linha de 420 kV (figura 4.3), reduções da ordem de 80% são

obtidas. Finalmente, no caso da linha de 138 kV analisada, chega-se a reduções de até 90%, conforme mostrado na figura 4.4.

A localização dos condutores da blindagem, nos casos apresentados, foi escolhida de forma a manter a distância de isolamento entre os sistemas de blindagem e fase. No entanto, vale a pena analisar o ganho que se pode obter com a escolha dos parâmetros a partir de um programa de otimização aplicado à blindagem ativa, com as devidas restrições do problema. Essa análise é apresentada na próxima seção.

### **4.3 – A Otimização Aplicada à Blindagem Ativa**

A eficiência da blindagem ativa depende diretamente da localização de seus condutores e das correntes que neles circulam. A má escolha desses parâmetros pode levar a uma baixa redução de campo ou até mesmo à elevação de seus valores.

A determinação dos melhores valores de corrente e da melhor localização dos condutores da blindagem ativa não é uma tarefa trivial. Uma das maneiras pela qual pode-se determinar tais parâmetros é a utilização de métodos de otimização, buscando determinar os valores que minimizem os campos na região de interesse.

O objetivo desta seção é realizar um estudo preliminar para avaliar a otimização como ferramenta de melhoria da blindagem ativa, analisando suas soluções e verificando as reduções de campo obtidas. Não se pretende estudar métodos de otimização nem determinar o melhor algoritmo para este problema específico. A partir dos resultados deste estudo, pode-se ter uma estimativa se estudos de otimização futuros para melhorar a técnica de blindagem ativa são indicados ou não. O estudo realizado foi estritamente computacional, sendo que fatores econômicos e técnicos, tais como a sustentação dos cabos e a suportabilidade mecânica das torres já existentes, não foram avaliados.

#### **4.3.1 – Definição do problema**

Um problema de otimização pode ser expresso como:

---

$$x^* = \arg \min_x f(x) \quad \text{sujeita a} \quad \begin{cases} g_i(x) \leq 0; i=1, \dots, r \\ h_i(x) = 0; i=1, \dots, p \end{cases} \quad (4.1)$$

A expressão (4.1) significa que a otimização deve ser capaz de determinar o vetor  $x^*$  que minimiza a função  $f(x)$ , atendendo a certas restrições que correspondem a limitações de natureza física ou tecnológica.

Os elementos da otimização englobam as variáveis do problema, a função objetivo e as restrições.

#### a) variáveis do problema

As variáveis são as quantidades ou grandezas cujos valores numéricos serão determinados no processo de obtenção da solução do problema. No caso da blindagem ativa, as variáveis são as posições dos condutores da blindagem ativa e as correntes que neles circulam. As variáveis do problema são definidas pela figura 4.5, que apresenta a estrutura hipotética de uma linha de transmissão.

O sistema possui três condutores fixos, que são as fases da linha de transmissão. Esses condutores possuem posição e correntes bem definidas, conforme indicado na figura 4.5.

As outras variáveis do problema referem-se às características da blindagem ativa, a serem otimizadas: suas posições e correntes.

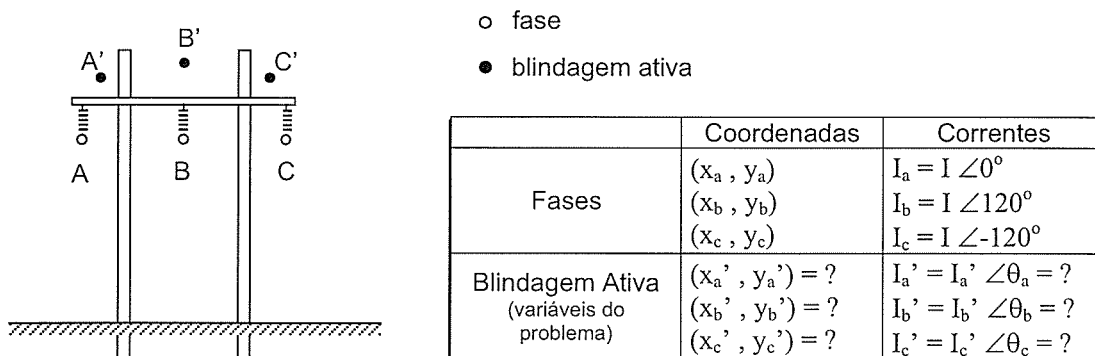


Figura 4.5 – Definição das variáveis do problema de otimização.

### b) restrições

As restrições do problema são basicamente de duas naturezas: as posições e as correntes dos condutores da blindagem ativa. As posições e correntes nos condutores fase serão sempre as mesmas, ou seja, são as características da linha de transmissão original.

As posições  $x$  e  $y$  de cada condutor devem manter a distância de isolamento entre condutores das fases e da blindagem ativa, além de garantir uma distância mínima do solo.

Os valores de módulo e ângulo da corrente também devem ser observados. Dependendo do caso, uma corrente específica pode gerar uma diminuição tal que compense o investimento em fontes não convencionais. Por outro lado, correntes muito elevadas podem tornar inviável a aplicação da blindagem, o que deve ser avaliado.

Para cada caso, restrições pertinentes devem ser impostas.

### c) função objetivo

A função objetivo é definida como uma equação matemática que engloba as variáveis do problema. No problema em questão, a função objetivo é dada como a expressão para o cálculo da densidade de fluxo magnético nas proximidades da linha de transmissão.

A figura 4.6 indica a região onde se deseja minimizar o campo. Essa região representa a faixa de servidão de linhas de transmissão.

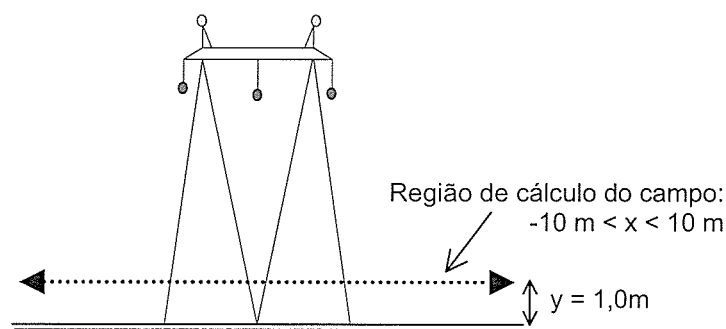


Figura 4.6 – Região onde se deseja minimizar a densidade de fluxo magnético.



A região de cálculo do campo é definida por uma linha a 1,0 m de altura a até uma distância de 10 m do centro da linha, na direção “x”, como mostra a figura 4.6. O cálculo do campo é feito de 2 em 2 m.

A expressão para cálculo da densidade de fluxo magnético em um ponto  $(x_p, y_p)$  devido a um único condutor de comprimento  $L$ , localizado em  $(x_a, y_a)$  e percorrido por uma corrente  $I_A$  é dada por [27]:

$$B_{total} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (4.2)$$

$$\text{onde } B_x = \frac{\mu I_A}{2\pi} (y_p - y_a) \left[ \frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{L^2 + r_A^2}\right)} - \frac{1}{r_A^2} \right];$$

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

$$r_A^2 = (x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2.$$

Como o sistema é trifásico, a expressão de  $B_x$  e  $B_y$  deve considerar a contribuição de campo de cada condutor, além dos condutores da blindagem ativa, quando ela estiver presente.

A expressão (4.2) é calculada para um ponto específico  $(x_p, y_p)$ . Como o objetivo do problema é o cálculo do campo em uma região, a função objetivo passa a ser definida como:

$$f(x) = B_{TOTAL} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{B_{total\ i} - B_{ref}}{B_{ref}} \right)^2 \quad (4.3)$$

onde  $B_{ref}$  é um valor fixado em 1,0  $\mu\text{T}$  para os casos analisados.

O objetivo do problema é definido, assim, como determinar as variáveis que reduzam os níveis de campo magnético a valores inferiores a 1,0  $\mu\text{T}$  na faixa de servidão, definida como uma distância de 10 m a partir do centro da linha de transmissão.

Como afirmado anteriormente e observado na expressão (4.2), a função objetivo depende das características das fases, as quais permanecem constantes, e das características da blindagem ativa, que serão as variáveis do problema.

Assim, o problema de otimização em estudo passa a ser definido pela expressão (4.1), onde  $f(x)$  é definida pela expressão (4.3) e as restrições são estabelecidas para cada caso em estudo.

Vale ressaltar que o cálculo da densidade de campo magnético é feito a partir de um programa computacional, baseado na Lei de Biot-Savart, desenvolvido em [27] e já descrito anteriormente.

#### **4.3.2 - Método utilizado**

Neste trabalho, foi utilizado o método elipsoidal para resolver o problema de escolha da melhor posição e/ou valor da corrente para os condutores da blindagem ativa.

O algoritmo elipsoidal é um método determinístico e foi inicialmente proposto por Iudin e Nemirovskii [62]. O algoritmo parte de um elipsóide centrado num ponto inicial. A cada iteração um novo elipsóide de menor volume, contendo a solução, é determinado. Como o elipsóide inicial contém, por premissa, a solução e como cada novo elipsóide também a contém, a seqüência do algoritmo converge para a solução. Toda a formulação do método elipsoidal pode ser encontrada em [63].

O programa original utilizado nas simulações apresentadas neste trabalho foi implementado e desenvolvido por Saldanha [64]. Foram feitas as adaptações necessárias para que o programa calculasse os parâmetros da blindagem ativa que reduzissem o campo magnético na faixa de servidão das linhas de transmissão para valores inferiores a  $1,0 \mu\text{T}$ .

A seguir será apresentado um exemplo da aplicação da otimização na determinação dos melhores parâmetros para a minimização do campo gerado por uma linha de transmissão típica de 138 kV.

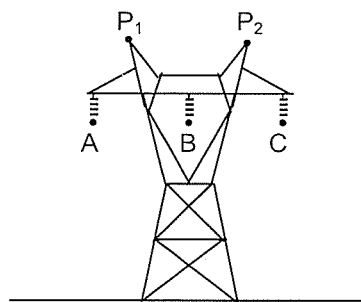
### 4.3.3 - Exemplo de aplicação

A estrutura T4R, mostrada na figura 4.7, é utilizada em linhas de transmissão de 138 kV. A corrente nominal foi considerada igual a 100 A, com correntes equilibradas, defasadas de  $120^\circ$  entre si.

Duas situações distintas foram analisadas: a instalação dos condutores da blindagem ativa sobre e sob os condutores fase. No primeiro caso, foi avaliada, ainda, a alternativa de utilização dos cabos pára-raios como condutores da blindagem ativa.

#### a) disposição dos condutores sobre as fases

A primeira alternativa estudada foi a instalação dos condutores da blindagem sobre os cabos fase. A tabela 4.1 detalha os casos avaliados, mostrando as restrições impostas às variáveis do sistema. Os resultados da otimização são apresentados na tabela 4.2.



$$\begin{aligned} x_A &= -4,0 \text{ m} & y_A &= 10,0 \text{ m} \\ x_B &= 0,0 \text{ m} & y_B &= 10,0 \text{ m} \\ x_C &= 4,0 \text{ m} & y_C &= 10,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{P1} &= -2,5 \text{ m} & y_{P1} &= 13,0 \text{ m} \\ x_{P2} &= 2,5 \text{ m} & y_{P2} &= 13,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_A &= 100 \angle 0^\circ \text{ A} \\ I_B &= 100 \angle 120^\circ \text{ A} \\ I_C &= 100 \angle -120^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Figura 4.7 – Configuração dos condutores da estrutura T4R, utilizada nas simulações.

Tabela 4.1 – Restrições para a instalação dos condutores da blindagem ativa sobre as fases.

|        | Posições                             |                             | Correntes  |   |
|--------|--------------------------------------|-----------------------------|--|---|
|        | $x$ (m)                              | $y$ (m)                     | módulo (A)                                       | ângulo ( $^{\circ}$ )   |
| Caso a | $x_a = -4$<br>$x_b = 0$<br>$x_c = 4$ | $y_a = y_b = y_c = 11,5$    | $ I_a ,  I_b ,  I_c  < 200$                      | "livres"  |
| Caso b | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $11,5 < y_a, y_b, y_c < 16$ | $ I_a  =  I_b  =  I_c  = 100$                    | $\theta_a = 0^{\circ}; \theta_b = 120^{\circ}; \theta_c = -120^{\circ}$ |
| Caso c | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $11,5 < y_a, y_b, y_c < 16$ | $0 <  I  < 120$<br>$ I_a  =  I_b  =  I_c $       | $\theta_a = 0^{\circ}; \theta_b = 120^{\circ}; \theta_c = -120^{\circ}$ |
| Caso d | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $11,5 < y_a, y_b, y_c < 16$ | $0 <  I  < 150$<br>$ I_a  \neq  I_b  \neq  I_c $ | $\theta_a = 0^{\circ}; \theta_b = 120^{\circ}; \theta_c = -120^{\circ}$ |
| Caso e | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $11,5 < y_a, y_b, y_c < 16$ | $ I_a ,  I_b ,  I_c  < 200$                      | "livres"  |

Tabela 4.2 – Resultados das simulações para a instalação dos condutores sobre as fases.

|        | $x_a$       | $x_b$       | $x_c$      | $y_a$ | $y_b$ | $y_c$ | $I_a$                                 | $I_b$                                 | $I_c$                                |
|--------|-------------|-------------|------------|-------|-------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Caso a | -4          | 0           | 4          | 11,5  | 11,5  | 11,5  | <b>159,8</b> $\angle$ -160 $^{\circ}$ | <b>120,0</b> $\angle$ -6,4 $^{\circ}$ | <b>75,0</b> $\angle$ 65,7 $^{\circ}$ |
| Caso b | <b>-5,0</b> | <b>0,0</b>  | <b>5,0</b> | 11,5  | 11,7  | 11,5  | -100 $\angle$ 0 $^{\circ}$            | -100 $\angle$ 120 $^{\circ}$          | -100 $\angle$ -120 $^{\circ}$        |
| Caso c | <b>-4,2</b> | <b>0,0</b>  | <b>4,2</b> | 11,5  | 11,5  | 11,5  | -120 $\angle$ 0 $^{\circ}$            | -120 $\angle$ 120 $^{\circ}$          | -120 $\angle$ -120 $^{\circ}$        |
| Caso d | <b>-3,3</b> | <b>0,0</b>  | <b>3,3</b> | 11,5  | 11,5  | 11,5  | -148 $\angle$ 0 $^{\circ}$            | -150 $\angle$ 120 $^{\circ}$          | -148 $\angle$ -120 $^{\circ}$        |
| Caso e | <b>3,5</b>  | <b>-3,4</b> | <b>0,5</b> | 11,5  | 11,5  | 11,5  | 156 $\angle$ 71 $^{\circ}$            | 150 $\angle$ 180 $^{\circ}$           | 180 $\angle$ -56 $^{\circ}$          |

Obs: em negrito, as variáveis otimizadas.

Utilizando os valores mostrados na tabela 4.2, foram traçados os perfis de campo que são mostrados na figura 4.8. O perfil de campo sem a blindagem é também traçado para que os resultados possam ser melhor avaliados.

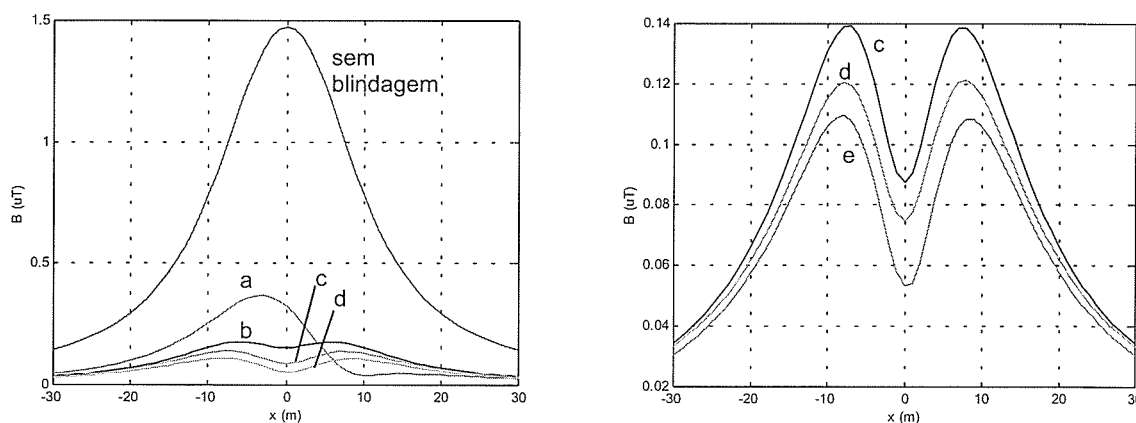


Figura 4.8 – Perfis de campo utilizando os resultados da otimização: instalação dos condutores da blindagem sobre as fases (tabela 4.2).

Tabela 4.3 – Reduções percentuais para os casos de otimização com a instalação dos condutores da blindagem sobre as fases.

|               | <i>Máxima</i> | <i>Mínima</i> | <i>Média</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <i>Caso a</i> | 94,9          | 65,9          | 77,5         |
| <i>Caso b</i> | 89,5          | 75,3          | 79,5         |
| <i>Caso c</i> | 94,1          | 76,0          | 81,8         |
| <i>Caso d</i> | 94,9          | 76,7          | 83,3         |
| <i>Caso e</i> | 96,4          | 78,7          | 84,7         |

As reduções percentuais de cada caso comparado com a não utilização da blindagem ativa podem ser observadas na tabela 4.3.

Em todos os casos, a blindagem ativa levou a um perfil de campo melhor (menores valores) que a não utilização da blindagem.

Analisando os resultados, observa-se que o “caso a” apresenta a pior solução. Esse caso refere-se à otimização das correntes nos condutores, estando os mesmos fixos em posições pré-estabelecidas. Além da baixa redução de campo, essa alternativa resulta em correntes que não apresentam um defasamento de  $120^\circ$  entre si, sendo necessárias fontes de tensão não convencionais, com a utilização de inversores, por exemplo. Isso pode levar a um custo mais elevado do projeto, o que pode inviabilizar sua aplicação.

O “caso b”, otimização das posições dos condutores, mantendo as correntes iguais e contrárias às fases, apresenta uma melhora significativa comparada ao primeiro caso, chegando a valores máximos de 89,5%.

Uma pequena melhora é observada quando os módulos das correntes dos condutores da blindagem ativa podem ser diferentes das correntes nas fases, mas permanecem iguais entre si e defasadas com o mesmo ângulo de  $120^\circ$ , “caso c”.

Analisando os três últimos casos, observa-se uma diferença muito pequena entre eles. O melhor resultado é obtido com o “caso e”, em que as correntes não apresentam o mesmo defasamento entre si, mas muito próximo de  $120^\circ$ . No entanto, o ganho é muito pequeno se comparado com os outros casos, não ultrapassando 3%. O “caso e” possui a desvantagem de necessitar do uso de fontes especiais para a injeção das correntes exatas obtidas como solução do programa de otimização, o que levaria a um alto custo de projeto.

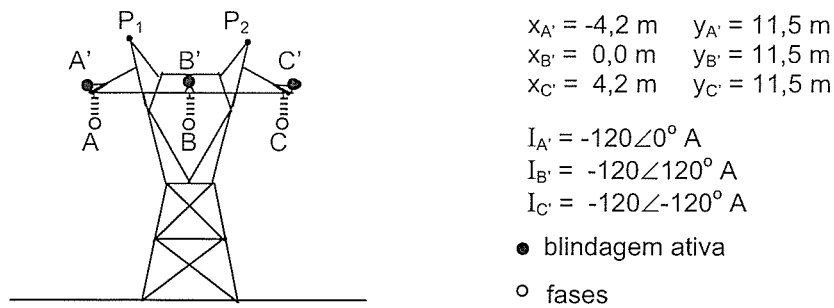


Figura 4.9 – Blindagem ativa com parâmetros resultantes da otimização

Assim, dentre as soluções encontradas, conciliando o custo do projeto e a redução dos valores de campo na região de interesse, a melhor solução é resultante do “caso c”, em que as variáveis de otimização são as posições dos condutores e o módulo das correntes. O resultado são correntes contrárias às correntes das fases, mas com amplitudes diferentes das mesmas. A configuração da torre com os cabos da blindagem ativa ficaria com o aspecto mostrado na figura 4.9.

#### b) aproveitamento dos cabos pára-raios

Uma outra alternativa interessante estudada é o aproveitamento dos cabos pára-raios para a injeção das correntes da blindagem ativa. Essa talvez seja a alternativa mais viável economicamente, uma vez que não seriam necessários condutores extras para a blindagem, aproveitando-se a estrutura da torre já existente. Assim, a configuração mostrada na figura 4.10 foi testada com a blindagem ativa utilizando os cabos pára-raios. Em uma outra tentativa, a simulação foi feita com o acréscimo de um terceiro condutor entre os cabos pára-raios, conforme indica a figura 4.10.

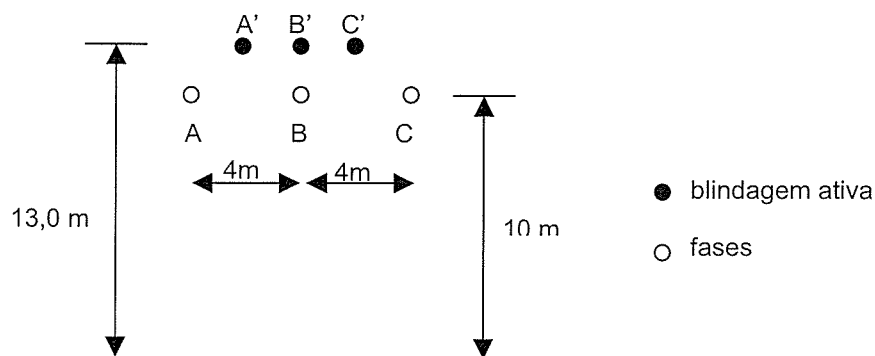


Figura 4.10 – Aproveitamento dos cabos pára-raios para a blindagem ativa.

Tabela 4.4 – Restrições para os casos estudados com aproveitamento dos cabos pára-raios.

|         | Posições                                 |                        | Correntes  |   |
|---------|--|------------------------|--|---|
|         | $x$ (m)                                  | $y$ (m)                | módulo (A)                                       | ângulo ( $^{\circ}$ )   |
| Caso f  | $x_a = -2,5$<br>$x_b = 0$<br>$x_c = 2,5$ | $y_a = y_b = y_c = 13$ | $ I_a ,  I_b ,  I_c  < 200$                      | "livres"  |
| Caso g  | $x_a = -2,5$<br>$x_b = 0$<br>$x_c = 2,5$ | $y_a = y_b = y_c = 13$ | $0 <  I  < 150$<br>$ I_a  \neq  I_b  \neq  I_c $ | $\theta_a = 0^{\circ}; \theta_b = 120^{\circ}; \theta_c = -120^{\circ}$ |
| Caso h* | $x_a = -2,5$<br>$x_b = 2,5$              | $y_a = y_b = y_c = 13$ | $ I_a ,  I_b ,  I_c  < 200$                      | "livres"  |

\* uso de apenas dois condutores

Tabela 4.5 – Resultados da otimização com o aproveitamento dos cabos pára-raios.

|        | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $y_a$ | $y_b$ | $y_c$ | $I_a$                               | $I_b$                               | $I_c$                                |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Caso f | -2,5  | 0,0   | 2,5   | 13,0  | 13,0  | 13,0  | <b>212</b> ∠ <b>135</b> $^{\circ}$  | <b>64.5</b> ∠ <b>74</b> $^{\circ}$  | <b>159</b> ∠ <b>33.6</b> $^{\circ}$  |
| Caso g | -2,5  | 0,0   | 2,5   | 13,0  | 13,0  | 13,0  | <b>-123</b> ∠ <b>0</b> $^{\circ}$   | <b>-135</b> ∠ <b>120</b> $^{\circ}$ | <b>-150</b> ∠ <b>-120</b> $^{\circ}$ |
| Caso h | -2,5  | 2,5   | ---   | 13,0  | 13,0  | ---   | <b>186</b> ∠ <b>-141</b> $^{\circ}$ | <b>186</b> ∠ <b>39</b> $^{\circ}$   | ---                                  |

Obs: em negrito, as variáveis otimizadas.

