

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE CAMPOS  
MAGNÉTICOS NAS PROXIMIDADES DAS LINHAS DE  
TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS

RODRIGO OTÁVIO CARNEIRO MOREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N.º 701

AVALIAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE  
CAMPOS MAGNÉTICOS NAS PROXIMIDADES  
DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO  
SUBTERRÂNEAS

Rodrigo Otávio Carneiro Moreira

DATA DA DEFESA: 09/09/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

AVALIAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE CAMPOS MAGNÉTICOS NAS  
PROXIMIDADES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS

Rodrigo Otávio Carneiro Moreira

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte – MG

Setembro de 2011

## Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de arranjos geométricos de linhas de transmissão subterrâneas para reduzir a densidade de fluxo magnético em seu entorno, ainda na fase de projeto. Com a otimização da geometria, a densidade de fluxo magnético pode ser reduzida de forma eficaz sem onerar os custos da implantação da instalação, seja em material, mão de obra, sistemas auxiliares ou equipamentos. A metodologia foi confrontada com medições de campo para as situações disponíveis no sistema. São apresentadas simulações de diferentes arranjos, avaliando os resultados para cada uma das variáveis geométricas utilizadas, tais como profundidade, afastamento entre as fases, distância entre circuitos, distância do solo ao ponto de medição, disposição dos cabos, para circuito simples e circuitos duplos, considerando todos os cabos envoltos no mesmo meio.

Palavras chave – Campo magnético, densidade de fluxo magnético, linhas de transmissão subterrâneas, arranjos geométricos.

## **Abstract**

The aim of this work is to present a study of geometric arrangements of underground transmission lines to reduce the magnetic flux density around them, while in the design stage. By optimizing the geometry, the magnetic flux density can be effectively reduced without increasing the costs of the layout of the facility, either in material, labor, equipment and auxiliary systems. The calculation method is confronted with real field measurements. Different arrangements are simulated evaluating the influence of geometric variables such as depth, spacing between phases, distance between lines, distance from ground to the measuring point, single and double circuits considering all cables wrapped in the same way.

Keywords - Magnetic field, magnetic flux density, underground transmission lines, geometric arrangements.

## Agradecimentos

Ao Professor Ivan José da Silva Lopes pela persistência, orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao João Henrique Magalhães Almeida pelo apoio na medição de campo e pela incomensurável contribuição neste trabalho.

Ao Alessandro Euber Almeida pelo apoio incondicional nos serviços de medição no campo, e junto ao órgão de operação da Cemig D no agendamento de PLEs e coleta das correntes.

À Graciele Talhari Mendes de Almeida pelo apoio e suporte nas medições no interior da FIAT Automóveis.

Aos amigos e colegas da Cemig que contribuíram em diversas etapas e de diversas formas neste trabalho, em especial ao Edino Barbosa Giudice Filho e ao Sandro de Castro Assis.

Aos colegas do grupo B1 do Cigré Brasil pela disponibilidade, pela paciência, pelo fomento técnico direto e indireto e valiosas trocas de informações especialmente à Eng. Carla Damasceno Peixoto, ao Eng. Woon Jin Lee ao Eng. Aloísio José de Oliveira Lima, ao Eng. Fábio Gabriel de Oliveira, ao Eng. Júlio César Ramos Lopes, ao Eng. Eduardo Karabolad Filho e à Eng. Nádia Helena Gama Ribeiro de Louredo.

A toda minha família, meus pais, irmãos e irmã que me apoiaram e aceitaram minha ausência em momentos importantes e difíceis.

À Anna Paula minha esposa, pela paciência e compreensão ao longo do período de desenvolvimento deste trabalho.

## Sumário

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Resumo .....                                                                          | iv        |
| Abstract.....                                                                         | v         |
| Agradecimentos .....                                                                  | vi        |
| <b>1 Introdução .....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Motivação .....</b>                                                            | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Revisão Bibliográfica.....</b>                                                 | <b>5</b>  |
| <b>1.3 Objetivo.....</b>                                                              | <b>8</b>  |
| <b>1.4 Organização do Texto.....</b>                                                  | <b>9</b>  |
| <b>2. Cabos Elétricos Isolados para Alta Tensão .....</b>                             | <b>11</b> |
| <b>2.1 Características Construtivas.....</b>                                          | <b>11</b> |
| <b>2.1.1 Condutor elétrico.....</b>                                                   | <b>12</b> |
| <b>2.1.2 Blindagens .....</b>                                                         | <b>13</b> |
| <b>2.1.3 Isolação.....</b>                                                            | <b>14</b> |
| <b>2.1.4 Armadura .....</b>                                                           | <b>15</b> |
| <b>2.1.5 Cobertura ou isolação externa .....</b>                                      | <b>16</b> |
| <b>2.2 Métodos de Instalação e Disposição do Sistema de Cabos .....</b>               | <b>16</b> |
| <b>2.2.1 Disposição plana horizontal .....</b>                                        | <b>16</b> |
| <b>2.2.2 Disposição plana vertical.....</b>                                           | <b>17</b> |
| <b>2.2.3 Disposição triangular ou trifólio.....</b>                                   | <b>18</b> |
| <b>2.3 Sistemas de Aterramento de Linhas Subterrâneas de Alta Tensão.....</b>