As restrições são mostradas na tabela 4.4, onde os casos "f" e "g" utilizam três condutores para a blindagem ativa, enquanto o "caso h" utiliza apenas os cabos pára-raios. As soluções atingidas para cada caso estão indicadas na tabela 4.5.

A figura 4.11 apresenta os perfis de campo para os resultados da otimização e as reduções percentuais são mostradas na tabela 4.6.

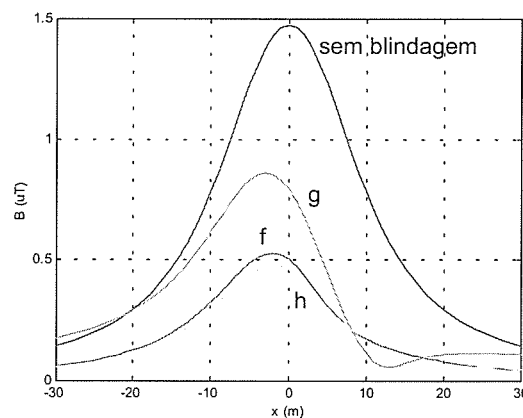


Figura 4.11 – Perfis de campo utilizando os resultados da otimização: aproveitamento dos cabos pára-raios (tabela 4.5).

Tabela 4.6 – Reduções percentuais para os casos de otimização com o aproveitamento dos cabos pára-raios.

|               | <i>Máxima</i> | <i>Mínima</i> | <i>Média</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <i>Caso f</i> | 77,5          | 57,2          | 65,8         |
| <i>Caso g</i> | 90,5          | -23,7         | 36,5         |
| <i>Caso h</i> | 77,3          | 60,2          | 67,2         |

Analisando os resultados, pode-se concluir que a pior alternativa é o “caso g”, em que as correntes da blindagem ativa são contrárias às correntes das fases, mas com diferentes módulos.

As alternativas dos “casos f” e “h” levam a resultados muito semelhantes. No entanto, como o “caso h” utiliza apenas os cabos pára-raios, sem o acréscimo de um terceiro condutor, ele é uma melhor opção.

A opção de utilizar o cabo pára-raios para a injeção de corrente pode ser uma boa alternativa, apesar da redução obtida ser cerca de 15% menor quando comparado com o “caso c”. No entanto, dependendo da necessidade de redução de campo, a sua aplicação já pode ser suficiente. Ela apresenta a vantagem de não necessitar do lançamento de condutores extras para a injeção de corrente, o que reduz consideravelmente o custo do projeto da blindagem.

### **c) disposição dos condutores sob as fases**

A alternativa de instalação dos condutores da blindagem sob as fases foi feita de forma semelhante ao caso anterior. As restrições e características de cada caso analisado são detalhadas na tabela 4.7 e as soluções encontradas são mostradas na tabela 4.8.



Tabela 4.7 – Restrições para a instalação da blindagem ativa sob as fases.

|        | Posições                             |                           | Correntes                                  |   |
|--------|--------------------------------------|---------------------------|--|---|
|        | x (m)                                | y (m)                     | módulo (A)                                 | ângulo (°)  |
| Caso a | $x_a = -4$<br>$x_b = 0$<br>$x_c = 4$ | $y_a = y_b = y_c = 8,5$   | $  a ,  b ,  c  < 200$                     | "livres"  |
| Caso b | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $7 < y_a, y_b, y_c < 8,5$ | $  a  =  b  =  c  = 100$                   | $\theta_a = 0^\circ; \theta_b = 120^\circ; \theta_c = -120^\circ$ |
| Caso c | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $7 < y_a, y_b, y_c < 8,5$ | $0 <    < 120$<br>$  a  =  b  =  c $       | $\theta_a = 0^\circ; \theta_b = 120^\circ; \theta_c = -120^\circ$ |
| Caso d | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $7 < y_a, y_b, y_c < 8,5$ | $0 <    < 150$<br>$  a  \neq  b  \neq  c $ | $\theta_a = 0^\circ; \theta_b = 120^\circ; \theta_c = -120^\circ$ |
| Caso e | $-5 < x_a, x_b, x_c < 5$             | $7 < y_a, y_b, y_c < 8,5$ | $  a ,  b ,  c  < 200$                     | "livres"  |

Tabela 4.8 – Resultados da otimização com a instalação da blindagem ativa sob as fases.

|        | $x_a$       | $x_b$       | $x_c$      | $y_a$      | $y_b$      | $y_c$      | $I_a$                     | $I_b$                       | $I_c$                       |
|--------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Caso a | -4,0        | 0,0         | 4,0        | 8,5        | 8,5        | 8,5        | <b>55,4</b> ∠ <b>112°</b> | <b>161</b> ∠ <b>-111,5°</b> | <b>127,6</b> ∠ <b>50,8°</b> |
| Caso b | <b>-2,9</b> | <b>0,0</b>  | <b>2,9</b> | <b>8,5</b> | <b>8,3</b> | <b>8,5</b> | -100∠0°                   | -100∠120°                   | -100∠-120°                  |
| Caso c | <b>-4,8</b> | <b>0,0</b>  | <b>4,8</b> | <b>8,4</b> | <b>8,5</b> | <b>8,4</b> | <b>-65</b> ∠0°            | <b>-65</b> ∠120°            | <b>-65</b> ∠-120°           |
| Caso d | <b>-4,9</b> | <b>0,0</b>  | <b>4,9</b> | <b>8,5</b> | <b>8,5</b> | <b>8,5</b> | <b>-65,6</b> ∠0°          | <b>-63,2</b> ∠120°          | <b>-65,6</b> ∠-120°         |
| Caso e | <b>5,0</b>  | <b>-5,0</b> | <b>0,0</b> | <b>8,5</b> | <b>8,5</b> | <b>7,7</b> | <b>59</b> ∠ <b>46°</b>    | <b>59</b> ∠ <b>-166°</b>    | <b>33</b> ∠ <b>-60°</b>     |

Obs: em negrito, as variáveis otimizadas.

Utilizando os valores mostrados na tabela 4.8, foram traçados os perfis de campo para cada caso, os quais são mostrados na figura 4.12. As reduções percentuais são apresentadas na tabela 4.9.

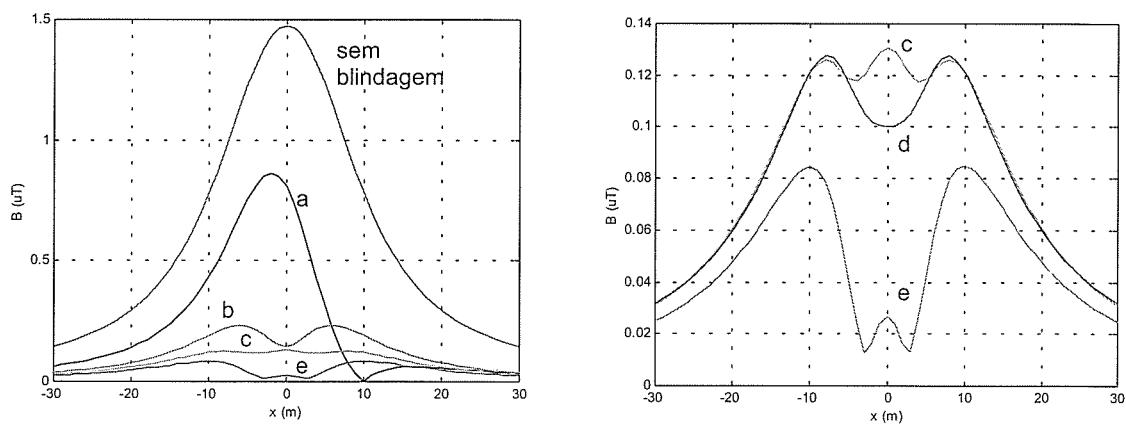


Figura 4.12 – Perfis de campo utilizando os resultados da otimização: instalação da blindagem ativa sob as fases.

Tabela 4.9 – Reduções percentuais para os casos de otimização com a instalação dos condutores da blindagem sob as fases.

|               | <i>Máxima</i> | <i>Mínima</i> | <i>Média</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <i>Caso a</i> | 99,8          | 38,3          | 63,8         |
| <i>Caso b</i> | 90,2          | 73,2          | 76,5         |
| <i>Caso c</i> | 91,3          | 78,4          | 83,1         |
| <i>Caso d</i> | 93,2          | 77,8          | 83,3         |
| <i>Caso e</i> | 99,1          | 82,7          | 88,1         |

A solução que apresentou as maiores reduções de campo é o “caso e”. No entanto, a diferença entre os ganhos dos “casos c” e “e”, quando da utilização dos condutores sob as fases, é de no máximo 8%. Vale ressaltar novamente que se deve conjugar o custo do projeto e a redução de campo para a escolha da melhor solução.

A figura 4.13 mostra a comparação entre os casos “e” do posicionamento dos condutores sobre e sob as fases e os casos com utilização dos cabos pára-raios. Reduções muito semelhantes são observadas para a disposição dos condutores sobre e sob as fases, apesar das soluções serem completamente diferentes. A utilização dos cabos pára-raios apresenta eficiência bem menor. Vale salientar, no entanto, que a decisão final de qual solução será empregada deve levar em conta, além da redução de campo, fatores técnicos e econômicos.

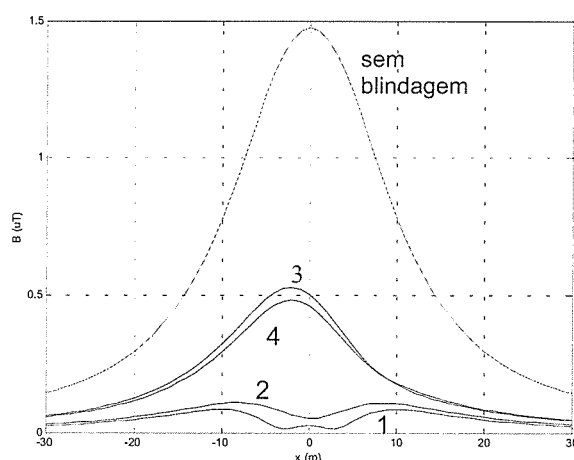


Figura 4.13 – Comparação entre as soluções obtidas com a otimização: (1) blindagem ativa sob as fases; (2) blindagem ativa sobre as fases; (3) cabos pára-raios, com três condutores; (4) cabos pára-raios, utilizando somente os dois condutores originais.

No projeto da blindagem ativa, a otimização é utilizada como ferramenta para auxiliar na determinação do conjunto de soluções que podem reduzir os valores de campo. Fatores técnicos e econômicos serão, no entanto, determinantes na escolha da solução de blindagem. Nesse contexto, a solução que apresenta, por exemplo, correntes assimétricas, não defasadas de  $120^\circ$ , necessitará de fontes especiais para obtenção das correntes. Isso poderá ser alcançado com a utilização de inversores alimentando cargas adequadamente escolhidas. Nesse caso, o custo do projeto poderá ser um fator impeditivo, o que deverá ser avaliado. A análise de custo/benefício deverá ser feita para que a melhor alternativa seja escolhida. Nos casos estudados com a disposição dos condutores da blindagem sobre as fases, por exemplo, a redução de campo com correntes assimétricas (“caso e”) pode não compensar o investimento em fontes especiais, uma vez que reduções próximas podem ser obtidas com fontes convencionais (“caso c”).

Uma outra questão a ser avaliada seria a necessidade de redução de campo em apenas um dos lados da linha de transmissão. Nesse caso, outra solução não obtida nas simulações realizadas poderia gerar melhor resultado, já que a função objetivo seria outra. No entanto, essa avaliação está fora do escopo deste trabalho.

#### **4.4 – Influência da Blindagem Ativa na Linha de Transmissão**

A inserção de qualquer artifício objetivando a redução de campo magnético em linhas de transmissão acarretará perdas para o sistema. Essas perdas devem ser avaliadas para que a viabilidade técnica e econômica da técnica de blindagem seja assegurada.

No caso da blindagem ativa, a introdução de condutores auxiliares dispostos paralelamente aos cabos fase levará à alteração dos parâmetros da linha de transmissão (indutâncias, capacitâncias, etc.). A avaliação das perdas inseridas no sistema bem como a alteração dos parâmetros da linha são importantes para avaliar o impacto da blindagem no sistema original.

A técnica da blindagem ativa consiste na criação de correntes tais que minimizem o campo magnético criado pelo sistema. Dependendo da localização dos condutores auxiliares, valores específicos de corrente devem ser utilizados,

conforme discutido na seção anterior. A injeção de corrente pode ser feita com a utilização de TC's, conforme detalhado no capítulo 2, ou com a utilização de fontes de tensão independentes do sistema original. A escolha do tipo de fonte dependerá de fatores técnicos e econômicos e uma pesquisa de mercado deverá ser feita para obter o projeto de menor custo.

Com o objetivo de simplificação do cálculo das perdas e do estudo do impacto da blindagem no sistema original, será analisada, inicialmente, a utilização de fontes independentes.

O estudo das perdas foi feito com a utilização do programa *Microtran*<sup>®</sup> [65], versão estudante. O programa *Microtran*<sup>®</sup> é uma implementação para computadores pessoais do programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos *EMTP* (*Electromagnetic Transients Program*), desenvolvido por H. W. Dommel. As equações diferenciais do sistema elétrico são resolvidas no domínio do tempo e o programa disponibiliza modelos para componentes básicos de circuitos (resistência, capacitância, indutância, cargas lineares e não-lineares, etc.) e também componentes mais complexos como parâmetros variáveis na frequência, por exemplo. Além do cálculo de transitórios, é possível fazer a análise de circuitos em regime permanente, a qual foi utilizada para o estudo das perdas da blindagem ativa.

O cálculo dos parâmetros das linhas foi feito com a subrotina *Mtline*<sup>™</sup> [66] do *EMTP*. Essa subrotina calcula os parâmetros de linhas de transmissão baseando-se nas características dos condutores e na configuração geométrica da torre. As impedâncias e admitâncias podem ser obtidas para análises em regimes permanente e transitório.

#### **4.4.1 – Modelagem do sistema**

Para determinação da fonte de tensão a ser inserida no sistema auxiliar da blindagem ativa, é necessária a modelagem do sistema.

Um sistema monofásico com a blindagem ativa pode ser representado pela figura 4.14.

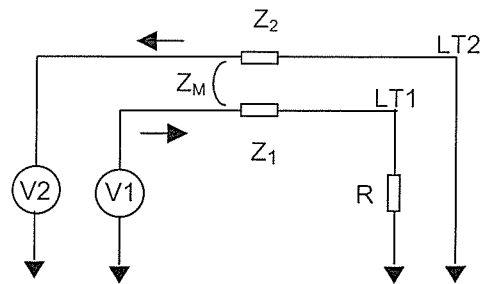


Figura 4.14 – circuito esquemático de uma linha de transmissão monofásica com blindagem ativa.

Na figura 4.14, os elementos mostrados representam:

$Z_1$  é a impedância série da linha 1 (fase);

$Z_2$  é a impedância série da linha 2 (blindagem ativa);

$Z_M$  é a indutância mútua entre os condutores das linhas 1 e 2;

$R$  é a carga da linha 1 (não necessariamente resistiva);

$V_1$  é o gerador da linha 1;

$V_2$  é a fonte de tensão da linha 2 (blindagem ativa).

A fonte de tensão  $V_2$ , ao ser inserida no circuito, fará circular uma corrente  $I_2$  no sistema auxiliar. Supondo que essa corrente obedeça à seguinte relação:

$$I_2 = -I_1. \quad (4.4)$$

As equações do circuito representado na figura 4.14 são:

$$V_1 = (Z_1 + R) \cdot I_1 - Z_M \cdot I_2, \quad (4.5)$$

$$V_2 = Z_2 \cdot I_2 - Z_M \cdot I_1. \quad (4.6)$$

Substituindo (4.4) em (4.6) e somando as equações (4.5) e (4.6) resulta em:

$$V_2 = R \cdot I_1 - V_1 \quad (4.7)$$

Ou, ainda, em função dos parâmetros da linha de transmissão e da tensão da fonte:

$$V_2 = ((Z_M - Z_2) / (Z_1 + R - Z_M)) * V_1 . \quad (4.8)$$

As equações (4.7) e (4.8) indicam qual será a fonte de tensão a ser inserida no circuito auxiliar da blindagem ativa.

No entanto, dependendo da corrente necessária para redução do campo, obtida a partir da solução do programa de otimização, a relação (4.4) será alterada e outras expressões para as fontes de tensão serão obtidas.

O valor obtido para a fonte de tensão será uma aproximação inicial para a tensão a ser inserida no circuito. Dependendo da resposta da corrente, um ajuste fino deverá ser feito.

O objetivo desta seção é calcular a potência adicional que deverá ser fornecida pelo sistema para que a blindagem ativa seja eficiente. Além disso, o impacto do sistema de blindagem no sistema original deverá ser avaliado, a partir da análise das alterações sofridas pelos parâmetros do sistema, tais como sua indutância. Dessa forma, os parâmetros do sistema de potência serão avaliados sem a presença do circuito auxiliar e, posteriormente, com a sua presença.

Inicialmente, foi analisado um caso monofásico e, posteriormente, uma linha de transmissão real da CEMIG.

#### 4.4.2 – LT monofásica

As características da linha de transmissão monofásica e da blindagem ativa são mostradas na figura 4.15.

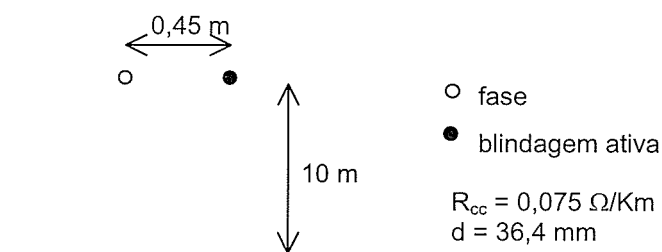


Figura 4.15 – Disposição dos condutores da linha monofásica hipotética:  $R_{cc}$  é a resistência série e  $d$  é o diâmetro dos condutores.

Os condutores do sistema original e do circuito de blindagem são considerados idênticos. O solo foi considerado ideal e as imagens dos condutores foram consideradas no cálculo dos parâmetros. A frequência de operação do sistema é 60 Hz e a análise foi feita em regime permanente.

#### a) variação dos parâmetros da linha

Utilizando a rotina *Mtline*<sup>™</sup> do *EMTP*, foram calculados os parâmetros da linha de transmissão nos dois casos analisados: o sistema com o condutor auxiliar e sem ele. Os resultados são apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Variação da indutância de uma linha monofásica:  $L_p$ ,  $L_m$ , – indutâncias própria e mútua;  $L_a$  – indutância aparente.

|             |             | <i>sem blindagem</i> | <i>com blindagem</i> |
|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| $L$ (mH/Km) | $L_p$       | 1,450                | 1,450                |
|             | $L_m$       | ---                  | 0,759                |
| $L_a$       | $L_p - L_m$ | 1,450                | 0,691                |

A indutância  $L_a$  mostrada na tabela 4.10 representa a indutância aparente da fase, ou seja, a indutância vista pelo sistema. Isso significa que, com a blindagem ativa, há uma redução da indutância do sistema. Como o sentido da corrente da blindagem é contrário à fase, a indutância mútua tem um efeito que reduz a indutância total. Há uma redução de 47,66% no valor da indutância, neste caso.

A redução da indutância aparente da linha tem um aspecto positivo relacionado a sua capacidade de transmissão. A potência máxima de transmissão de uma linha pode ser calculada por [67]:

$$P_{max} = \frac{V_1 * V_2}{X} * \text{sen}(\delta), \quad (4.9)$$

onde  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões nas barras 1 e 2 do sistema;  $X$  é a indutância da linha e  $\text{sen}(\delta)$  representa o ângulo de carga.

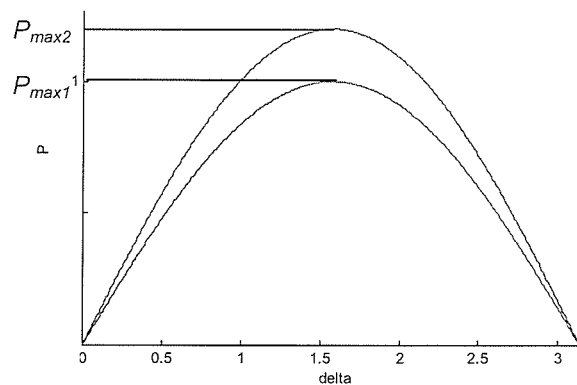


Figura 4.16 – Curva de carga:  $P_{max1}$  - sem a blindagem;  $P_{max2}$  - com a blindagem.

Como a potência máxima de uma linha é inversamente proporcional à indutância, um decréscimo da reatância resulta em um aumento da potência máxima transmitida. Do ponto de vista da estabilidade, esse resultado é muito positivo, pois haverá uma melhor característica da curva de carga, conforme indicado na figura 4.16. Qualitativamente, o sistema que operava com uma curva de carga com potência máxima  $P_{max1}$  passará a operar com uma potência  $P_{max2}$ , de maior valor.

Outro fator a ser avaliado é o carregamento da linha,  $SIL$ , que também será alterado, já que sua definição é dada pela expressão [67]:

$$SIL = \frac{|V_L|^2}{\sqrt{L/C}} \quad (4.10)$$

Como a indutância e a capacitância são modificadas com a inserção da blindagem, o valor do  $SIL$  também será alterado.

Os resultados dessa análise preliminar indicam que as mudanças dos parâmetros da linha com a blindagem ativa levam a um melhor aproveitamento da linha de transmissão. No entanto, deve-se ressaltar que as perdas também aumentam e que há um custo adicional para a instalação da blindagem. Todos esses aspectos deverão ser avaliados no estudo técnico e econômico da instalação da blindagem. Em seguida, será calculada a potência necessária a ser adicionada ao sistema para o funcionamento da blindagem.



## b) cálculo das perdas

Uma vez calculados os novos parâmetros da linha de transmissão com a blindagem, foram simulados alguns casos buscando avaliar as variações nas potências consumidas pela linha. O circuito utilizado para simulação é mostrado na figura 4.17.

Na figura 4.17, *LT1* representa a linha original, terminada com uma impedância  $Z_c$  e alimentada por uma fonte de tensão  $V_1$ ; *LT2* representa a blindagem ativa, em curto, alimentada por uma fonte de tensão  $V_2$ .

A linha monofásica simulada tem comprimento igual a 20 Km. *LT1* é casada na extremidade oposta à fonte e a *LT2* está em curto, a fim de que, com uma pequena tensão  $V_2$ , uma corrente significativa possa circular em *LT2*.

Para analisar o impacto da inserção da linha auxiliar (blindagem) no circuito original, foram calculadas as grandezas da linha original, *LT1*, antes e após a inserção da blindagem. As grandezas calculadas (corrente, tensão, potências) são apresentadas na tabela 4.11, todas referidas à *LT1*.

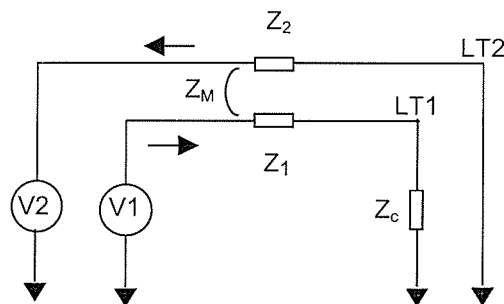


Figura 4.17 – Circuito equivalente da linha de transmissão monofásica com a blindagem ativa.

Tabela 4.11 – Alterações das grandezas da linha original, *LT1*, com a inserção da blindagem.

|            | <i>sem blindagem</i>       | <i>com blindagem</i>       |
|------------|----------------------------|----------------------------|
| $I$ (A)    | $321,7 \angle -91,3^\circ$ | $321,6 \angle -88,6^\circ$ |
| $P$ (MW)   | 44,38                      | 44,37                      |
| $Q$ (MVar) | 0,987                      | -1,061                     |
| $S$ (MVA)  | 44,39                      | 44,38                      |

Observa-se que a corrente, as potências ativa e aparente na *LT1* praticamente não se alteram com a inserção da blindagem ativa. Houve, no entanto, uma inversão no fluxo da potência reativa na *LT1*.

Outra característica interessante de ser analisada é o efeito da blindagem ativa na carga do sistema principal. Na medida do possível, a carga não deve sentir as alterações causadas pela inserção do sistema auxiliar. A tabela 4.12 mostra as grandezas observadas na carga antes e após a inserção da blindagem ativa no sistema.

As grandezas observadas na carga também sofrem pouca variação com a inserção da blindagem ativa. A potência reativa na carga é desprezível, já que a carga é resistiva, razão pela qual não é apresentada na tabela 4.12.

É interessante, ainda, comparar as grandezas observadas na fase e na blindagem ativa quando a mesma encontra-se em operação. Esses valores estão indicados na tabela 4.13.

Observa-se que as correntes na fase e na blindagem ativa são aproximadamente de mesmo módulo e defasadas de  $180^\circ$ . A fonte de tensão necessária para injeção de corrente na blindagem ativa foi calculada pela expressão

Tabela 4.12 – alterações das grandezas na carga com a inserção da blindagem.

|                | <i>sem blindagem</i> | <i>com blindagem</i> |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <i>V (KV)</i>  | 137,4 $\angle -92,2$ | 137,4 $\angle -90,7$ |
| <i>I (A)</i>   | 321,7 $\angle -92,2$ | 321,5 $\angle -90,7$ |
| <i>P (MW)</i>  | 44,22                | 44,16                |
| <i>S (MVA)</i> | 44,22                | 44,16                |

Tabela 4.13 – Grandezas calculadas na linha original (*LT1*) e na blindagem (*BA*).

|                            | <i>LT1 (original)</i>  | <i>BA (blindagem)</i>      |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| <i>V (KV)</i>              | 138 $\angle -90^\circ$ | 1,683 $\angle 127,5^\circ$ |
| <i>I (A)</i>               | 321,61 $\angle -88,63$ | 318,89 $\angle 96,43$      |
| <i>P (MW)</i>              | 44,37                  | 0,106                      |
| <i>Q (MVA<sub>r</sub>)</i> | -1,06                  | 0,53                       |
| <i>S (MVA)</i>             | 44,38                  | 0,54                       |

(4.8) e representa apenas 1,2% da tensão do sistema original. Isso significa um custo reduzido para a fonte de tensão.

A potência ativa consumida pela blindagem ativa é muito pequena quando comparada com a potência do sistema principal. Analisando as potências calculadas, observa-se que a diferença na potência aparente do sistema com a blindagem ativa é cerca de 1,2% da potência do sistema sem a blindagem ativa. O sistema deverá suprir essa potência para que a blindagem ativa funcione.

A blindagem ativa representa perdas para o sistema original. No entanto, ela pode trazer vantagens como a redução de campo magnético e o aumento da capacidade de transmissão da linha. A blindagem ativa pode, então, ser uma boa opção para, além de reduzir os níveis de campo magnético nas proximidades da linha, aumentar sua capacidade de transmissão. Vale ressaltar, no entanto, que todos esses pontos devem ser discutidos com maior profundidade em trabalhos futuros.

O mesmo estudo aqui apresentado para a linha de transmissão casada foi feito para diferentes cargas, variando-se o fator de potência. Os resultados são bastante semelhantes.

#### **4.4.3 - LT trifásica**

O sistema trifásico analisado é a linha de transmissão Itaúna – Pará de Minas 2 da CEMIG com tensão nominal de 138 kV. A estrutura típica dessa linha é a HSR9 e suas características são resumidas na figura 4.18. A localização dos condutores da blindagem ativa é também apresentada. A corrente nominal dessa linha de transmissão é 300 A.

---

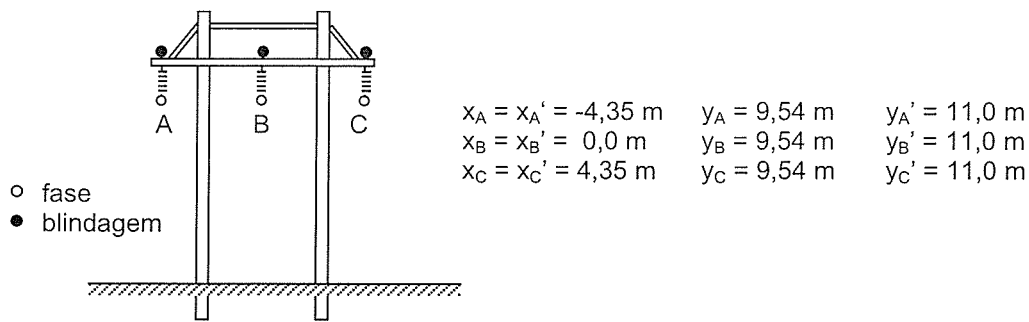


Figura 4.18 – Características da LT trifásica, onde  $R_{cc} = 0,2988 \Omega/\text{km}$ ;  $\rho_{\text{solo}} = 500\Omega\cdot\text{m}$ ;  $\text{RMG} = 2,48 \text{ mm}$ .

Em seguida, são apresentados os estudos relativos à variação dos parâmetros da linha original com a inserção da Blindagem Ativa e as perdas inseridas no sistema original.

#### a) variação dos parâmetros da linha

No caso trifásico, será instalado um cabo da blindagem ativa por fase. O sistema original, que era de três condutores, passará a operar com seis, conforme indica a figura 4.19.

Dessa forma, a matriz de indutância da linha de transmissão, que anteriormente era de dimensão três, terá, com a blindagem ativa, dimensão seis. A matriz de indutância do novo sistema pode ser observada na tabela 4.14.



Figura 4.19 – Condutores da LT trifásica e da blindagem ativa.

Tabela 4.14 – Matriz de indutância do sistema com blindagem ativa – L, em mH/km.

| Condutor | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1        | 2,712 | 1,218 | 1,079 | 1,436 | 1,207 | 1,077 |
| 2        | 1,218 | 2,712 | 1,218 | 1,207 | 1,436 | 1,207 |
| 3        | 1,079 | 1,218 | 2,712 | 1,077 | 1,207 | 1,436 |
| 4        | 1,436 | 1,207 | 1,077 | 2,712 | 1,218 | 1,079 |
| 5        | 1,207 | 1,436 | 1,207 | 1,218 | 2,712 | 1,218 |
| 6        | 1,077 | 1,207 | 1,436 | 1,079 | 1,218 | 2,712 |

Com a inserção da blindagem ativa, haverá, assim, alterações nos parâmetros da linha de transmissão, principalmente nos valores de indutância. Para se ter uma sensibilidade da alteração da indutância da linha, pode-se estimar a nova indutância aparente do sistema, considerando apenas o condutor da blindagem ativa referente à fase, ou seja, considerando, por exemplo, a indutância mútua do condutor da fase “A” com a blindagem da fase “A” (condutores 1 e 4 da tabela 4.14). A indutância aparente do sistema seria, neste caso, reduzida de 2,712 mH/km para 1,300 mH/km.

Como no caso monofásico, no caso trifásico também há uma redução da indutância do sistema, o que contribui para o melhor desempenho da linha.

#### b) cálculo das perdas

Para a linha trifásica, são apresentados os resultados obtidos para duas diferentes condições de carga: carga resistiva e carga indutiva.

- *Carga resistiva*

No primeiro caso, uma impedância de 475  $\Omega$  foi ligada a cada fase da linha de transmissão. As tabelas seguintes apresentam os resultados.

Na tabela 4.15, são mostrados os valores das grandezas calculadas na linha de transmissão com e sem a blindagem. Assim, é analisada a influência da blindagem ativa na linha original para cada fase.

Tabela 4.15 – Alterações das grandezas da linha de transmissão com a inserção da blindagem ativa (BA).

|            | Fase a     |            | Fase b       |              | Fase c        |               |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|            | sem BA     | com BA     | sem BA       | com BA       | sem BA        | com BA        |
| $I (A)$    | 224,5∠1,1° | 225,9∠1,7° | 223,4∠121,3° | 222,9∠120,9° | 222,5∠-118,9° | 221,4∠-118,3° |
| $P (MW)$   | 31,0       | 31,2       | 30,8         | 30,8         | 30,7          | 30,6          |
| $Q (MVar)$ | -0,58      | -0,83      | -0,70        | -0,47        | -0,60         | -0,93         |
| $S (MVA)$  | 31,0       | 31,2       | 30,8         | 30,8         | 30,7          | 30,5          |

Devido à simetria do sistema, as grandezas referentes às fases “a” e “c” deveriam ser iguais. No entanto, observa-se uma pequena variação entre elas. Esse fato ocorre, possivelmente, porque, na entrada dos dados para fazer as simulações no *MicroTran*<sup>®</sup>, foi utilizada somente a parte real da matriz de transformação modal, desprezando-se a parte imaginária. Essa é uma boa aproximação, mas desvios podem ocorrer. Buscando contornar essa situação, os resultados para os demais casos simulados neste trabalho são apresentados como os valores médios obtidos entre as fases “a” e “c”.

A tabela 4.16 mostra os valores já alterados para os valores médios das grandezas das fases “a” e “c”. Observando os resultados, verifica-se que os parâmetros sofrem pequena influência com a inserção da blindagem. A grandeza que sofre maior influência é a potência reativa que tem seu fluxo alterado com a inserção da blindagem.

Tabela 4.16 – Alterações das grandezas da linha de transmissão com a inserção da blindagem ativa (BA).

|            | Fase a     |            | Fase b       |              | Fase c        |               |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|            | sem BA     | com BA     | sem BA       | com BA       | sem BA        | com BA        |
| $I (A)$    | 223,5∠1,1° | 223,7∠1,7° | 223,4∠121,3° | 222,9∠120,9° | 223,5∠-118,9° | 223,7∠-118,3° |
| $P (MW)$   | 30,9       | 30,9       | 30,8         | 30,8         | 30,9          | 30,9          |
| $Q (MVar)$ | -0,59      | -0,88      | -0,70        | -0,47        | -0,59         | -0,88         |
| $S (MVA)$  | 30,9       | 30,9       | 30,8         | 30,8         | 30,9          | 30,9          |

A tabela 4.17 mostra a variação das grandezas calculadas na carga com e sem a blindagem. Na medida do possível, a carga não deverá sentir as alterações causadas pela blindagem.

Observa-se, novamente, pequena variação nas grandezas da carga ligada à linha de transmissão original, quando a blindagem ativa é inserida no sistema. A potência reativa é praticamente desprezível, razão pela qual não é mostrada na tabela.

Finalmente, são comparadas as grandezas da linha principal e da linha auxiliar (blindagem) quando a blindagem está em operação. A tabela 4.18 mostra os valores calculados para as duas linhas.

A tensão inserida para alimentar a blindagem ativa,  $V_2$ , representa cerca de apenas 2% da tensão nominal da linha. As correntes nas duas linhas possuem praticamente o mesmo módulo e sentidos contrários.

Analisando as potências calculadas, observa-se que as potências ativa e aparente necessárias para o funcionamento da blindagem ativa são muito pequenas comparadas com a potência nominal do sistema original. A potência aparente adicional para a blindagem ativa representa cerca de 2% da potência do sistema.

Tabela 4.17 – Alterações na carga com a inserção da blindagem ativa (BA).

|         | Fase a      |             | Fase b       |              | Fase c        |               |
|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|         | sem BA      | com BA      | sem BA       | com BA       | sem BA        | com BA        |
| V (KV)  | 136,8∠-1,1° | 136,8∠-0,6° | 136,6∠118,9° | 136,4∠118,5° | 136,8∠-121,1° | 136,8∠-120,6° |
| I (A)   | 223,4∠-1,1° | 223,5∠-0,8° | 223,3∠118,9° | 222,9∠118,5° | 223,4∠-121,1° | 223,5∠-120,6° |
| P (MW)  | 30,6        | 30,6        | 30,5         | 30,4         | 30,6          | 30,6          |
| S (MVA) | 30,6        | 30,6        | 30,5         | 30,4         | 30,6          | 30,6          |

Tabela 4.18 – Grandezas calculadas na linha original (LT) e na blindagem (BA).

|          | Fase a     |              | Fase b       |              | Fase c        |             |
|----------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
|          | LT         | BA           | LT           | BA           | LT            | BA          |
| V (KV)   | 138,0∠0°   | 2,4∠-120°    | 138,0∠120°   | 3,1∠0°       | 138,0∠-120°   | 2,4∠120°    |
| I (A)    | 223,7∠1,5° | 228,9∠174,8° | 222,9∠120,9° | 219,1∠-59,8° | 223,7∠-118,5° | 228,9∠69,1° |
| P (MW)   | 30,9       | 0,29         | 30,8         | 0,34         | 30,9          | 0,29        |
| Q (MVar) | -0,88      | 0,46         | -0,47        | 0,59         | -0,88         | 0,46        |
| S (MVA)  | 30,9       | 0,55         | 30,8         | 0,68         | 30,9          | 0,55        |

- *Carga mista*

De forma semelhante ao realizado para a linha trifásica com carga resistiva, os cálculos foram repetidos para uma outra carga:  $380,9\angle 36,9^\circ$ , representando um fator de potência de aproximadamente 0,8, característico da operação de linhas de transmissão na tensão considerada.

As tabelas 4.19, 4.20 e 4.21 indicam os resultados obtidos para todas as situações analisadas.

Tabela 4.19 – Alterações das grandezas da linha de transmissão com a inserção da blindagem ativa (BA)

|                 | Fase a                |                       | Fase b               |                      | Fase c                 |                        |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
|                 | sem BA                | com BA                | sem BA               | com BA               | sem BA                 | com BA                 |
| <i>I</i> (A)    | 346,4 $\angle$ -36,7° | 348,7 $\angle$ -36,5° | 346,2 $\angle$ 83,5° | 343,2 $\angle$ 83,1° | 346,4 $\angle$ -156,6° | 348,7 $\angle$ -155,6° |
| <i>P</i> (MW)   | 38,4                  | 38,9                  | 38,4                 | 37,9                 | 38,4                   | 38,9                   |
| <i>Q</i> (MVar) | 28,5                  | 28,4                  | 28,4                 | 28,4                 | 28,5                   | 28,4                   |
| <i>S</i> (MVA)  | 47,8                  | 48,1                  | 47,8                 | 47,3                 | 47,8                   | 48,1                   |

Tabela 4.20 – Alterações na carga com a inserção da blindagem ativa (BA)

|                 | Fase a                |                       | Fase b                |                       | Fase c                 |                        |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|                 | sem BA                | com BA                | sem BA                | com BA                | sem BA                 | com BA                 |
| <i>V</i> (KV)   | 133,9 $\angle$ -1,0°  | 134,8 $\angle$ -0,8°  | 133,9 $\angle$ 119,2° | 132,8 $\angle$ 118,8° | 133,9 $\angle$ -120,8° | 134,8 $\angle$ -119,9° |
| <i>I</i> (A)    | 351,5 $\angle$ -37,9° | 353,9 $\angle$ -37,7° | 351,6 $\angle$ 82,3°  | 348,6 $\angle$ 81,9°  | 351,5 $\angle$ -157,7° | 353,9 $\angle$ -156,8° |
| <i>P</i> (MW)   | 37,7                  | 38,2                  | 37,7                  | 37,0                  | 37,7                   | 38,2                   |
| <i>Q</i> (MVar) | 28,3                  | 28,7                  | 28,3                  | 27,8                  | 28,3                   | 28,7                   |
| <i>S</i> (MVA)  | 47,1                  | 47,8                  | 47,1                  | 46,3                  | 47,1                   | 47,8                   |

Tabela 4.21 – Grandezas calculadas na linha original (LT) e na blindagem (BA).

|                 | Fase a                |                       | Fase b               |                       | Fase c                 |                      |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
|                 | LT                    | BA                    | LT                   | BA                    | LT                     | BA                   |
| <i>V</i> (KV)   | 138 $\angle$ 0°       | 3,8 $\angle$ -150°    | 138 $\angle$ 120°    | 4,5 $\angle$ -30°     | 138 $\angle$ -120°     | 3,8 $\angle$ 90°     |
| <i>I</i> (A)    | 348,7 $\angle$ -36,5° | 360,3 $\angle$ 144,8° | 343,0 $\angle$ 83,1° | 329,9 $\angle$ -89,8° | 348,7 $\angle$ -155,6° | 360,3 $\angle$ 36,4° |
| <i>P</i> (MW)   | 38,9                  | 0,70                  | 37,9                 | 0,75                  | 38,9                   | 0,70                 |
| <i>Q</i> (MVar) | 28,4                  | 1,18                  | 28,4                 | 1,29                  | 28,4                   | 1,18                 |
| <i>S</i> (MVA)  | 48,1                  | 1,37                  | 47,3                 | 1,49                  | 48,1                   | 1,37                 |



Os resultados novamente indicam que a inserção da blindagem ativa gera poucas alterações nas grandezas da linha original.

As correntes do sistema principal e da blindagem são praticamente de mesmo módulo e sentidos contrários, indicando que boa compensação pode ser atingida. A tensão da blindagem ativa representa cerca de 3% da tensão nominal e a potência aparente também cerca de 3%. Com a inserção da blindagem, há alteração no fluxo de potência da linha, o que deve ser avaliado.

#### **4.5 – Considerações Finais**

As reduções de campo magnético atingidas com a blindagem ativa em linhas de transmissão são significativamente maiores quando comparadas com outros métodos existentes, conforme mostrado pelos resultados das simulações.

A escolha dos parâmetros da blindagem ativa é fundamental para sua eficiência na redução dos campos magnéticos. Nesse sentido, a otimização pode ser utilizada como ferramenta na escolha desses parâmetros. Algumas soluções com boa eficiência para a redução de campo podem ser obtidas com a circulação de correntes assimétricas no sistema de blindagem. A geração dessas correntes pode ser feita com a utilização de inversores alimentando cargas adequadamente escolhidas. No entanto, o custo de tais projetos deve ser avaliado.

No problema específico da blindagem ativa, o conjunto de soluções resultante da otimização não apresenta muitas possibilidades, uma vez que são muitas as restrições físicas do problema. No entanto, ela pode auxiliar na escolha dos parâmetros da blindagem.

O estudo preliminar dos efeitos da blindagem ativa no sistema principal aponta alguns fatores que deverão ser analisados mais detalhadamente no futuro, os quais são descritos a seguir.

A blindagem ativa acarreta a redução da indutância série da linha de transmissão, conforme foi discutido neste capítulo. A redução na impedância da linha resulta, por sua vez, em um aumento da capacidade de transmissão e, conseqüentemente, uma elevação das correntes que circulam nos cabos. Deve-se

---

avaliar, assim, se os cabos originais serão capazes de suportar esse aumento de corrente.

Por outro lado, com a diminuição da indutância, a potência máxima a ser transmitida também aumenta, o que representa um aumento do limite de estabilidade da linha. Esse fator contribui para o melhor desempenho do sistema elétrico de potência.

A blindagem ativa levará a perdas extras para o sistema que, a princípio, são pequenas comparadas à potência nominal da linha. No entanto, elas devem ser levadas em consideração para o cálculo do preço do KW instalado, bem como os custos extras de instalação da blindagem (cabos da blindagem, estruturas de sustentação, fontes de tensão, etc.).

Alguns outros fatores não abordados neste trabalho deverão ser observados quando a blindagem ativa for inserida no sistema:

- coordenação de isolamento;
- localização dos cabos pára-raios;
- alterações no sistema de proteção (a proteção contra curto-circuito deve perceber o que acontece no sistema auxiliar de blindagem);
- “backflashover” na blindagem ativa.

Este capítulo teve por objetivo apresentar e discutir alguns dos fatores pertinentes à instalação da blindagem ativa em linhas de transmissão. Várias questões ainda permanecem e um estudo amplo e detalhado da viabilidade de instalação da blindagem ativa deve ainda ser concluído.

No capítulo seguinte, a aplicação da blindagem ativa em linhas de transmissão subterrâneas será discutida.

---

## **5 – Linhas de Transmissão Subterrâneas**

### **5.1 – Introdução**

As linhas de transmissão subterrâneas (LTS) constituem importantes fontes de campo magnético. Muitas vezes, os níveis de campo magnético gerados por uma LTS ultrapassam os valores de uma linha aérea de mesma tensão.

Neste capítulo, é feita uma breve apresentação das linhas de transmissão subterrâneas. Alguns de seus aspectos característicos, tais como métodos de instalação e técnicas de aumento da capacidade de transmissão são discutidos. Alguns desses aspectos podem influenciar significativamente a intensidade de campo magnético gerado pelas LTS.

Em seguida, são apresentadas medições dos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão subterrâneas de 138 kV, instaladas em Belo Horizonte.

A avaliação dos campos magnéticos gerados por diversas configurações de LTS de diferentes tensões é feita por meio de simulações.

Finalmente, é apresentada a discussão sobre a possível aplicação da blindagem ativa em LTS com o objetivo de reduzir os campos magnéticos em suas proximidades.

### **5.2 – As Linhas de Transmissão Subterrâneas como Fontes de Campo Eletromagnético**

A utilização de cabos isolados na transmissão subterrânea permite que a distância entre os condutores seja bem menor que as existentes em linhas aéreas, o que, a princípio, levaria à geração de campos magnéticos de menor intensidade. No entanto, a instalação dos cabos é feita a poucos metros de profundidade, tipicamente de 1,5 a 2 m. Assim, no centro da linha subterrânea, na superfície do solo, os campos podem se tornar significativamente maiores, se comparados aos gerados por uma linha aérea de potência equivalente.

A diferença entre os níveis de campo magnético gerados por duas linhas de transmissão de 400 kV, uma aérea (LTA) e outra subterrânea (LTS), nas mesmas condições de operação, pode ser observada na figura 5.1 [12]. Observa-se que, no centro da linha, o campo magnético gerado pela linha subterrânea ultrapassa 100  $\mu\text{T}$ , enquanto que para a linha aérea esse valor é aproximadamente 25  $\mu\text{T}$ . Já a 20 m do centro da linha, o campo para a linha aérea é 10  $\mu\text{T}$ , enquanto para a linha subterrânea é aproximadamente 1  $\mu\text{T}$ . Vale ressaltar que, dependendo da configuração dos cabos subterrâneos, os perfis de campo serão modificados.

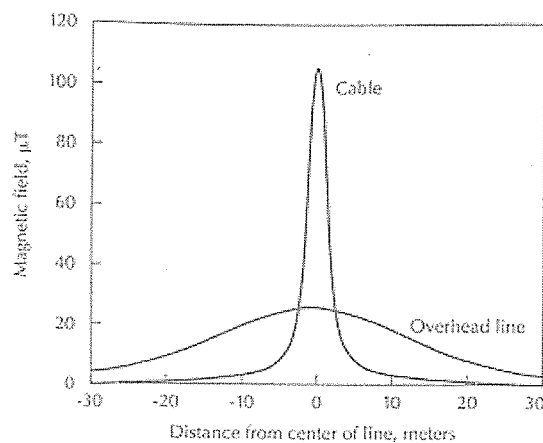


Figura 5.1 – Comparação do campo magnético gerado por uma LTA de 400 kV e uma LTS nas mesmas condições de carga (medição a 1 m de altura com corrente de carga igual a 2000 A). [12]

Com relação à geração de campo elétrico, deve-se lembrar que os cabos subterrâneos são constituídos de uma capa metálica externa que garante uma blindagem muito eficaz para os campos elétricos. A capa metálica possui pequena espessura, da ordem de décimos de milímetros a poucos milímetros, que, apesar de confinar todo o campo elétrico, produz um efeito desprezível na blindagem do campo magnético em 60 Hz [68].

### 5.3 – Linha de Transmissão Aérea ou Subterrânea?

A instalação de Linhas de Transmissão Subterrâneas (LTS) decorre das dificuldades encontradas para a construção de Linhas de Transmissão Aéreas

(LTA), principalmente quando surge a necessidade de transmitir energia elétrica para áreas densamente construídas de grandes centros urbanos. Duas são as principais dificuldades na construção de LTA nesses casos: a dificuldade de obtenção de faixas de passagem e o aspecto de agressão ao meio ambiente.

As dificuldades relativas à obtenção de áreas para faixas de passagem residem na escassez de áreas disponíveis e no alto custo de desapropriações, o que torna o projeto bastante oneroso, muitas vezes inviabilizando-o [69].

O outro aspecto diz respeito à característica estética das LTA. A poluição visual decorrente das torres de sustentação, condutores e outros equipamentos inerentes à LTA tem levado a população a interferir na liberação de obras, muitas vezes resultando na proibição de construção de trechos aéreos [70].

Uma alternativa para contornar problemas estéticos é a construção de linhas compactas, implantando-as em canteiros centrais de avenidas ou mesmo em calçadas, buscando causar o menor impacto visual possível [71]. Nesses casos, são feitos estudos de viabilidade da instalação de linha aérea e a comparação econômica com linhas subterrâneas. No entanto, nem sempre a solução de linhas compactas é aceita pela população ou órgãos públicos.

Nesse contexto, a construção de uma LTS é definida quando existe inviabilidade técnica e/ou ambiental para construir a LTA [72] ou, ainda, fatores econômicos, como a necessidade de adquirir faixa exclusiva, com valor do terreno elevado [73]. Na maioria dos casos, a LTS apresenta-se como única alternativa viável. Outras aplicações de redes subterrâneas encontram-se na entrada e saída de subestações em indústrias e regiões de alta concentração populacional onde há ameaças de ocupação, vandalismo e alta possibilidade de acidentes com terceiros.

A relação de custo entre uma LTS e LTA varia no mundo dentro de uma faixa bastante ampla, dependendo das exigências locais de construção e das dificuldades a serem superadas. No entanto, devido à tendência mundial da utilização das LTS, houve um grande esforço no desenvolvimento de novas tecnologias, o que tem levado a uma redução de seu custo mais elevado [71]. Além disso, com a expansão das redes subterrâneas, há uma tendência de redução de custos devido ao crescimento da venda dos materiais e equipamentos utilizados. Análises econômicas realizadas indicam que, na maioria dos casos, o custo de uma LTS é 4 a 5 vezes maior que a LTA [71].

---

Dentre as vantagens da LTS, pode-se destacar a não agressão ao meio ambiente do ponto de vista visual, vida útil mais longa (de 2 a 5 vezes maior que a LTA) [74] e a alta confiabilidade, tornando mais rara a ocorrência de defeitos.

Por outro lado, quando da existência de contingências, o tempo de reparo é bem superior ao de uma LTA, o que agrega um alto custo à manutenção [74]. Além disso, a interferência na vida cotidiana da população, por ocasião da instalação e de manutenções, é outra desvantagem.

Mesmo com os problemas e dificuldades apontadas, a tendência mundial é a instalação de novas LTS principalmente em áreas urbanas. O desenvolvimento de novas tecnologias de instalação e manutenção, reduzindo o custo final, indica um cenário promissor para a transmissão subterrânea.

## **5.4 – Principais Características das LTS**

Nesta seção, são apresentadas as principais características das LTS, objetivando uma visão geral dos elementos que compõem o sistema e quais os principais fatores que afetam os campos magnéticos gerados por elas, objeto de estudo deste trabalho. O objetivo não é o aprofundamento desse assunto, mas apenas ressaltar pontos que contribuam para o melhor entendimento das LTS estudadas.

Nesse sentido, será feita uma descrição sucinta dos tipos de cabos empregados, tipos e métodos de instalação existentes, além de artifícios utilizados para aumentar a capacidade de transmissão da linha.

### **5.4.1 – Tipos de cabos**

Os tipos de cabos mais utilizados na transmissão subterrânea são: oleostáticos, cabos a óleo fluido e extrudados [73,75,76]. A figura 5.2 ilustra alguns deles, com a indicação de seus principais componentes.

---

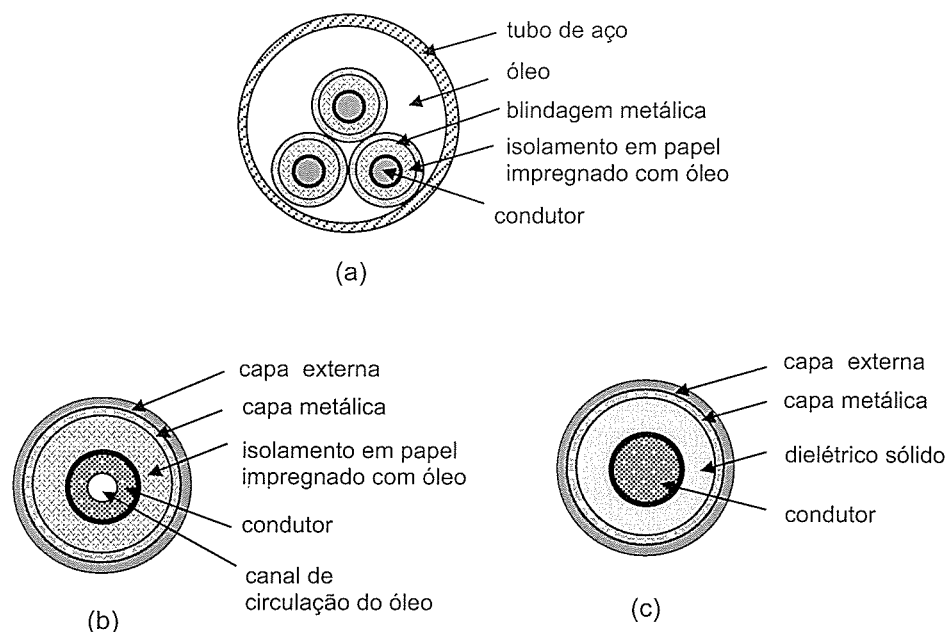


Figura 5.2 – Tipos de cabos utilizados na transmissão subterrânea: (a) oleostático (PIPE); (b) cabo OF; (c) extrudado (com dielétrico sólido).

#### a) cabo oleostático (PIPE)

O cabo oleostático é caracterizado por uma construção robusta e é constituído por três condutores de cobre, isolados individualmente com papel e instalados no interior de um tubo de aço galvanizado. O tubo é preenchido com óleo isolante, mantido sob alta pressão. São muito utilizados nos Estados Unidos, sendo chamados de “PIPE” pelos americanos.

#### b) cabo a óleo fluido (OF)

O cabo a óleo fluido é constituído por um canal central preenchido com óleo, um condutor de cobre ou alumínio, isolado com papel, e uma capa metálica de chumbo ou alumínio que confina o conjunto. Todo o conjunto é preenchido com óleo mineral isolante, mantido sob baixa pressão. As proteções externas são colocadas sobre a capa metálica e são constituídas de material isolante (polietileno ou PVC) para proteção mecânica e anticorrosiva. O cabo OF é caracterizado pela facilidade de instalação e alta confiabilidade. Sua utilização é cerca de 10 a 20% mais econômica

que o cabo oleostático (PIPE). Os cabos OF são amplamente utilizados na Europa e Japão. No Brasil, a maioria das linhas também utiliza este tipo de cabo.

#### **c) cabo isolado com dielétrico sólido (extrudado)**

Os cabos extrudados utilizam condutor de cobre ou alumínio revestidos por uma camada de material isolante. Vários materiais podem ser usados para a isolação, tais como polietileno reticulado (XLPE), polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE) e borracha à base de etileno propileno (EPR) [73]. Os cabos extrudados são cada vez mais utilizados devido à facilidade de montagem de seus acessórios e à simplicidade de sua instalação. No entanto, ainda não têm o mesmo nível de confiabilidade dos cabos OF [73].

Vale citar, ainda, os cabos isolados com SF<sub>6</sub>, que têm sua aplicação restrita aos troncos de circuito que devem transportar elevadas correntes, geralmente prolongamentos naturais de barramentos blindados com SF<sub>6</sub> [72].

### **5.4.2 – Métodos de instalação**

O método de instalação depende primordialmente do local onde a obra será executada. Os principais métodos podem ser agrupados em dois grupos: convencionais e não destrutivos [73].

#### **a) métodos convencionais:**

- *diretamente enterrado em valas*: os cabos são lançados diretamente em valas cavadas a poucos metros de profundidade do solo. São instalados em regiões de menor trânsito e são os mais utilizados no Brasil;
- *instalações em dutos*: permite a existência de espaços para instalações futuras e são utilizados em regiões de maior congestionamento e tráfego intenso.



**b) métodos não destrutivos:**

- *túneis e galerias*: são utilizados em regiões que possuem subsolo congestionado, permitindo a utilização conjunta de outras instalações (telefonia, comunicação, etc.). Apresenta alto custo de instalação, mas o custo da manutenção é mais baixo, além de não causar transtorno na superfície do solo;
- “*Flowmole/Navigator*”: utiliza sondas que fazem perfuração longitudinalmente, direcionadas por um controlador na superfície do solo. Um cabo guia é lançado para fazer o puxamento de dutos em polietileno, dentro dos quais serão instalados os cabos de transmissão. Embora possivelmente mais barato que as valas e de menor transtorno para a população nas vias públicas, esse método ainda necessita de maior experiência de execução.

As novas técnicas de instalação, como os métodos não destrutivos, têm como principais objetivos minimizar os custos da obra civil e causar pouca interferência na superfície do solo.

**5.4.3 – Configuração dos cabos**

A configuração dos condutores das LTS pode ser, basicamente, em trifólio, horizontal ou vertical.

A configuração em trifólio pode ser utilizada com cabos OF ou extrudados, mas é característica dos cabos oleostáticos (PIPE) que, por construção, sempre se encontram nessa formação em instalações de tensão trifásica. O comportamento térmico não é favorável ao bom desempenho do sistema, já que a dissipação de calor não é eficiente.

Nas configurações horizontal ou vertical, a dissipação de calor é favorecida, devido à maior distância entre os condutores. No entanto, não há simetria no sistema, o que leva à diferença nos parâmetros elétricos, o que pode ser resolvido com a transposição das fases. A configuração vertical é utilizada em instalações em dutos. Já a configuração horizontal dos cabos instalados diretamente em valas é a mais utilizada mundialmente, inclusive no Brasil.

---

#### **5.4.4 – Sistema de aterramento**

Na configuração horizontal (ou vertical), são induzidas tensões nas capas metálicas dos cabos, resultando na circulação de corrente e gerando elevadas perdas para o sistema. No caso particular das capas de alumínio, por exemplo, as perdas podem ser superiores às do condutor [77]. Essas perdas constituem um fator que limita a transmissão da máxima potência possível e devem ser minimizadas.

Para eliminar a corrente que circula nas capas metálicas e, conseqüentemente, reduzir as perdas, utiliza-se um método de conexão especial denominado “*crossbonding*” [76].

Pelo sistema “*crossbonding*”, nos pontos de transposição do cabo, efetua-se a destransposição das capas. As capas metálicas são interconectadas entre si e conectadas à terra. Se os trechos têm mesmo comprimento, mesma distância entre fases e as correntes são equilibradas, a tensão induzida nas capas após uma transposição completa será nula. Dessa forma, não circula corrente na capa metálica e as perdas são minimizadas.

Em projetos reais, sempre existirá uma diferença de comprimentos, por menor que seja. Isso resultará em uma tensão residual nas capas metálicas, levando à circulação de corrente na mesma. Dessa forma, no estágio de projeto, deve-se procurar obter seções geometricamente balanceadas, para minimizar as perdas. A IEC (“*International Electrotechnical Commission*”), em seu documento nº 287, recomenda que as perdas residuais nas capas devem ser de no máximo 3% das perdas no condutor para cabos diretamente enterrados e 5% das perdas no condutor para cabos instalados em dutos [77].

No Brasil, existem várias linhas de transmissão subterrânea com cabos OF nas tensões de 138, 230 e 345 kV, que utilizam o sistema *crossbonding* para aterramento das capas metálicas.

#### **5.4.5 – Melhorias na dissipação térmica**

Nas LTS, o fator limitante para a transmissão de energia é a temperatura do condutor [78]. Além de limitar a capacidade de transmissão de corrente, a operação a temperaturas muito elevadas reduz a vida útil do condutor.

---

Nesse sentido, duas ações podem ser apontadas visando melhorar as condições térmicas do sistema: utilizar um material dielétrico capaz de operar em temperaturas mais elevadas e reduzir a temperatura de operação.

No primeiro caso, o desenvolvimento de novos materiais com menores perdas dielétricas vem garantindo a operação de sistemas a correntes e temperaturas cada vez mais elevadas.

No segundo caso, busca-se aumentar a dissipação do calor gerado pelo sistema ou permitir que o cabo trabalhe a temperaturas mais elevadas. Nesse sentido, alguns aspectos podem ser analisados, tais como a mudança da resistividade térmica do meio e artifícios para resfriamento do cabo.

#### **a) alteração da resistência térmica do terreno**

As fontes de calor de um sistema de transmissão subterrânea localizam-se nos condutores e são originadas na quase totalidade por perdas por efeito Joule e correntes de Foucault.

A variável de maior influência na ampacidade do sistema é a resistência térmica do terreno [79]. Assim, alterando-se esse parâmetro, pode-se melhorar a dissipação de calor e, conseqüentemente, a condução de corrente. Outros parâmetros, tais como a resistência térmica do isolante e da capa de proteção externa, também poderiam ser alterados. No entanto, a resistência térmica do terreno é um parâmetro externo ao cabo o que facilita as alterações a serem introduzidas no projeto da LTS. Além disso, os outros parâmetros possuem funções mais importantes que a de simples trocadores de calor, tais como proporcionar nível de isolação adequada e proteger contra corrosão.

Basicamente, as duas grandezas mais significativas que determinam a resistência térmica do terreno são a resistividade térmica do material circunvizinho aos cabos e a profundidade da instalação.

A resistividade térmica do terreno pode ser melhorada com o emprego de areias selecionadas de baixa resistividade térmica como material de recobrimento dos cabos, conhecido como "*backfill*". Essa iniciativa garante um baixo valor de resistividade térmica, além de uma importante função mecânica: impedir o

deslocamento dos cabos. Uma variação de 100% na resistividade pode ocasionar alteração em média de 40% na ampacidade [79].

O aumento da ampacidade provocado pelo decréscimo na profundidade é menos significativo, embora de grande importância. Assim, quanto menor a profundidade de instalação dos cabos, melhor a dissipação de calor e maior a ampacidade. Além disso, profundidades menores resultam em custo reduzido, devido à redução da obra civil.

Profundidades variando entre 1,5 e 3 m são muito comuns nas linhas existentes. Esta variação produz na ampacidade oscilação de 13% em média [79]. A busca da menor profundidade é imprescindível, embora a interferência com instalações existentes e a segurança da linha não permitam que se exceda determinados limites. Geralmente, as instalações no Brasil têm profundidade mínima da ordem de 1,5 m. No entanto, existem alguns trechos que chegam a profundidades de até 0,5 m [74].

#### **b) resfriamento forçado**

A utilização de artifícios para resfriar os cabos, permitindo que operem em temperaturas mais elevadas, também é uma alternativa para elevar a capacidade de transmissão da linha. Basicamente três tipos de resfriamento forçado podem ser apontados [80]:

- *interno*: o óleo de impregnação dos cabos é forçado a circular pelo canal central dos mesmos. Após passar por uma estação de resfriamento, o óleo retorna aos cabos a uma temperatura pré-fixada. O calor é retirado diretamente do condutor. Os cabos OF apresentam esse tipo de resfriamento.
- *direto*: o meio refrigerante circula dentro de dutos, onde os cabos são instalados, retirando calor diretamente da capa externa dos cabos. Os meios refrigerantes mais utilizados são a água ou o óleo para os cabos OF e o óleo para os cabos oleostáticos (PIPE).
- *indireto*: também chamado de resfriamento lateral, consiste na instalação de tubos diretamente enterrados próximos e em paralelo aos cabos. A circulação de água nos tubos retira calor do solo para dissipá-lo em trocadores de calor

convenientemente instalados. Nos casos de cabos OF, os tubos são de polietileno.

Dependendo das extensões dos trechos de resfriamento, pode-se conseguir um aumento de 30 a 50% na potência de transmissão [80].

### **c) monitoramento da temperatura do cabo**

O conhecimento do carregamento instantâneo da linha e das condições térmicas associadas pode permitir uma operação que extraia o máximo da capacidade de transmissão com segurança. Isso somente é possível a partir de um sistema de monitoramento em tempo real que forneça todas as informações necessárias para o melhor aproveitamento da linha.

Nesse sentido, foi desenvolvido um sistema de monitoramento de cabos em uma linha de 345 KV em São Paulo, com o objetivo de monitorar a corrente no condutor e a temperatura da cobertura do cabo [78,81]. Com essas informações, o sistema calcula a temperatura do condutor, fornecendo as sobrecargas admissíveis para várias condições de emergências e permitindo a maior extração de potência possível. Com o sistema de monitoramento, a identificação de falhas é mais rápida e eficiente, o que permite um menor tempo de reparo e, conseqüentemente, a preservação da vida útil da instalação.

A monitoramento em tempo real é mais um exemplo de técnicas que podem ser utilizadas para melhorar o desempenho das LTS.

Um outro fator, não abordado neste trabalho, é a influência do fator de carga no desempenho das LTS. Sua variação apresenta pouca contribuição para um incremento na ampacidade, porém ela pode ser utilizada para reforçar a confiabilidade e segurança da instalação [79].

Em termos econômicos, apesar dos elevados custos de instalação, as alterações discutidas podem gerar economias significativas na operação de uma LTS, diminuindo o preço do kW instalado e aumentando a confiabilidade do sistema.

---

Vale ressaltar, ainda, que os aspectos apresentados nesta seção influenciam direta ou indiretamente os níveis de campo magnético na superfície do solo gerados pela LTS.

Nesse sentido, os campos magnéticos gerados por um sistema com cabos oleostáticos, por exemplo, são menores que os gerados por cabos OF em uma configuração horizontal.

Além disso, se, por um lado, menores profundidades de instalações em valas são vantajosas para o desempenho do sistema (menor custo e melhor dissipação de calor), os campos existentes na superfície do solo serão significativamente maiores. Os campos gerados por uma LTS instalada em um túnel, por exemplo, serão menores que os de uma linha instalada em vala.

Todos os artifícios utilizados para melhorar a dissipação térmica, assim como a monitoração em tempo real, geram aumento da capacidade de transmissão, levando a um aumento da corrente que circula nos cabos. A tendência na utilização desses artifícios é grande, já que busca-se, cada vez mais, o aproveitamento máximo das instalações.

O aumento dos níveis de campos magnéticos gerados pelas LTS é uma consequência natural da utilização dos artifícios acima discutidos. Como a preocupação com o ambiente eletromagnético tem se tornado grande e nenhum critério de limitação de campos magnéticos é utilizado nos projetos de LTS, a avaliação dos níveis de campo nas proximidades de linhas existentes deve ser feita, bem como a tentativa de se prever os níveis gerados por futuras instalações.

## **5.5 – A Transmissão Subterrânea no Brasil e no Mundo**

A utilização da transmissão subterrânea é uma tendência mundial em função da necessidade de atendimento da demanda em grandes centros. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias (cabos para mais altas tensões, por exemplo) vem garantindo uma redução de custo. Nesta seção são apresentadas as práticas de transmissão subterrânea utilizadas em alguns países. Esse cenário é baseado em um trabalho publicado em 1997 [82] e certamente já apresenta alterações.

---

Na Inglaterra, França e Alemanha, existem instaladas LTS em tensões que variam de 60 a 400 kV. O método de instalação e o tipo de cabo variam para cada tensão. Na França, por exemplo, os cabos são usualmente instalados em valas a 1,4 m de profundidade. Na Inglaterra, há trechos de até 400 kV, que são interligados a linhas aéreas e cujas capacidades devem-se adequar ao sistema aéreo. Isso resulta em correntes elevadas na faixa de 1600 a 3000 A. Os campos magnéticos gerados por sistemas como esse são significativamente elevados.

Nos EUA e Canadá, também encontram-se LTS em tensões elevadas que chegam a 525 kV, utilizando cabos OF. A tensão máxima utilizada em linhas com cabos extrudados é 230 kV.

No Japão, linhas subterrâneas de 275 kV instaladas em dutos e túneis alimentam regiões metropolitanas.

Na Austrália, assim como em alguns países da Ásia, a grande maioria das linhas de transmissão são aéreas, existindo transmissão subterrânea apenas nas tensões de 110 e 132 kV.

Na Itália, há extensos trechos de 132 e 150 kV com cabos extrudados. No entanto, as tensões de 220 e 380 kV são utilizadas apenas em importantes conexões. Assim como no Brasil, o usual é a instalação dos cabos diretamente enterrados em valas na disposição horizontal a uma profundidade de 1,5 m.

As tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam a participação das redes subterrâneas na transmissão de energia em alguns dos países anteriormente apontados.

Tabela 5.1 – Extensão das linhas de transmissão aéreas (LTA) e subterrâneas (LTS) no Reino Unido em 1991 [82].

| <i>Tensão (KV)</i> | <i>LTA (Km)</i> | <i>LTS (Km)</i> | <i>LTS / LTA (%)</i> |
|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 66                 | 3228            | 1145            | 35,47                |
| 132                | 21068           | 2636            | 12,51                |
| 275                | 4910            | 472             | 9,61                 |
| 400                | 10285           | 161             | 1,57                 |

Tabela 5.2 – Extensão das linhas de transmissão aéreas (LTA) e subterrâneas (LTS) na França operadas pela concessionária EDF em 1991 [82].

| <i>Tensão (KV)</i> | <i>LTA (Km)</i> | <i>LTS (Km)</i> | <i>LTS / LTA (%)</i> |
|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 63-150             | 51000           | 1300            | 2,55                 |
| 225                | 25000           | 530             | 2,12                 |
| 400                | 19000           | 24              | 0,13                 |

Tabela 5.3 – Extensão das linhas de transmissão aéreas (LTA) e subterrâneas (LTS) em Tóquio, Japão, operadas pela TEPCO em 1991 [82].

| <i>Tensão (KV)</i> | <i>LTA (Km)</i> | <i>LTS (Km)</i> | <i>LTS / LTA (%)</i> |
|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 22                 | 334             | 1782            | 533,53               |
| 66                 | 14285           | 4774            | 33,42                |
| 154                | 6161            | 778             | 12,63                |
| 275                | 2487            | 706             | 28,39                |
| 500                | 3460            | -               | 0.00                 |

Analisando os dados contidos nas tabelas, observa-se a grande participação das LTS na transmissão em alta tensão em países desenvolvidos. Observa-se, ainda, que a grande parte dos trechos subterrâneos fazem parte da transmissão de energia em áreas urbanas, como pode ser observado pela tabela 5.3.

No Brasil, há linhas de transmissão subterrânea em algumas das principais capitais: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador e Florianópolis. As tensões de operação das linhas subterrâneas variam de 69 a 345 kV. Em indústrias, também são encontrados trechos nas tensões de 69 a 220 kV.

As LTS instaladas no Brasil são essencialmente urbanas. Os métodos de instalação mais usuais são a instalação em dutos e diretamente enterradas em valas, sendo esta a mais comum. As primeiras instalações utilizavam configuração em trifólio, mas as mais recentes adotaram a configuração horizontal. A figura 5.3 mostra o esquema de instalação de uma LTS típica de 138 kV.



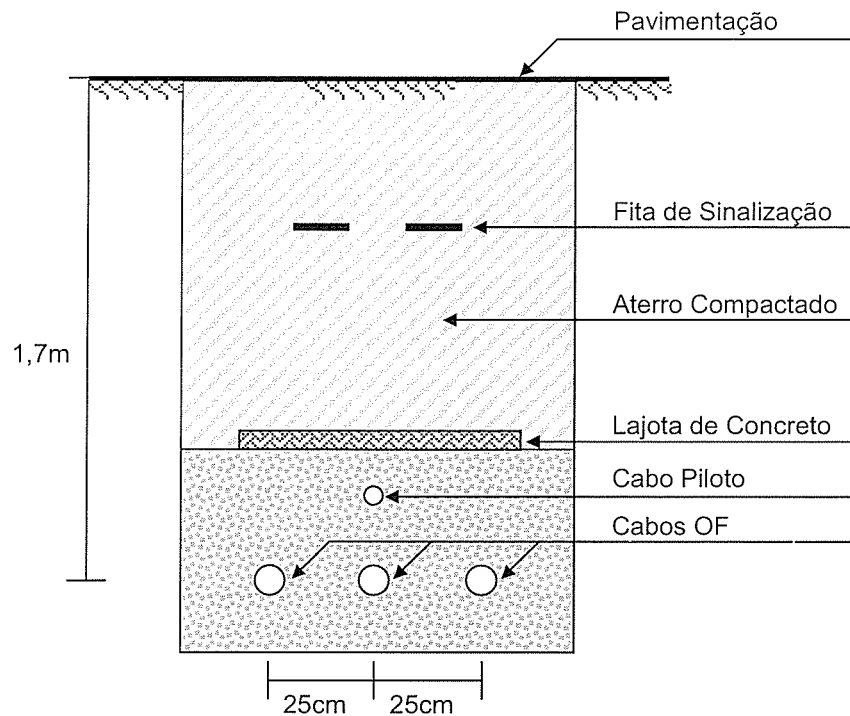


Figura 5.3 – Corte transversal de uma instalação em vala – seção típica para 138 kV [74].

A instalação é feita em valas, que são preenchidas com uma areia especial com baixa resistência térmica. Os cabos são dispostos na configuração horizontal. Logo acima dos cabos é instalado um cabo piloto que tem a função básica de comunicação e, nos casos de cabo OF, indicação da pressão do óleo. Todo o conjunto é coberto com a areia. Em seguida, uma lajota de concreto é acomodada para proteção dos cabos e sinalização da presença da LTS. O restante da vala é coberto com terra e a superfície do solo é pavimentada.

A distância entre os cabos varia para cada tensão de operação, sendo as grandezas mostradas na figura 5.3 típicas para uma linha de 138 kV. As linhas utilizam, ainda, o sistema de aterramento *crossbonding*.

## 5.6 – Medição de Campos Magnéticos Gerados por Linhas Subterrâneas em Belo Horizonte

A CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais – possui cerca de 13 km de Linhas Subterrâneas no município de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Todas as LTS operam com cabos OF na tensão de 138 kV e estabelecem as ligações das subestações situadas na região central da cidade.

A figura 5.4 indica as subestações e as linhas de transmissão aéreas e subterrâneas que compõem o sistema de transmissão da região metropolitana de Belo Horizonte. As LTS existentes são:

- LTS Centro – Sion
- LTS Centro – Santa Efigênia
- LTS Barro Preto – Gutierrez
- LTS Barro Preto – Carlos Prates
- LTS Adelaide – Carlos Prates

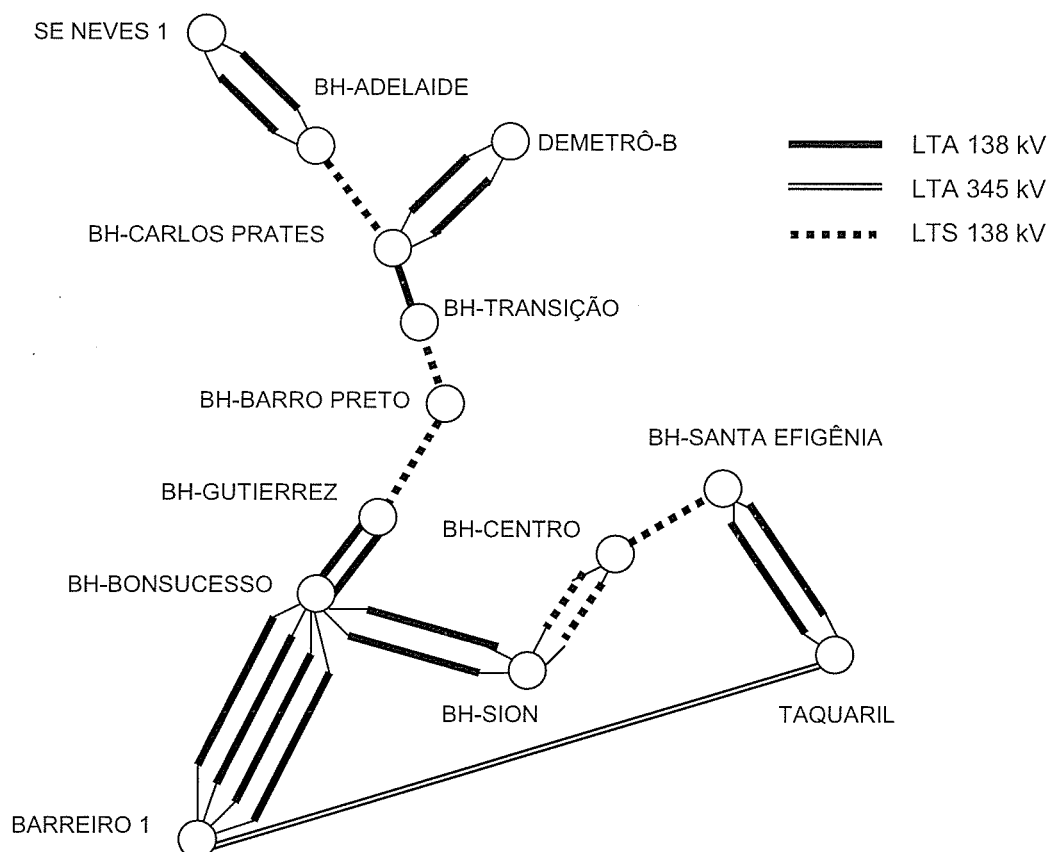


Figura 5.4 – Linhas de transmissão da região metropolitana de Belo Horizonte [74].

Tabela 5.4 – Características das linhas de transmissão subterrâneas em Belo Horizonte [74].

|                                | <i>CENTRO/<br/>STA EFIGÊNIA</i>           | <i>CENTRO/SION</i>                        | <i>BARRO PRETO/<br/>GUTIERREZ</i>              | <i>ADELAIDE/<br/>BARRO PRETO</i>               |
|--------------------------------|---|---|--|--|
| <i>Data da Construção</i>      | 1980                                      | 1974                                      | 1985   | 1985   |
| <i>Características do cabo</i> | OF<br>cobre/chumbo<br>400 mm <sup>2</sup> | OF<br>cobre/chumbo<br>200 mm <sup>2</sup> | OF<br>alumínio/alumínio<br>550 mm <sup>2</sup> | OF<br>alumínio/alumínio<br>550 mm <sup>2</sup> |
| <i>Configuração</i>            | Horizontal                                | Trifólio                                  | Horizontal                                     | Horizontal                                     |
| <i>Tensão Nominal</i>          | 138 kV                                    | 138 kV                                    | 138 kV   | 138 kV   |
| <i>Corrente Nominal</i>        | 630 A                                     | 314 A                                     | 650 A  | 650 A  |
| <i>Potência Nominal</i>        | 150 MVA                                   | 2 x 75 MVA                                | 150 MVA  | 150 MVA  |
| <i>Comprimento</i>             | 2,5 km                                    | 2,7 km                                    | 2,9 km   | 4,7 km   |
| <i>Profundidade Típica</i>     | 1,7m                                      | 1,7m                                      | 1,5m   | 1,5m   |

**Observação:** As características das LTS Adelaide/Carlos Prates e Carlos Prates/Barro Preto foram agrupadas em uma única LTS, denominada Adelaide/Barro Preto, porque ela apresenta apenas um pequeno trecho aéreo para transposição do Ribeirão Arrudas.

As LTS instaladas em Belo Horizonte e suas principais características são sintetizadas na tabela 5.4.

Atualmente, está sendo estudada a instalação de novas LTS na região central de Belo Horizonte para atender a demanda e garantir maior confiabilidade ao sistema. Além disso, o sistema subterrâneo instalado já apresenta alguns problemas devido ao tempo de operação e não opera em sua capacidade máxima instalada. A construção de trechos subterrâneos para substituir linhas aéreas cujas faixas de servidão encontram-se invadidas também está sendo avaliada.

### 5.6.1 – Medições nas proximidades de LTS em Belo Horizonte

Foram realizadas medições em alguns trechos das LTS existentes em Belo Horizonte com o auxílio e acompanhamento de um grupo de técnicos e engenheiros da CEMIG. As medições foram comparadas com simulações e são apresentadas a seguir.

Vale ressaltar que a terra não é uma boa blindagem para campos magnéticos de 60 Hz. Assim, o cálculo do campo magnético gerado por linhas subterrâneas pode ser feito utilizando a mesma formulação desenvolvida para linhas aéreas,

desprezando-se as imagens [83,84,85]. Essa consideração é válida para profundidades que não sejam da ordem de grandeza da profundidade de penetração do campo, o que acontece para as profundidades de instalação dos cabos nas LTS.

Para que o cálculo do campo magnético na superfície do solo gerado por uma LTS seja correto, é necessária a consideração dos objetos localizados nas proximidades da linha, como canos, tubos, etc.. A não consideração da presença de tais objetos pode gerar erros no cálculo [86]. No entanto, o cálculo feito para a comparação com as medições realizadas não levou em consideração tal fator, o que pode contribuir para distorções entre medições e simulações.

A seguir são apresentados os resultados das medições realizadas e as considerações feitas para cada trecho.

#### **a) LTS Adelaide – Carlos Prates**

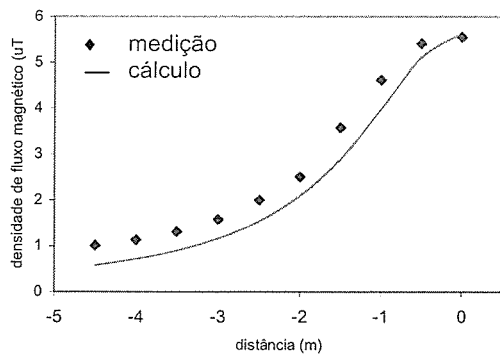
A configuração da linha de transmissão Adelaide – Carlos Prates é uma configuração típica de LTS de 138 kV, como a mostrada na figura 5.3. A profundidade de instalação dos cabos varia em cada trecho em função do traçado da linha e da transposição de obstáculos como a rede de águas e esgoto, por exemplo. Essa configuração é a mais utilizada no Brasil e, em Belo Horizonte, a maioria das LTS mantém esse padrão.

A medição da densidade de fluxo magnético foi feita em três trechos diferentes:

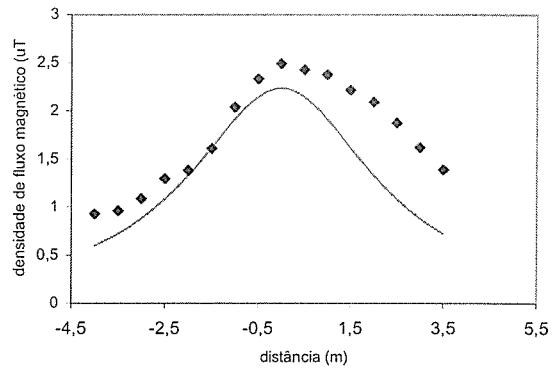
- *Trecho 1*: saída da subestação;
- *Trecho 2*: travessia da Av. Pedro II com R. Monte Simão – canteiro central;
- *Trecho 3*: Rua Lunardi esquina com Av. Pedro II – faixa de pedestre.

A corrente por fase medida na subestação Adelaide foi de 150 A. A profundidade de instalação foi determinada consultando documento interno da CEMIG com as características construtivas da LTS. Nesse caso, as medições foram feitas de 0,5 em 0,5 m e o perfil de campo foi determinado na superfície do solo e a uma altura de 1 m. As figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os perfis dos valores medidos e calculados, nos três trechos de medição. O marco da CEMIG no asfalto, que indica a presença de uma LTS, foi tomado como origem para as medições.

---

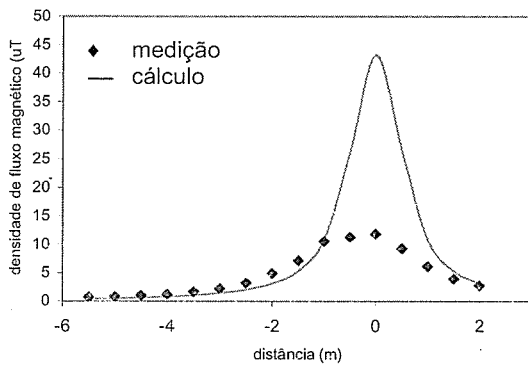


(a)

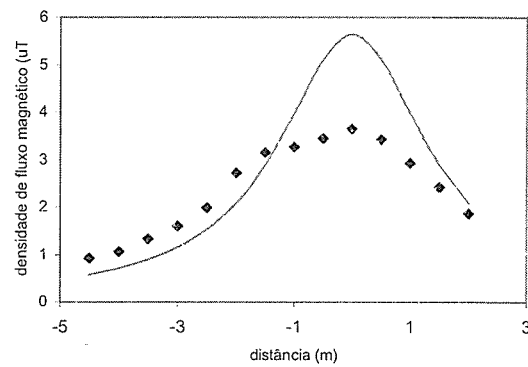


(b)

Figura 5.5 – LTS 1: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 1** (profundidade estimada: 1,5m): (a)  $h = 0m$ ; (b)  $h = 1m$ .

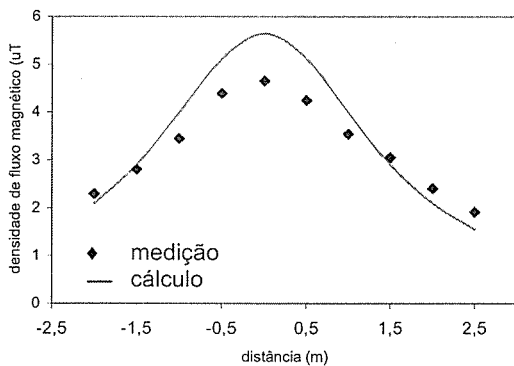


(a)

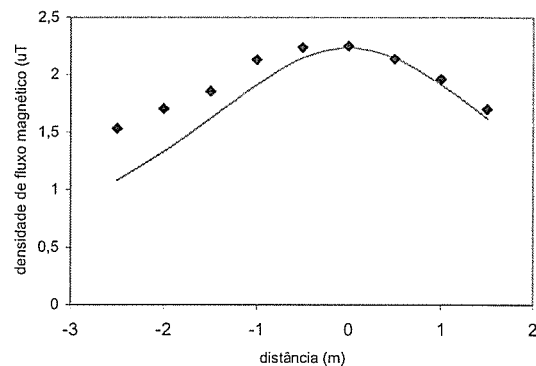


(b)

Figura 5.6 – LTS 1: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 2** (profundidade estimada: 0,5m): (a)  $h = 0m$ ; (b)  $h = 1m$ .



(a)



(b)

Figura 5.7 – LTS 1: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 3** (profundidade estimada: 1,5m): (a)  $h = 0m$ ; (b)  $h = 1m$ .

### b) LTS Santa Efigênia – Centro

A configuração da linha de transmissão Santa Efigênia – Centro é também a configuração típica de uma LTS 138 kV indicada na figura 5.3.

A medição da densidade de fluxo magnético foi feita em dois trechos diferentes:

- *Trecho 1*: Rua Timbiras, 411;
- *Trecho 2*: Rua Timbiras esquina com Rua Ceará.

A corrente por fase medida na subestação Centro foi de 110 A.

As medições foram feitas de 25 em 25 cm no *Trecho 1* e de 50 em 50 cm no *Trecho 2*. As figuras 5.8 e 5.9 indicam os resultados das medições e simulações nos dois trechos avaliados.

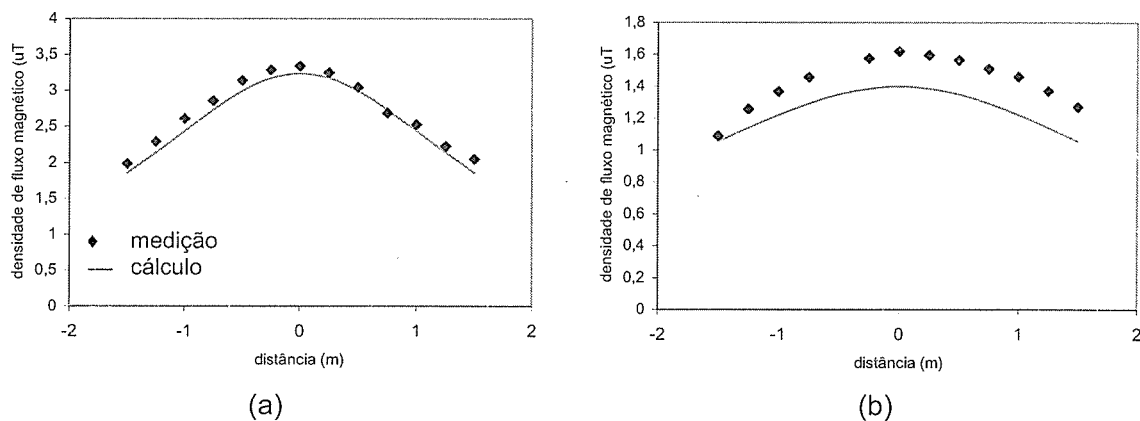


Figura 5.8 – LTS 2: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 1** (profundidade estimada: 1,7m): (a)  $h = 0\text{m}$ ; (b)  $h = 1\text{m}$ .

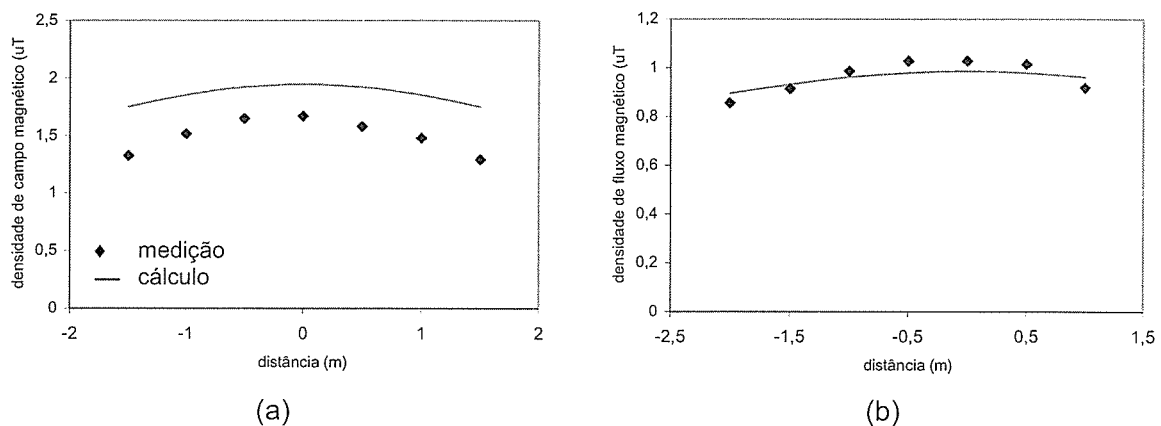


Figura 5.9 – LTS 2: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 2** (profundidade estimada: 2,2m): (a)  $h = 0\text{m}$ ; (b)  $h = 1\text{m}$ .

### c) LTS Sion – Centro

A linha Sion – Centro é a LTS mais antiga de Belo Horizonte e apresenta configuração em trifólio. Ela é composta por dois circuitos cujas características são indicadas na figura 5.10.

A medição da densidade de fluxo magnético foi feita em dois trechos diferentes:

- Trecho 1: Rua Viçosa, 153;
- Trecho 2: Rua Viçosa, 310.

A corrente medida na subestação Centro foi de 105 A por fase para cada circuito. As medições foram feitas de 50 em 50 cm e as figuras 5.11 e 5.12 mostram os valores medidos e calculados.

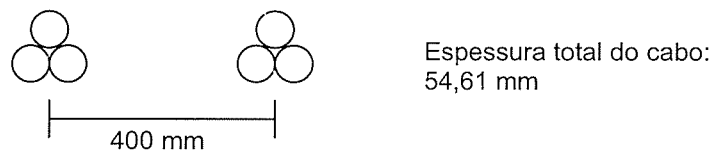


Figura 5.10 – Características da linha de transmissão subterrânea Sion-Centro

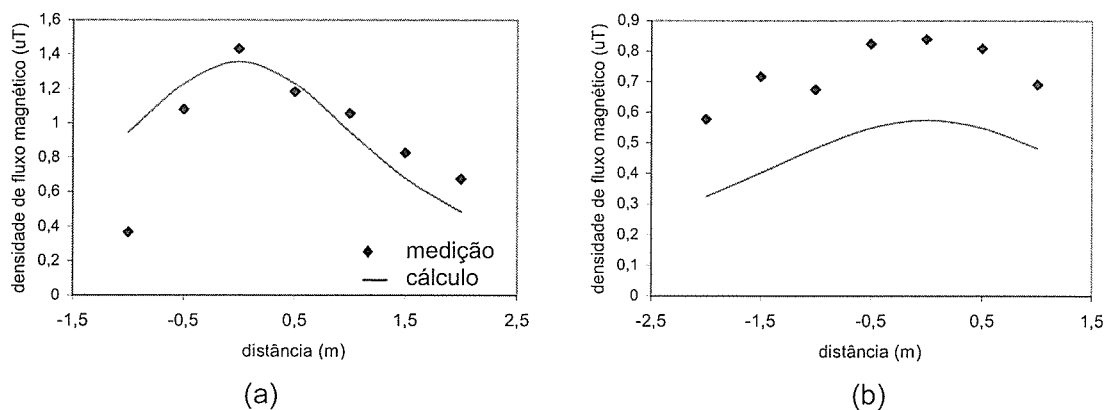


Figura 5.11 – LTS 3: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 1** (profundidade estimada: 1,4m): (a) h = 0m; (b) h = 1m.

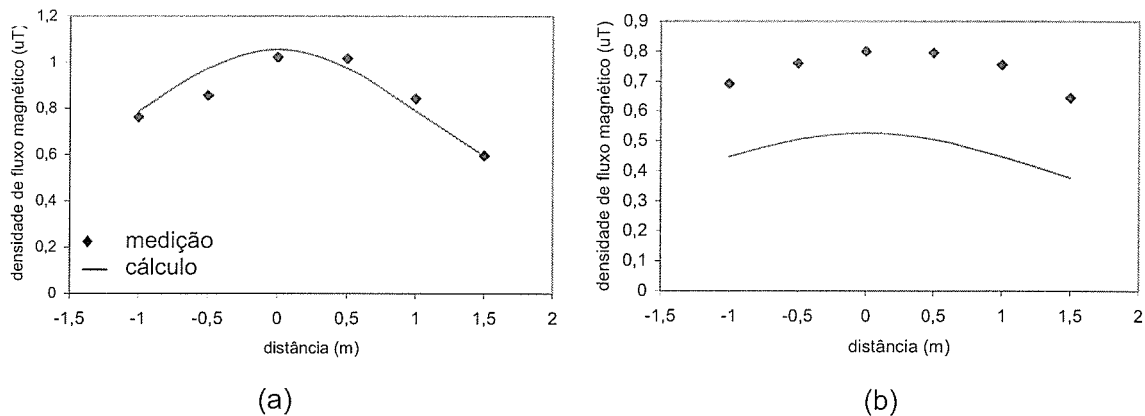


Figura 5.12 – LTS 3: densidade de fluxo magnético medido e simulado para o **trecho 2** (profundidade estimada: 1,6m): (a)  $h = 0m$ ; (b)  $h = 1m$ .

### 5.6.2 – Considerações sobre as medições

Algumas considerações devem ser feitas com relação às medições e simulações realizadas para as linhas de transmissão subterrâneas.

As informações sobre a profundidade de instalação dos cabos foram obtidas por meio de consulta a relatórios e plantas de instalação da CEMIG, que não fornecem valores exatos das profundidades, mas apenas uma aproximação. A informação imprecisa da profundidade de instalação do cabo irá influenciar significativamente os valores calculados, uma vez que o valor do campo magnético é muito influenciado pela distância.

Os valores de corrente foram obtidos pela leitura nos amperímetros das subestações, os quais também apresentam suas imprecisões.

Na simulação, pequenos desvios observados na medição (como a medição nas calçadas, por exemplo) foram desprezados.

Com base em todas essas considerações, conclui-se que, apesar de alguns casos apresentarem grandes desvios entre valores medidos e calculados, os resultados são bastante razoáveis, haja vista a grande variação que o campo magnético sofre para pequenas diferenças nas variáveis envolvidas (profundidade e corrente). Assim, os resultados indicam que a simulação pode servir como predição da ordem de grandeza dos campos gerados por LTS.



Deve-se ressaltar, ainda, a dificuldade apresentada nas medições realizadas, uma vez que as linhas encontram-se em trechos com tráfego intenso, o que algumas vezes impossibilitou a coleta de maior quantidade de dados. Também por esse motivo, a distância entre os pontos de medição variou: nos locais de menor tráfego, foi possível a maior coleta de dados com menores distâncias entre pontos.

Os valores medidos são relativamente baixos, quando comparados com os valores limites estabelecidos por algumas normas. O valor máximo encontrado nas medições foi de 11,8  $\mu\text{T}$  e a recomendação do ICNIRP é de 83,3  $\mu\text{T}$ . No entanto, deve-se observar que os valores de corrente medidos são bem inferiores aos valores nominais (conforme tabela 5.4). As linhas de transmissão subterrâneas de Belo Horizonte estão operando com cargas bem abaixo da nominal devido ao envelhecimento das linhas e para garantir maior confiabilidade. Se a operação fosse a plena carga, como em linhas novas, os campos magnéticos gerados seriam proporcionalmente maiores. Além disso, as novas linhas subterrâneas possuem uma capacidade de transmissão de corrente muito maior que as linhas existentes em Belo Horizonte, instaladas nas décadas de 70 e 80.

### **5.6.3 – Linhas de distribuição subterrâneas**

Os campos magnéticos gerados por linhas de distribuição subterrâneas também devem ser avaliados. O desequilíbrio das correntes nas linhas de distribuição, muitas vezes significativo, pode resultar em campos mais expressivos dos que os gerados por linhas de transmissão.

Como não é objetivo deste trabalho e com o simples intuito de determinar a ordem de grandeza dos campos magnéticos gerados por linhas de distribuição subterrâneas, foi feita uma única medição na saída da subestação CENTRO de Belo Horizonte. Os pontos de medição estão indicados na figura 5.13 e foram tomados de 50 em 50 cm, na superfície do solo. A figura 5.14 mostra o perfil de campo obtido.

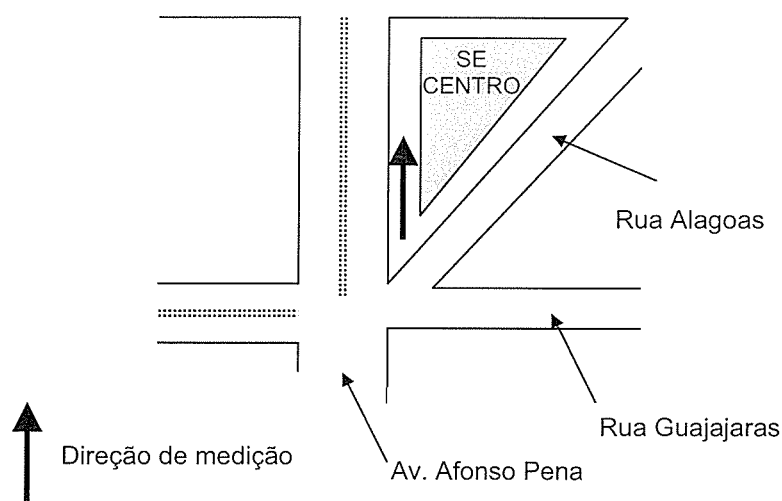


Figura 5.13 – Local da medição de densidade de campo magnético gerado por linhas de distribuição na saída da subestação CENTRO.

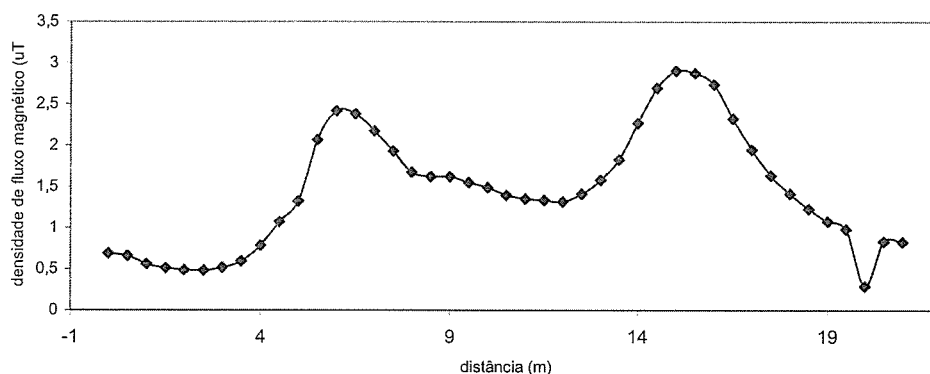


Figura 5.14 – Perfil da densidade de fluxo magnético gerado por cabos de distribuição na saída da subestação CENTRO – valores medidos.

Os dois picos de campo observados na figura 5.14 coincidem com a localização dos alimentadores na saída da subestação. Observa-se que os níveis de campo medidos são da mesma ordem dos campos gerados pelas LTS, chegando a ultrapassá-los.

Uma avaliação mais detalhada dos campos magnéticos gerados por linhas de distribuição subterrâneas deve ser feita em trabalhos futuros.

## 5.7 – Campos Magnéticos Gerados por Outras LTS

A cidade de Belo Horizonte ainda possui poucos trechos de LTS e somente na tensão de 138 kV. No entanto, em outras grandes cidades como São Paulo e Rio de Janeiro, o número de LTS é bastante superior, bem como a presença de linhas com tensões mais elevadas.

O aumento da distância entre os cabos em LTS de tensão mais elevada contribui para o aumento do campo magnético na superfície do solo. Além disso, nos sistemas que permitem a circulação de correntes devido aos artifícios já discutidos (resfriamento, monitoração, etc.), os níveis de campo são bastante superiores.

Objetivando determinar os valores aproximados dos campos magnéticos gerados por outras configurações de LTS, inclusive de tensões mais elevadas, foram feitas simulações para prever os campos gerados por LTS típicas. Alguns resultados são aqui apresentados.

### 5.7.1 – LTS 400 KV com resfriamento natural

A primeira LTS avaliada é uma linha em circuito duplo, ligando duas subestações denominadas “*Torness Nuclear Power*” e “*British Supergrid*” na Escócia [87,88]. A configuração dos cabos de um circuito simples é indicada na figura 5.15. O cabo utilizado é extrudado de polietileno com diâmetro total de 140 mm. A distância entre os dois circuitos é de 6,5 m. A linha tem um comprimento igual a aproximadamente 2 km e a corrente nominal no inverno é de 1810 A, com resfriamento natural.

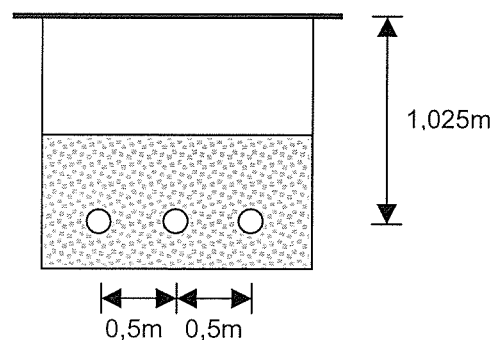


Figura 5.15 – Seção transversal da LTS 400 kV com resfriamento natural.

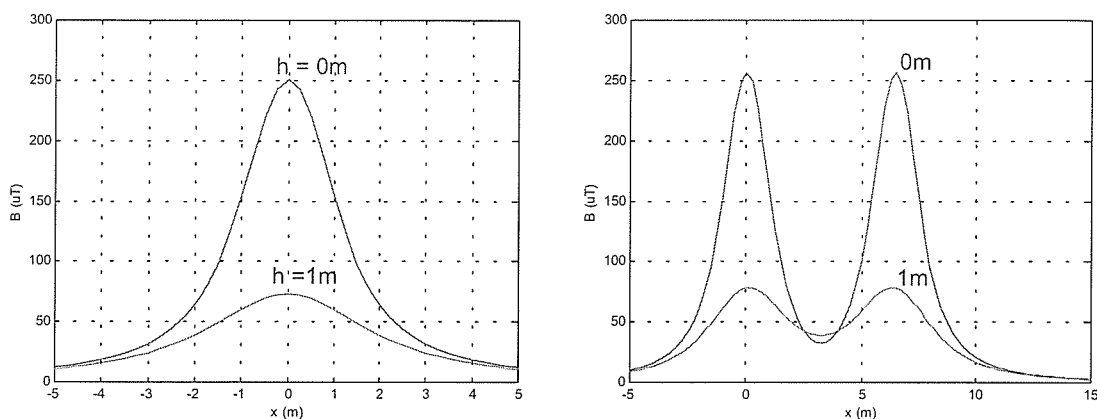


Figura 5.16 – densidade de fluxo magnético para a LT 400KV com resfriamento natural: (a) um circuito; (b) dois circuitos.

A figura 5.16 mostra o perfil da densidade de fluxo magnético calculado para as condições normais de operação, na superfície do solo e a 1 m de altura, quando apenas um circuito encontra-se em funcionamento e também quando os dois circuitos operam. Nos dois casos, a origem do sistema de medição foi considerada a posição do condutor central do circuito à esquerda.

### 5.7.2 – LTS 400 KV com resfriamento forçado

A LTS indicada na figura 5.17 liga duas subestações denominadas “*Dinorwing*” e “*Pentir*” e pode operar com dois circuitos [88]. Por possuir resfriamento forçado, a capacidade de transmissão é aumentada e a corrente nominal é de 2800 A. A profundidade típica é de 2 m. No entanto, há um trecho que atravessa um local onde o subsolo encontra-se bastante congestionado, deixando um espaço muito reduzido para acomodar os dois circuitos. Nessa travessia, a profundidade chega a 0,78 m. A figura 5.18 indica os valores da densidade de fluxo magnético calculados para este último caso.

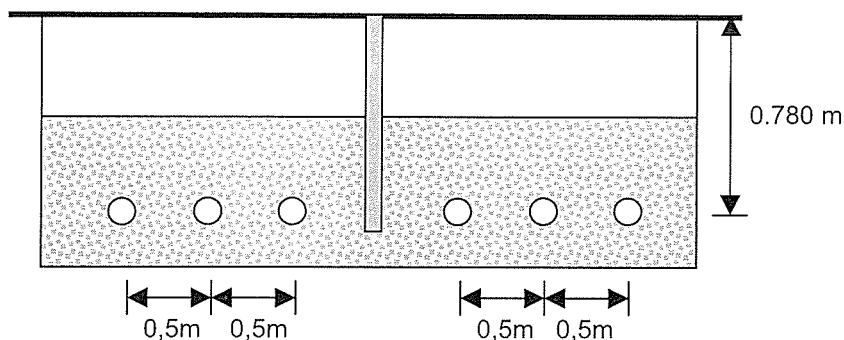


Figura 5.17 – Seção transversal da LTS 400 kV com resfriamento forçado.

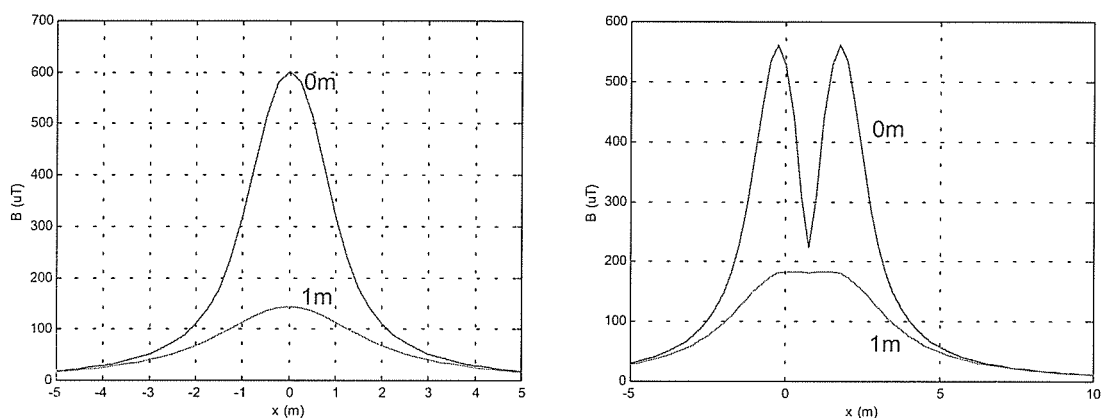


Figura 5.18 – densidade de fluxo magnético para a LTS 400 kV com resfriamento forçado: (a) um circuito; (b) dois circuitos.

Os valores calculados para os campos nas duas linhas de 400 kV (resfriamento natural e forçado) são bastante elevados, chegando a ultrapassar limites impostos pelo ICNIRP. Com o resfriamento forçado, a situação é ainda mais crítica onde valores superiores a 500  $\mu\text{T}$  são obtidos.

### 5.7.3 – LTS 161 kV

A configuração apresentada na figura 5.19 indica um trecho de 1 km de uma LTS construída em lowa instalada em dutos [89].

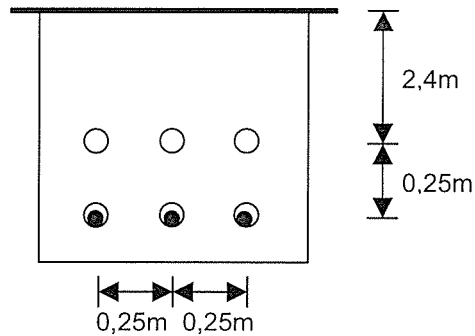


Figura 5.19 – Seção transversal da LTS 161 kV em Iowa.

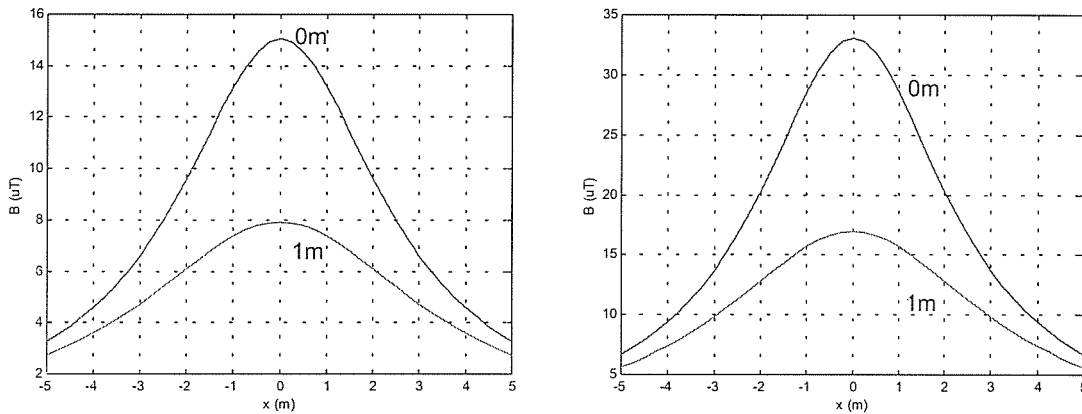


Figura 5.20 – Densidade de fluxo magnético para a LTS 161 KV instalada em Iowa: (a) um circuito; (b) dois circuitos (instalação futura).

A tensão de operação é de 161 kV, com corrente nominal de 1211 A. A primeira linha já opera no duto inferior, e os dutos superiores são reservados para uma futura instalação. Nesse sentido, é interessante avaliar quais os níveis de campo são gerados por este sistema instalado em dutos e como tais níveis serão afetados com a instalação do segundo circuito. Os perfis de campo para as duas situações são indicados na figura 5.20.

Os valores calculados para as duas situações são muito inferiores aos observados nas linhas de 400 kV anteriormente apresentadas. Além dos cabos encontrarem-se instalados a uma profundidade maior, a corrente do circuito é bem

menor. A instalação do segundo circuito resulta em valores de campo mais elevados.

#### 5.7.4 – LTS 138 kV

Uma outra situação interessante de se avaliar é a instalação em dutos de cabos na configuração vertical, conforme indica a figura 5.21, cujas características referem-se à LTS Triagem – Campo de Marte na cidade do Rio de Janeiro [77]. A linha possui uma extensão aproximada de 4,3 Km e opera na tensão de 138 kV com corrente nominal de 790 A. Os campos calculados são mostrados na figura 5.22.

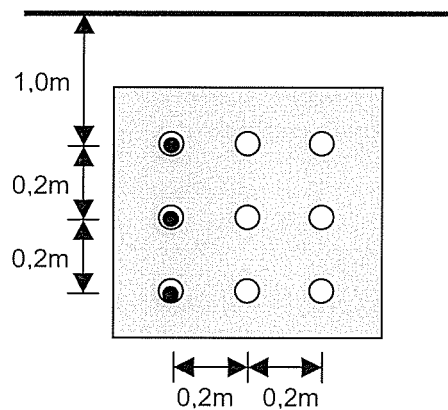


Figura 5.21 – Seção transversal da LTS 138 kV no Rio de Janeiro – instalação em dutos.

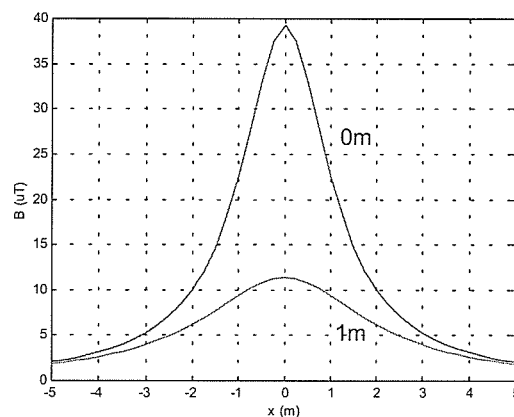


Figura 5.22 – Densidade de fluxo magnético para a LTS 138 KV instalada no Rio de Janeiro.

Os valores foram calculados para a operação de um circuito, não considerando instalações futuras nos dutos disponíveis.

### 5.7.5 – LTS 345 kV

A LTS Norte-Miguel Reale na cidade de São Paulo é uma linha com 14,5 km de extensão, sendo 9,1 km em vala e 5,4 km em túnel, constituída por dois circuitos trifásicos usando cabos OF e operando a 345 kV [69]. A figura 5.23 mostra as características do trecho construído em vala.

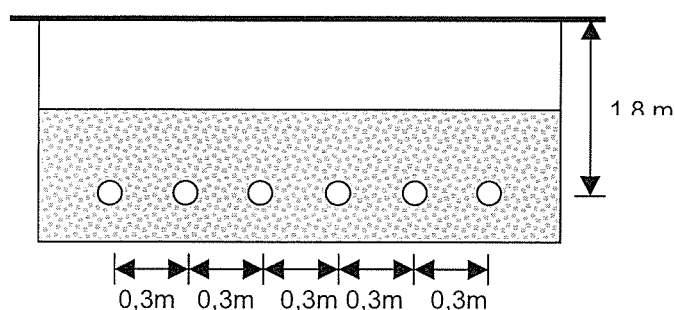


Figura 5.23 – Seção transversal da LTS 345 kV em São Paulo.

A corrente nominal é de 670 A e a profundidade típica é 1,8 m. Os campos gerados por essa linha na operação de um ou dois circuitos são plotados na figura 5.24.

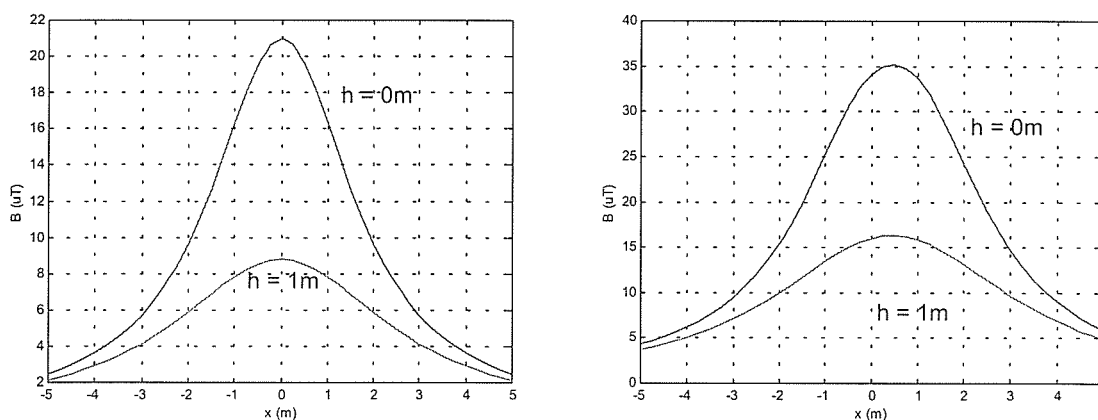


Figura 5.24 – Densidade de fluxo magnético para a LTS 345 kV instalada em São Paulo: (a) um circuito; (b) dois circuitos.



As simulações indicam que podem ser encontrados valores de campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão subterrânea muito superiores àqueles gerados por linhas aéreas de transmissão.

### **5.8 – A Blindagem Ativa Aplicada às LTS**

A geração de campos magnéticos por linhas de transmissão subterrâneas não tem sido muito relatada na literatura. Vários pesquisadores encontram-se envolvidos em projetos aplicados à redução de campos gerados por linhas aéreas de transmissão. No entanto, os níveis de campo gerados por linhas subterrâneas podem ser muito mais expressivos, como mostrado na seção anterior. Os poucos trabalhos que alertam para essa questão não indicam soluções que sejam realmente eficazes [83,84]. Geralmente, são indicadas apenas alterações na configuração do sistema, sendo propostos novos arranjos de cabos. Os sistemas já existentes, entretanto, são pouco contemplados [90].

A blindagem ativa pode ser uma alternativa eficaz na blindagem de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão subterrâneas. Em casos mais críticos, onde os cabos encontram-se a menores profundidades ou as correntes são elevadas, ela pode ser aplicada localmente, entre duas caixas de emendas, por exemplo.

Os cabos a serem utilizados na blindagem ativa devem ser capazes de suportar as correntes necessárias para redução do campo magnético, mas não precisam ser cabos com isolamento para a tensão nominal da LTS.

A instalação pode ser feita por um método não destrutivo, de forma a causar o menor transtorno possível ao trânsito local. Os cabos podem ser instalados sobre a lajota de concreto utilizada para proteção ou na posição que resultar na maior redução de campo, resultado do programa de otimização, por exemplo.

Como afirmado anteriormente, a blindagem ativa não precisa ser aplicada por toda extensão da LTS, mas apenas nos trechos mais críticos. No entanto, algumas linhas apresentam altos valores de campo por toda sua extensão, o que sugere o uso da blindagem ativa em toda a linha.

---

Objetivando quantificar as possíveis reduções de campo, foram calculados os campos com a aplicação da blindagem ativa na linha de 400 kV com resfriamento natural e na linha de 345 kV instalada em São Paulo.

### 5.8.1 Blindagem ativa na LTS 400 KV com resfriamento natural

O programa de otimização foi utilizado na busca da melhor solução para a linha de transmissão de 400 kV cuja configuração original está representada na figura 5.15. Variando-se as restrições impostas às variáveis do problema, as quais são mostradas na tabela 5.5, foram obtidas algumas soluções que são apresentadas na tabela 5.6. Os perfis da densidade de fluxo magnético calculados para cada um dos casos analisados são mostrados na figura 5.25, onde os valores da linha sem blindagem são também mostrados. O cálculo foi feito ao nível do solo e a 1 metro de altura. A tabela 5.7 indica as reduções percentuais para cada um dos casos.

Tabela 5.5 – Restrições para as variáveis da blindagem ativa – LTS 400 KV.

|               | $x_{min} (m)$ | $x_{max} (m)$ | $y_{min} (m)$ | $y_{max} (m)$ | $ I_{max} (A)$ |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <i>caso a</i> | -0,6          | 0,6           | -0,65         | -0,55         | 1000           |
| <i>caso b</i> | -0,6          | 0,6           | -0,8          | -0,6          | 2500           |
| <i>caso c</i> | -0,7          | 0,7           | -0,9          | -0,2          | 2500           |

Tabela 5.6 – Resultado da otimização dos parâmetros da blindagem ativa para a LTS 400 KV.

|                           | $x_a (m)$ | $x_b (m)$ | $x_c (m)$ | $y_a = y_b = y_c (m)$ | $ I_a  =  I_b  =  I_c  (A)$ |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Fase</i>               | -0,5      | 0         | 0,5       | -1,025                | 1810                        |
| <i>Blindagem – caso a</i> | -0,6      | 0         | 0,6       | -0,5                  | -643,8                      |
| <i>Blindagem – caso b</i> | -0,6      | 0         | 0,6       | -0,8                  | -1262,1                     |
| <i>Blindagem – caso c</i> | -0,6      | 0         | 0,6       | -0,9                  | -1379,2                     |

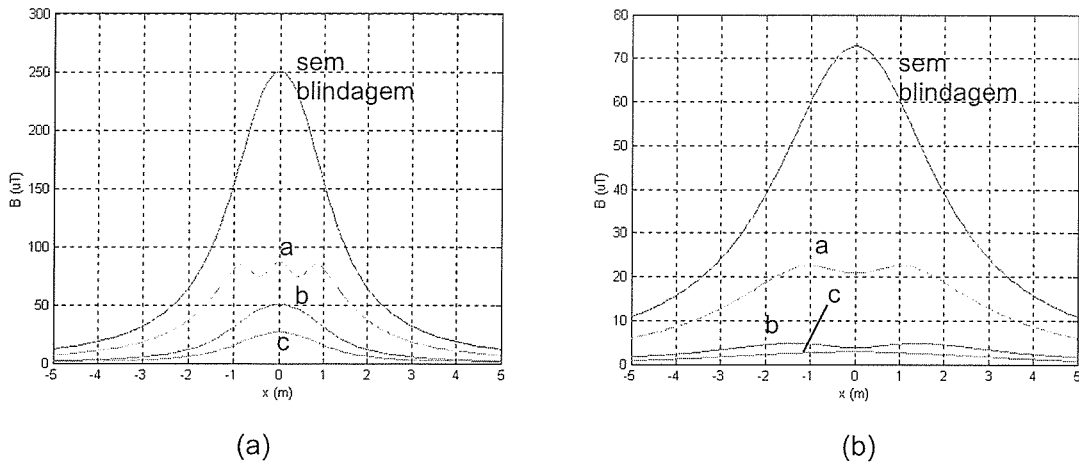


Figura 5.25 – Blindagem Ativa - LTS 400 KV – Perfil da densidade de fluxo magnético: (a)  $h = 0m$ ; (b)  $h = 1m$ .

Tabela 5.7 – Reduções percentuais com a blindagem ativa aplicada à LTS 400 kV.

| Redução (%) | Caso a   |          | Caso b   |          | Caso c   |          |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | $h = 0m$ | $h = 1m$ | $h = 0m$ | $h = 1m$ | $h = 0m$ | $h = 1m$ |
| Máxima      | 67,9     | 71,4     | 83,4     | 94,7     | 91,4     | 96,0     |
| Mínima      | 42,6     | 44,4     | 79,5     | 84,8     | 89,3     | 92,2     |
| Média       | 46,6     | 52,9     | 81,9     | 88,4     | 90,8     | 94,0     |

A solução que apresenta maior eficiência é o “caso c”, com reduções percentuais médias superiores a 90%. A configuração dos condutores das fases e da blindagem para esse caso pode ser observada na figura 5.26.

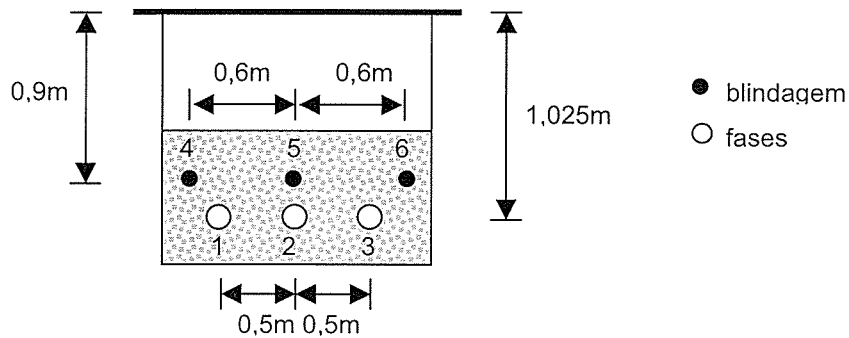


Figura 5.26 – Disposição dos condutores da linha de transmissão e da blindagem ativa – LTS 400 KV.



Tabela 5.10 – Alterações das grandezas na carga com a inserção da blindagem ativa (BA) – LTS 400 kV.

|         | Fase a      |             | Fase b       |              | Fase c        |               |
|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|         | sem BA      | com BA      | sem BA       | com BA       | sem BA        | com BA        |
| V (KV)  | 397,0∠-0,5° | 397,5∠-0,4° | 397,5∠119,5° | 397,5∠119,6° | 397,0∠-120,5° | 397,5∠-120,4° |
| I (A)   | 836,8∠-0,5° | 836,8∠-0,4° | 836,9∠119,5° | 836,8∠119,6° | 836,8∠-120,5° | 836,8∠-120,4° |
| P (MW)  | 332,7       | 332,7       | 332,7        | 332,6        | 332,7         | 332,7         |
| S (MVA) | 332,7       | 332,7       | 332,7        | 332,6        | 332,7         | 332,7         |

Tabela 5.11 – Grandezas calculadas na linha de transmissão (LTS) e na blindagem ativa (BA) – LTS 400KV.

|          | Fase a     |               | Fase b       |              | Fase c        |             |
|----------|------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
|          | LTS        | BA            | LTS          | BA           | LTS           | BA          |
| V (KV)   | 400∠0,0°   | 2,58∠-135°    | 400∠120°     | 2,58∠-15°    | 400∠-120°     | 2,58∠105°   |
| I (A)    | 837,0∠1,0° | 635,7∠-177,2° | 837,0∠121,2° | 638,5∠-57,5° | 837,0∠-119,0° | 635,7∠61,8° |
| P (MW)   | 334,8      | 1,21          | 334,7        | 1,21         | 334,8         | 1,21        |
| Q (MVar) | -5,91      | 1,12          | -6,91        | 1,11         | -5,91         | 1,12        |
| S (MVA)  | 334,8      | 1,65          | 334,8        | 1,65         | 334,8         | 1,65        |

Analisando os resultados, observa-se, como para linhas aéreas, que a potência adicional para a instalação da blindagem é pequena comparada à potência nominal da linha de transmissão original. A potência necessária para suprir a blindagem ativa é inferior a 1% da potência do sistema. Além disso, a fonte de tensão necessária para a injeção de corrente nos condutores da blindagem representa somente cerca de 0,7% da tensão nominal da LTS.

Observando as tabelas 5.9 e 5.10, verifica-se, ainda, que a linha de transmissão original e as grandezas da carga sofrem pequenas variações com a inserção da blindagem ativa, com exceção da potência reativa. A blindagem ativa altera o fluxo de reativo da linha de transmissão e essa é uma característica a ser avaliada.

### 5.8.2 – Blindagem ativa na LTS 345 KV

A mesma análise anterior foi repetida para a linha de 345 kV localizada em São Paulo. Duas soluções foram obtidas para diferentes restrições impostas às variáveis do problema. As restrições para os dois casos analisados e as soluções obtidas são indicadas nas tabelas 5.12 e 5.13, respectivamente. A figura 5.27 indica os perfis da densidade de fluxo magnético ao nível do solo e a 1 metro de altura, para cada uma das soluções, e a tabela 5.14 indica as reduções percentuais.

Tabela 5.12 – Restrições para as variáveis da blindagem ativa – LTS 345 KV.

|        | $x_a$ (m)            | $x_b$ (m)             | $x_c$ (m)          | $y_{a,b,c}$ (m)   | $ I_{max} $ (A) |
|--------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| caso a | $-0,4 < x_a < -0,3$  | $-0,1 < x_b < -0,1$   | $0,3 < x_c < 0,4$  | $-1,3 < y < -0,5$ | 600             |
| caso b | $-0,5 < x_a < -0,25$ | $-0,25 < x_b < -0,25$ | $0,25 < x_c < 0,5$ | $-1,7 < y < -0,5$ | 600             |

Tabela 5.13 – Resultado da otimização dos parâmetros da blindagem ativa para a LTS 345 KV.

|                    | $x_a$ (m) | $x_b$ (m) | $x_c$ (m) | $y_a = y_b = y_c$ (m) | $ I_a  =  I_b  =  I_c $ (A) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------------|
| Fase               | -0,3      | 0         | 0,3       | -1,8                  | 670,0                       |
| Blindagem – caso a | -0,4      | 0         | 0,4       | -1,3                  | -303,7                      |
| Blindagem – caso b | -0,36     | 0         | 0,36      | -1,7                  | -504,6                      |

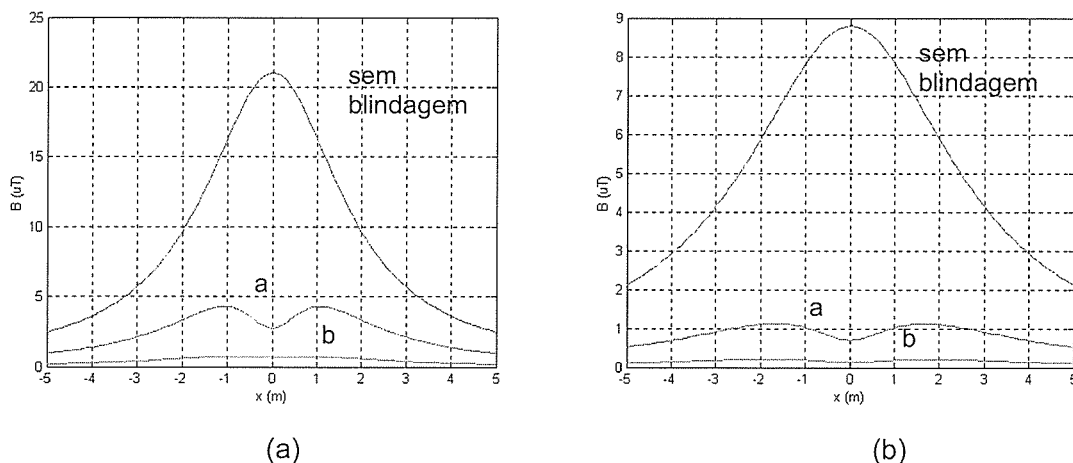


Figura 5.27 – Blindagem Ativa - LTS 345 KV – Perfil da densidade de fluxo magnético: (a)  $h = 0\text{m}$ ; (b)  $h = 1\text{m}$ .



Tabela 5.17 – Alterações das grandezas na carga com a inserção da blindagem ativa (BA) – LTS 345 kV.

|         | Fase a      |             | Fase b       |              | Fase c        |               |
|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|         | sem BA      | com BA      | sem BA       | com BA       | sem BA        | com BA        |
| V (KV)  | 342,5∠-0,6° | 342,4∠-0,4° | 342,5∠119,5° | 342,4∠119,6° | 342,5∠-120,6° | 342,4∠-120,4° |
| I (A)   | 856,2∠-0,6° | 856,6∠-0,4° | 856,1∠119,5° | 856,1∠119,6° | 856,2∠-120,6° | 856,6∠-120,4° |
| P (MW)  | 293,2       | 293,2       | 293,2        | 293,1        | 293,2         | 293,2         |
| S (MVA) | 293,2       | 293,2       | 293,2        | 293,1        | 293,2         | 293,2         |

Tabela 5.18 – Grandezas calculadas na linha de transmissão (LTS) e na blindagem Ativa (BA) – LTS 345 kV.

|          | Fase a     |               | Fase b       |              | Fase c        |             |
|----------|------------|---------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
|          | LTS        | BA            | LTS          | BA           | LTS           | BA          |
| V (KV)   | 345∠0,0°   | 2,53∠-135°    | 345∠120°     | 2,53∠-15°    | 345∠-120°     | 2,53∠105°   |
| I (A)    | 856,2∠1,0° | 651,6∠-175,6° | 856,3∠120,8° | 641,8∠-56,2° | 856,2∠-119,4° | 651,6∠63,7° |
| P (MW)   | 295,4      | 1,25          | 295,4        | 1,22         | 295,4         | 1,25        |
| Q (MVar) | -3,22      | 1,08          | -4,29        | 1,07         | -3,22         | 1,08        |
| S (MVA)  | 295,4      | 1,65          | 295,4        | 1,62         | 295,4         | 1,65        |

A potência adicional consumida pelo sistema de blindagem é inferior a 1% da potência nominal da linha de transmissão. A fonte de tensão do circuito de blindagem é também da ordem de 1% da tensão nominal do sistema. Com a inserção da blindagem ativa, o fluxo de potência reativa sofre alterações, cujas características deverão ser avaliadas. As demais grandezas calculadas na linha de transmissão com e sem a blindagem apresentam pequenas variações.

## 5.9 – Considerações Finais

As linhas de transmissão subterrâneas representam uma fonte de campo magnético de grande interesse. As tecnologias atuais buscam cada vez mais um aumento da capacidade de transmissão. Além disso, a busca de desenvolvimento de novos materiais capazes de operar em temperaturas mais elevadas, e mesmo a



utilização de materiais supercondutores para a transmissão subterrânea, indica a tendência de aumento dos campos magnéticos nas proximidades de LTS.

A importância, portanto, das linhas subterrâneas como fontes de campo magnético tende a crescer. A utilização da blindagem ativa como alternativa para redução dos níveis de campo nesses casos é interessante e pode apresentar bons resultados. A otimização dos parâmetros da blindagem pode auxiliar na maior redução de campos.

De maneira similar às linhas de transmissão aéreas, as perdas inseridas no sistema pela blindagem ativa são relativamente pequenas, face às vantagens que a mesma pode oferecer. No entanto, estudos mais detalhados devem ser desenvolvidos.

---

## **6 – Conclusões**

Nos últimos anos, a busca do fornecimento de energia elétrica que interaja com o meio ambiente da melhor forma possível tem se tornado uma exigência imposta por órgãos públicos e pela população de forma geral. A utilização de instalações com menor impacto ambiental tem sido, assim, um aspecto a ser considerado nos projetos de engenharia.

Por outro lado, a pesquisa sobre possíveis efeitos biológicos da exposição a campos eletromagnéticos não tem conseguido demonstrar conclusivamente a veracidade de tal afirmação. Além disso, os níveis de campo que poderiam causar danos à saúde ainda não estão definidos, o que pode ser confirmado pela discrepância entre diversos limites estabelecidos por diferentes normas internacionais.

Mesmo com os dados não conclusivos dos efeitos à saúde, a pesquisa na área de engenharia, relacionada ao gerenciamento dos níveis de campo magnético gerados por instalações de potência, continua em desenvolvimento.

No âmbito internacional, diversas empresas do setor elétrico estão desenvolvendo programas de monitoramento do campo magnético gerados por suas instalações. Tais programas visam implementar medidas para minimizar o impacto de possíveis efeitos à saúde de campos magnéticos provenientes dos sistemas de potência, mantendo ao mesmo tempo a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema. Além do monitoramento dos níveis emitidos, medidas de controle visando reduzir os campos magnéticos vêm sendo adotadas. Essas medidas resultam do compromisso do setor elétrico em encontrar soluções para problemas potenciais.

Para cada fonte de campo magnético, podem existir alternativas de projeto que reduzam ou modifiquem a emissão de campo sem alterar a função desejada do sistema.

As linhas de transmissão são fontes de campo magnético que têm sido freqüente alvo de questionamento público, dada sua evidente visibilidade. Dessa forma, medidas que reduzam os campos magnéticos gerados por linhas de transmissão tornam-se importante objeto de estudo, do ponto de vista de

---

engenharia. Algumas alternativas podem ser tomadas na fase de projeto, tais como utilização de linhas compactas. No entanto, para linhas já existentes, medidas de controle devem ser estudadas. Nesse sentido, destacam-se a blindagem passiva e a blindagem ativa para campos magnéticos em 60 Hz.

Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo estudar a blindagem ativa como alternativa para blindagem de campos magnéticos em frequência industrial. No estudo de casos de aplicação, sistemas de baixa potência, caracterizados por sistemas de distribuição predial, e as linhas de transmissão aéreas e subterrâneas foram analisados.

Atualmente, não existem soluções para blindagem de campos magnéticos de baixa frequência que sejam, ao mesmo tempo, viáveis técnica e economicamente. A utilização de materiais metálicos, ferrosos ou não, tem-se mostrado ineficiente. Nesse sentido, o desenvolvimento de novos materiais que apresentem alto fator de blindagem pode ser uma alternativa. Essa solução vem sendo estudada no desenvolvimento de uma outra tese de doutorado na UFMG. Por outro lado, a blindagem ativa é uma outra alternativa para a solução deste problema e sua aplicação foi avaliada no desenvolvimento deste trabalho. Assim, este trabalho busca contribuir com a discussão das alternativas existentes e a busca de soluções para a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

A eficiência da blindagem ativa na minimização de campos magnéticos mostrou-se superior à utilização de outras técnicas, tais como a utilização de materiais metálicos e a blindagem passiva.

Neste trabalho, foi proposta uma técnica de blindagem ativa, baseada na utilização de transformadores de corrente para injeção das correntes de compensação. Os estudos preliminares desenvolvidos mostraram que a compensação obtida, no esquema de ligação proposto, é eficiente para diferentes condições de cargas. Além disso, a característica de auto-regulação da blindagem ativa, bem como o menor custo para alguns sistemas, são vantagens que devem ser consideradas.

A aplicação da técnica proposta é indicada para sistemas de baixa potência, onde o custo dos transformadores de corrente pode ser vantajoso com relação a outras técnicas, tais como a blindagem com materiais metálicos. No entanto, em sistemas de alta potência, tais como linhas de transmissão, seu custo deve ser

---

---

comparado com a utilização de outros tipos de fontes para que a melhor alternativa seja adotada. Em linhas de transmissão subterrâneas, essa parece ser uma boa opção.

A utilização da blindagem ativa para redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão aéreas e subterrâneas foi estudada.

Nesse sentido, foi desenvolvido um programa de otimização, visando melhorar a eficiência da blindagem ativa, a partir da escolha dos parâmetros (posição e corrente nos condutores da blindagem) que minimizem os campos magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão. Resultados das simulações realizadas com diversas estruturas típicas de linhas de transmissão indicam que reduções de até 95% podem ser atingidas, quando os parâmetros da blindagem são corretamente escolhidos.

A influência da inserção do sistema de blindagem no sistema original foi avaliada, a partir de simulações computacionais utilizando o *MicroTran*<sup>TM</sup> e o *mtline*<sup>®</sup>.

A inserção da blindagem ativa na linha de transmissão leva à redução da indutância da linha, o que pode trazer algumas vantagens quanto ao aumento da capacidade de transmissão do sistema, melhorando seu desempenho. No entanto, essa característica deve ser melhor avaliada.

Nos casos estudados, a potência adicional necessária para o funcionamento da blindagem ativa foi calculada e representa cerca de 1 a 5% da potência nominal do sistema. Tal característica pode viabilizar a aplicação da blindagem ativa em linhas de transmissão.

Neste trabalho, foi dado destaque aos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão subterrâneas. Muito pouca atenção tem sido dispensada pela comunidade científica e empresas do setor no tratamento de linhas de transmissão subterrâneas como fontes de campo magnético, ao contrário das linhas aéreas. No entanto, os campos magnéticos gerados por linhas subterrâneas podem ser significativamente maiores quando comparados a linhas aéreas de mesma potência, como foi demonstrado neste trabalho. Além disso, a tendência à utilização de linhas subterrâneas, principalmente em grandes centros urbanos, é um aspecto a ser considerado. Nesse sentido, a utilização de técnicas de redução em linhas subterrâneas também deve ser avaliada.

---

A blindagem ativa pode ser uma interessante solução na redução de campos magnéticos gerados por linhas subterrâneas. Sua constituição por cabos isolados facilita a utilização de cabos adicionais para a injeção de correntes de compensação. A utilização de transformadores de corrente, nesse caso, pode ser uma alternativa técnica e economicamente viável. Com relação à utilização de materiais metálicos, os materiais existentes no mercado não oferecem uma boa eficiência de blindagem. O desenvolvimento de materiais especiais para blindagem dos cabos pode ser, ainda, uma outra opção. No entanto, estudos mais aprofundados devem ser desenvolvidos.

Vale ressaltar, ainda, a importância da conscientização das empresas do setor elétrico quanto à relevância do tema em questão. Medidas de controle da geração de campos eletromagnéticos e a maior interação com a comunidade são iniciativas que devem ser tomadas para que problemas futuros sejam evitados, o que poderia trazer prejuízos econômicos ao setor. Nesse sentido, projetos que minimizem o impacto ao meio ambiente, tanto do ponto de vista visual, com a construção de estruturas esteticamente mais adequadas, quanto do ponto de vista da emissão de campos eletromagnéticos devem ser desenvolvidos. Para tanto, investimentos no setor são necessários.

### **6.1 – Propostas de Continuidade**

O conhecimento dos níveis de campos eletromagnéticos nos mais diversos ambientes é essencial para a avaliação se medidas de controle de emissão de campo sejam ou não necessárias. Nesse sentido, a caracterização dos campos eletromagnéticos provenientes de diferentes fontes torna-se interessante. Este trabalho apresentou medições de algumas fontes de campo; no entanto, medições mais sistemáticas devem ser realizadas, utilizando, inclusive, medidores seletivos.

De especial interesse para as empresas do setor elétrico, a avaliação dos campos eletromagnéticos provenientes de suas instalações é bastante interessante. Assim, medições de campo nas proximidades de subestações, linhas de distribuição e linhas de transmissão aéreas e subterrâneas, por exemplo, podem ser feitas,

---

contribuindo para a criação de uma massa de dados que ajude na caracterização do ambiente eletromagnético.

Os estudos desenvolvidos relativos à técnica de blindagem ativa mostraram que algumas características devem ser melhor avaliadas.

A blindagem ativa resulta na redução da indutância série da linha de transmissão. O possível aumento da capacidade de transmissão da linha deve ser estudado, o que pode justificar a aplicação da blindagem ativa em sistemas de transmissão. A mudança no fluxo de potência do sistema deverá também ser avaliada.

Na aplicação da blindagem ativa a linhas de transmissão aéreas, alguns aspectos deverão ser avaliados, tais como: suportabilidade elétrica e mecânica dos condutores com a inserção da blindagem, desenvolvimento de estruturas especiais de torres de transmissão, estudo da coordenação de isolamento, determinação da localização dos cabos pára-raios, alterações no sistema de proteção, dentre outros.

O custo da blindagem ativa deverá ser detalhadamente calculado. As perdas inseridas pela blindagem ativa deverão ser levadas em consideração no cálculo do preço do KW instalado, bem como os custos extras de instalação da blindagem (cabos da blindagem, fontes de tensão, etc.).

Com relação à utilização de transformadores de corrente para injeção das correntes de compensação, o projeto adequado dos TC's deverá ser feito.

O custo final da blindagem ativa deverá ser comparado ao de outras técnicas, tais como utilização de chapas metálicas, no caso da blindagem de sistemas de baixa potência e de linhas de transmissão subterrâneas.

Finalmente, a montagem de um protótipo em laboratório, simulando a blindagem ativa de um sistema real deverá ser desenvolvida.

---

## Referências Bibliográficas

- [1] Nieminen, K., "Transmission Structures As Landscape Art", *Transmission & Distribution World*, pp. 36-41, May 1996.
- [2] Prosdócimo, N., "Directrices para Proyetos de Líneas Aéreas de Trasnmisión Compactas Urbanas", SALTEE'96 – Seminário Avanzado de Líneas de Transmision de Energia Electrica, Belo Horizonte, 27 de Outubro a 01 de Novembro, 1996.
- [3] Chartier, V. L., "Um Panorama das Linhas com Alta Capacidade e Baixo Impacto no Meio Elétrico", *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp. 1117-123, Dezembro de 1995.
- [4] Boas, C. W. V.; Guedes, A. C.; Caíres, V. G.; Rodrigues, A. O.; Valle, M. A. G.; Melo, E. B.; Porto, E. W., "Efeitos Biológicos de Campos Magnéticos em Frequência Industrial: Evidências, Incerteza, Estudos Necessários", *III Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, São Paulo, 25 a 28 de Outubro, 1998.
- [5] Johnson, G. B.; Clairmont, B. A., "Linhas de Campo de Baixa Intensidade: Conceitos de Projeto", *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp. 92-98, Novembro de 1995.
- [6] Farag, A. S.; Dawoud, M. M.; Al-Haj, A. H.; Lahloub, M.; Cheng, T. C.; Du, Y., "Urban Substations Magnetic Field Shielding in Saudia Arabia". *International Symposium on High Voltage Engineering*, Canada, August 25 - 29, 1997.
- [7] Bártholo, A. M.; Coutinho, R. M., "Avaliação de Impactos Ambientais em Áreas Residenciais Urbanas Próximas a Instalações de Alta Tensão", XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/06, Belém, 1997.
- [8] ICNIRP – International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. *Health Physics* vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [9] Souza, H. M.; Domingues, L. A. C.; Barbosa, C. R. N.; Ribeiro, E. J. S.; Telles, P. C.; Rosolino, A. P., "Possíveis Efeitos do Campo Eletromagnético na Implantação de Subestações", *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp. 44-53, Novembro de 2000.
- [10] Guasekaran, M., "Electromagnetic Fields at the outer Boundary Vicinity of Distribution Stations in the San Ferando Valley of Los Angeles and a Hypothesis on their Influence on Human Health". *International Symposium on High Voltage Engineering*, Japan, August 23 - 27, 1993, p. 521-523.
- [11] Melo, M. O. B. C.; Fonseca, L. C. A.; Fontana, E.; Naidu, S. R., "Electric and Magnetic Fields of Compact Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 1, pp. 200 - 204, January, 1999.
- [12] George, GERRY, "Line Designs Reduce EMF Emission", *Transmission & Distribution World*, pp. 68-72, April 1998.
- [13] Woolery, B.; Ferguson, J., "The Benefits of Split-Phase Technology", *Transmission & Distribution World*, pp. 14-16, May 1996.
- [14] Trindade, C. A. M.; Nisticó, C. R. C.; Guimarães, A. P. B., "O Meio Ambiente e seus Efeitos sobre o Custo, Prazos e Procedimentos de Construção nas LT's de Furnas", XI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/20, 1991, Rio de Janeiro, Brasil.

- 
- [15] Retes, F. R. P.; Ramirez, J. A., "Higiene Ocupacional e os Campos Elétricos e Magnéticos em Frequência Industrial", *IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Natal, 19 a 22 de Novembro, 2000.
- [16] Lu, S. L.; Lin, C. E.; Huang, C. L.; Lu, T. C., "Power Substation Magnetic Field Measurement Using Digital Processing Techniques", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1221 - 1227, October, 1999.
- [17] Maruvada, P. S., "Characterization of Power Frequency Magnetic Fields in Different Environments", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 598 - 605, April, 1993.
- [18] "Measurements of Power Frequency Magnetic Fields away from Power Lines", A Report of the IEEE Magnetic Fields Task Force, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 901 - 911, April 1991.
- [19] Henschel, 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.
- [20] Banfai, B.; Karady, G. G.; Kim, C. J.; Maracas, K. B., "Magnetic Field Effects on CRT Computer Monitors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 307 - 312, January 2000.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Karady, G.G.; Nunez, C.V.; Raghavan, R., "The Feasibility of Magnetic Field Reduction by Phase Relationship Optimization in Cable Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 647 - 654, April, 1998.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Memari, A. R.; Janischewskyj, W., "Mitigation of Magnetic Field Near Power Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1577 - 1586, July, 1996.
- [27] Murta, M. L., "Estudo de Técnicas de Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência", *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 1998.
- [28] Souza, M., "Estudo da Eficiência de Chapas de Aços Elétricos na Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência", *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 2000.
- [29] Paul, C. R., "Introduction to Electromagnetic Compatibility", Department of Electrical Engineering - University of Kentucky, Lexington. A Wiley-Interscience Publication, 1992.
- [30] Goedbloed, J.J., "Electromagnetic Compatibility", Philips Research Laboratories, Eindhoven - translated by Tom Holmes, Prentice Hall, 1990.
-



- 
- [31] Juha, T.; Esa, V., "Campos Magnéticos Causados por Postos de Transformação Internos", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 119-128, Abril de 1996.
- [32] 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.
- [33] Murta, M. L.; Paulino, J. O. S.; Souza, M., "Blindagem de Campos Magnéticos de 60 Hz Utilizando Chapas Metálicas e Blindagem Ativa", IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Natal, 19 a 22 de Novembro, 2000.
- [34] 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.
- [35] Jonsson, U.; Larsson, A.; Sjödin, J. O., "Optimized Reduction of the Magnetic Field near Swedish 400 KV Lines by Advanced Control of Shield Wire Currents. Test Results and Economic Evaluation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 2, pp. 961 - 969, April, 1994.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Souza, M.; Paulino, J. O. S.; Murta, M. L., "Estudo da Blindagem de Campos Magnéticos de 60Hz Produzidos por Fontes de Alta Impedância", IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Gramado, 04 a 06 de Novembro, 2002.
- [39] Boas, C. W. V.; Tafuri, W. L.; Ramirez, J. A., "Campos Magnéticos de Frequência Industrial: Evidências de Possíveis Efeitos Biológicos", IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Natal, 19 a 22 de Novembro, 2000.
- [40] <http://www.mcw.edu/gcrc/cop.html> (2002) Powerlines and Cancer FAQs, Electromagnetic Fields and Human Health, John E. Moulder, Medical College of Wisconsin
- [41] "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields", Committee on the Possible Effects of Electromagnetic Fields on Biologic Systems – National Academy Press, Washington, D. C., 1997.
- [42] Ordinance Relating to Protection from Non-Ionizing Radiation (ONIR), 23 December 1999, Explanatory Report, SAEFL – Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape.
- [43] Portaria Nº 220, de 20 junho de 2002, FUNASA (Fundação Nacional de Saúde), Ministério da Saúde, Brasil.
- [44] Wong, P. S.; Janoska, M.A.; Light, C.; McCourt, R. W., "Long Term Magnetic Field Monitoring Near Power Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 2, pp. 922 – 927, April 1997.
- [45] Maruvada, P. S.; Turgeon A.; Goulet, D. L.; Cardinal, C. U. "A Statistical Model to Evaluate the Influence of Proximity to Transmission Lines on Residential Magnetic Fields", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 4, pp. 1322 - 1327, October, 1998.
-

- 
- [46] Guerra, L. A., "Medição dos Campos Elétrico e Magnético de Baixa Freqüência – 5 Hz a 30 KHz, - visando Segurança Pessoal", *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 1998.
- [47] Martins, V. G., "Medição de Campos Eletromagnéticos em Alta Freqüência (100 kHz a 3 GHz) gerados por Equipamentos Eletro-eletrônicos Visando Segurança Pessoal", *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 2000.
- [48] Maruvada, P. S.; Turgeon, A.; Goulet, D. L.; Cardinal, C., "An Experimental Study of Residential Magnetic Fields in the Vicinity of Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1328 – 1334, October 1998.
- [49] Kaune, W. T.; Zaffanella, L. E., "Analysis of Magnetic Fields Produced far from Electric Power Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 2082 - 2091, October, 1992.
- [50] Pettersson, P. "Principles in Transmission Line Magnetic Field Reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1587 - 1593, July, 1996.
- [51] Caires, V. G.; Rodrigues, A. O.; Porto, E. W.; Ramirez, J. A., "Caracterização de Campos Magnéticos de Linhas de Distribuição e Transmissão em Minas Gerais", *IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Natal, 19 a 22 de Novembro, 2000.
- [52] "Magnetic Fields from Electric Power Lines Theory and Comparison to Measurements", A Report of the IEEE Magnetic Fields Task Force, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 4, pp. 2127 – 2136, October 1998.
- [53] Farag A.S.; Bakhshwain J.; Cheng T.C.; Du Y., Hu L.; Zheng G.; Penn D.; Thompson J., "Distribution Lines Electromagnetic Fields: Management and Design Guidelines", in *CIGRE 2000 International Conference*, 2000, no. 36-105.
- [54] Maruvada, P. S.; Goulet, D. L., "Study of Population Exposure to Magnetic Fields due to Secondary Utilization of Transmission Line Corridors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1541 - 1548, July, 1995.
- [55] 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.
- [56] Tsanakas, D.; Filippopoulos, G., Voyatzakis, J., Kouvarakis G., "Compact and Optimum Phase Conductor Arrangement for the Reduction of Electric and Magnetic Fields of Overhead Lines", in *CIGRE 2000 International Conference*, 2000, no. 36-103.
- [57] Walling, R. A.; Paserba, J. J.; Burns, C. W., "Series-Capacitor Compensated Shield Scheme for Enhanced Mitigation of Transmission Line Magnetic Fields", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 461 - 468, January, 1993.
- [58] Yamazaki, K.; Kawamoto, T.; Fujinami, H., "Requirements for Power Line Magnetic Field Mitigation Using a Passive Loop Conductor", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 646 - 651, April, 2000.
- [59] Visacro, S.; Schroeder, M. A. O.; Souza, V. H.; Penido, A. P., "Desenvolvimento de uma Técnica para Aplicação na Redução do Campo Magnético nas Proximidades de Linhas de Transmissão de Alta Tensão". *II Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão*, Belo Horizonte, 15 a 18 de Junho, 1997.
- [60] Shperling, I. B.; Hopkins, L. M.; Fardanesh, B.; Clairmont, B.; Childs, D., "Reduction of Magnetic Fields from Transmission Lines using Passive Loops", in *CIGRE 1996 International Conference*, 1996, no. 36-103.
-

- 
- [61] Cruz P.; Izquierdo C.; Burgos M.; Ferrer L. F.; Soto F.; Llanos C.; Pacheco J.D., "Magnetic Field Mitigation in Power Lines with Passive and Active Loops", in CIGRE 2002 International Conference, 2002, no. 36-107.
- [62] Luenberger, D. G., "Linear and Nonlinear Programming", Stanford University. Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [63] Kim, S.; Kim, D.; Chang, K. N., "Using Two Successive Subgradients in the Ellipsoid Method for Nonlinear Programming", Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 82, no. 3, pp. 543 - 554, September, 1994.
- [64] Saldanha, R. R.; *Elipsoide*: programa de otimização baseado no algoritmo elipsoidal implementado no *MatLab*<sup>®</sup>, versão 4.2.
- [65] *MicroTran*<sup>®</sup> Reference Manual; Transients Analysis Program for Power and Power Electroni Circuits; Microtran Power Analysis Corporation, Published in August 1997; Vancouver, B. C., Canada.
- [66] *mtLine*<sup>™</sup> & *fdData*<sup>™</sup> Reference Manual; Transients Analysis Program for Power and Power Electroni Circuits; Microtran Power Analysis Corporation, Published in August 1992; Vancouver, B. C., Canada.
- [67] Stevenson Jr., W. D., "Elements of Power System Analysis", McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [68] "Electric Power Transmission and the Environment: Fields, Noise and Interference". Working Group 36.01 (Corona and Fields Effects), Report of Cigrè, 1991.
- [69] Silva, A. F. C.; Pasquali Filho, H. A.; Matrangolo, G.; Roamano Filho, R., "Construção de Linha de Transmissão Subterrânea em 345 kV", XII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/06, 1993, Recife, Brasil.
- [70] Granata, C. A. V., Lopes, J. C. R., Karabolad Filho, E., "Transição Direta de LT Aérea para Subterrânea, sem Subestação", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 216-219, Abril de 1995.
- [71] Sato, W., Cicarelli, L. D., Nishimura, F., Rosa Filho, P., "Compactação de LTs aéreas: uma alternativa à transmissão subterrânea", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 190-200, Abril de 1995.
- [72] Soares, C. G., "Linhas de Transmissão Subterrânea vs. Linhas Aéreas", VI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/15, 1981, Balneário de Camboriú, Brasil.
- [73] Almeida, F. H. L.; Lima, A. J. O., "Aspectos Econômicos de Dimensionamento de uma LT Subterrânea", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 118-128, Janeiro de 2000.
- [74] "Linhas de Transmissão Subterrâneas de 138 kV", *Relatório Técnico*, baseado no I Seminário de Linhas de Transmissão Subterrâneas, CEMIG, 14 a 16 de Dezembro de 1999.
- [75] Almeida, F. H. L., "Estado de Arte en Líneas de Transmisión Subterranas", SALTEE'96 – Seminário Avanzado de Lineas de Transmission de Energia Electrica, 1996, Belo Horizonte, Brasil, pp. 77 – 86.
- [76] Duarte, A. C.; Rosa, S. F., "Cabos de Transmissão Subterrânea, Tecnologia", VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/06, 4 a 8 de maio de 1986, São Paulo, Brasil.
- [77] Nishimura, F.; Dias, E. M.; Hinds, A. B.; Samico, R. A. M., "Sistema de Transmissão Subterrânea com Conexões Especiais", XI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/21, 1991, Rio de Janeiro, Brasil.
-

- 
- [78] Granata, C. A. V.; Oliveira, I. T.; Silva, W. K., “*Sistema de Monitoração de Cabos*”, XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/18, 17 a 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Brasil.
- [79] Lopes, J. C. R.; Narimatsu, T., “*Ampacidade de Cabos de Potência Isolados para Linhas de Transmissão Subterrâneas de Alta Tensão*”, VIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/05, 4 a 8 de maio de 1986, São Paulo, Brasil.
- [80] Taralli, C.; Lima, A. J. O., “*Sistema de Transmissão Subterrânea com Resfriamento Forçado*”, VII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/23, 1984, Brasília, Brasil.
- [81] Almeida J. Q. P. e outros, “*LTS Norte Miguel Reale: a Importância do Monitoramento em Tempo Real*”, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GLT/06, 21 a 26 de outubro de 2001, Campinas, Brasil.
- [82] Orton, H. E., Samm, R., “*Worldwide Underground Transmission Cable Practices*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997, pp 533 – 541.
- [83] Dawoud, M. M.; Habiballah, I. O.; Farag, A. S.; Firoz, A., “*Magnetic Field Management Techniques in Transmission Underground Cables*”, International Journal of Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 48, No. 3, pp. 91-101, January 1999.
- [84] Habiballah I. O.; Farag A.S.; Dawoud M.M.; Firoz A., “*Underground Cable Magnetic Simulation and Management Using New Design Configurations*”, International Journal of Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 45, pp. 141-148, 1998.
- [85] Schneider, P., Wada, Y., Toshida, N., Miura, I., “*Installation of the First Bulk Power 380 kV Underground Transmission Cable System in Saudi Arabia*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp 1318 – 1325.
- [86] Xu, X.B., Yang, X. M., “*Interference of Nonlinear Ferromagnetic Pipeline on Magnetic Field Produced by Power Lines*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp 644 – 649.
- [87] High Voltage Cable Standards, vol.1, Pirelli.
- [88] High Voltage Cable Standards, vol.2, Pirelli.
- [89] Hahm, Y. H., Takehana, H., Ikegaya, Y., Okuyama, S., “*Underground 161 kV Transmission Project in Des Moines, Iowa*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp 1296 – 1302.
- [90] Farag, A. S.; Dawoud, M. M.; Habiballah, I. O., “*Implementation of Shielding Principles for Magnetic Field Management of Power Cables*”, International Journal of Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 48, pp. 193-209, 1999.
-

## *Apêndice A*

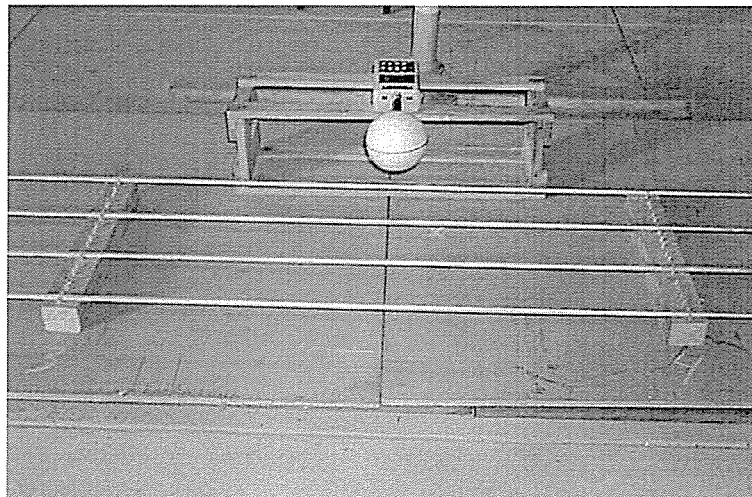
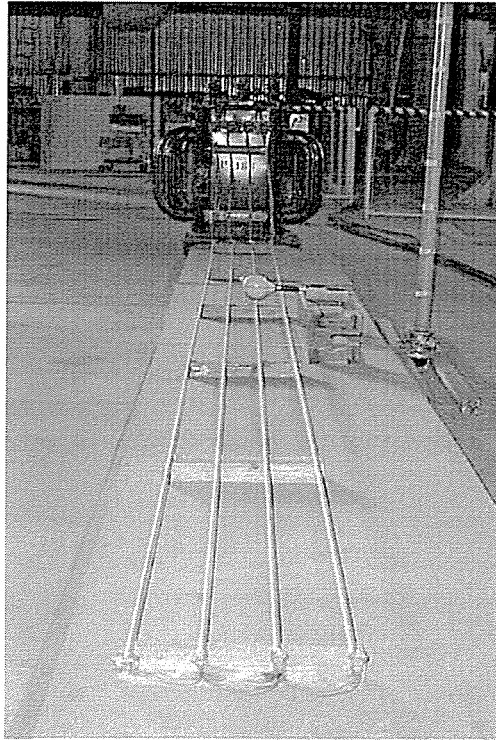


Figura a.1 – Bancada experimental construída.

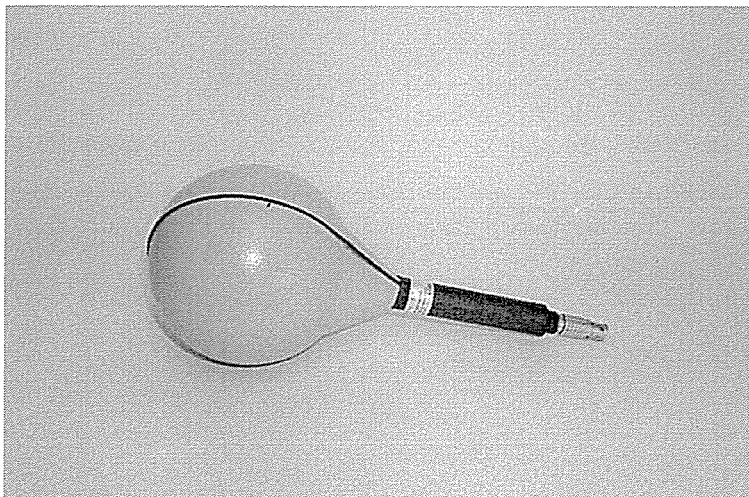
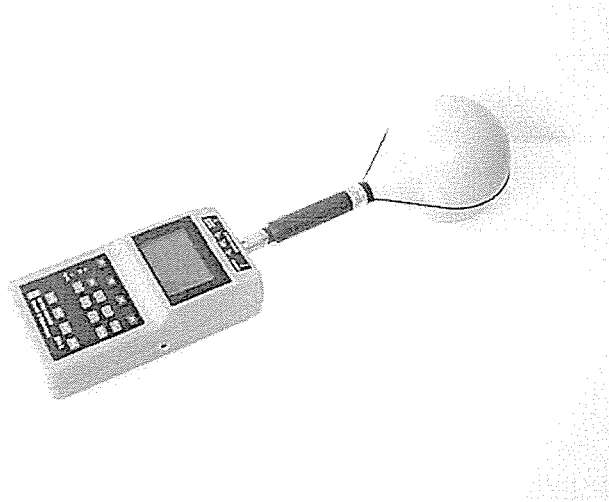


Figura a.2 – Sensor de campo magnético em baixa frequência.

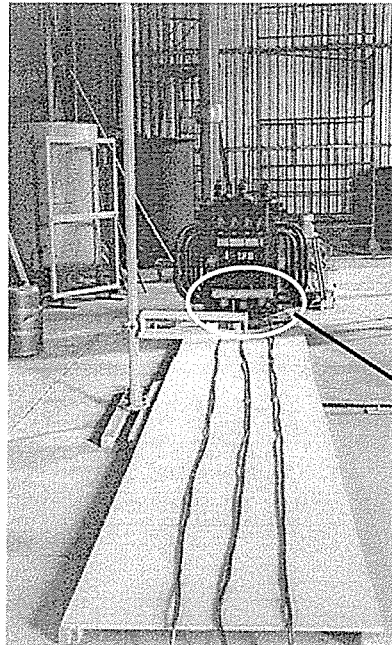
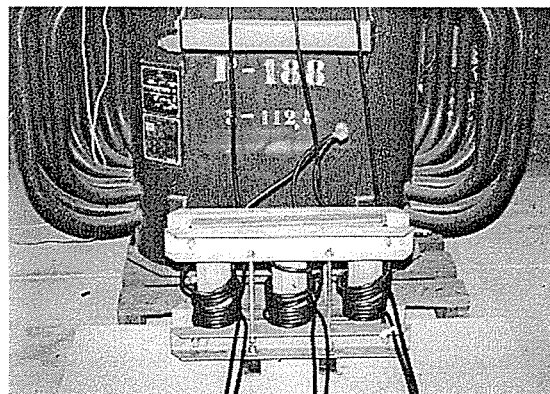


Figura a.3 (b)

(a)



(b)

Figura a.3 - Aplicação da blindagem ativa:  
(a) montagem com os sistemas principal e auxiliar;  
(b) detalhe do transformador construído.

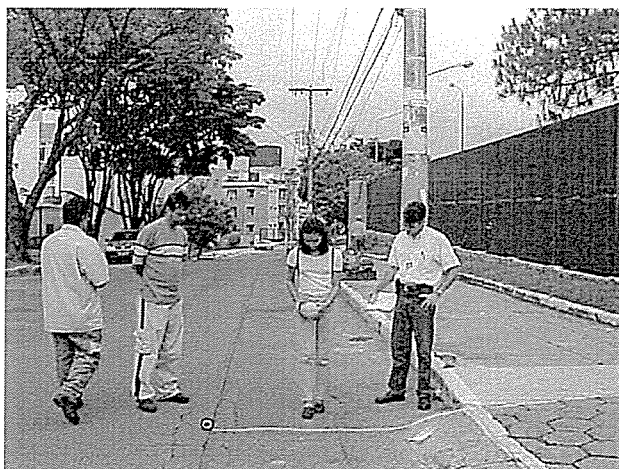
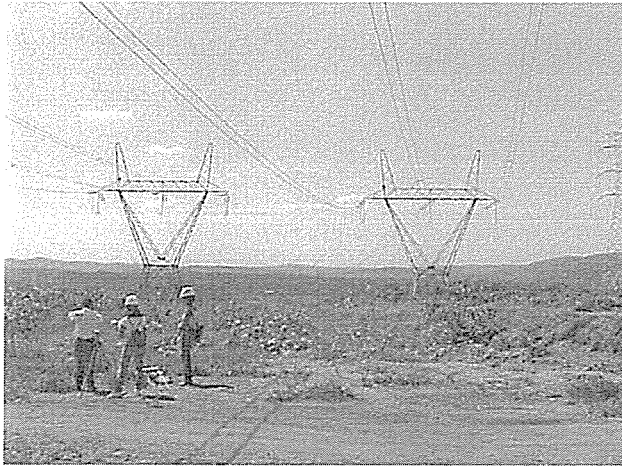
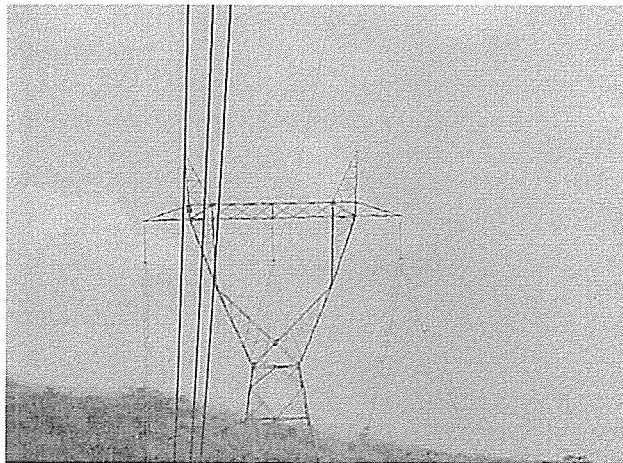


Figura a.4 – Medições em linhas de transmissão subterrâneas e subestações em Belo Horizonte.





(a)



(b)

Figura a.5 – Medições em linhas de transmissão aéreas:  
(a) 345 kV;  
(b) 500 kV.

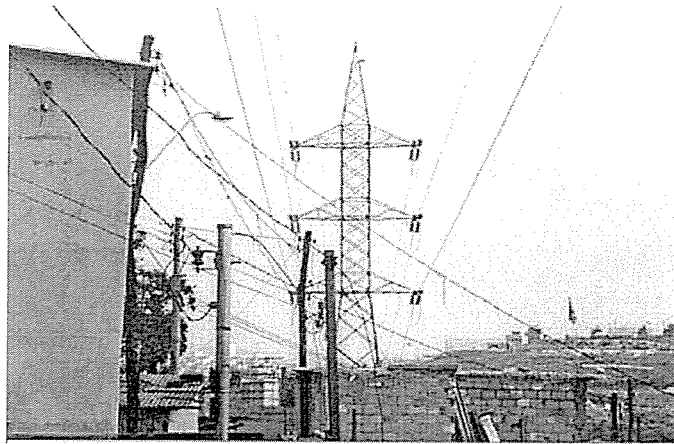


Figura a.6 – Invasão da faixa de servidão de linhas de transmissão de 138 kV em Belo Horizonte.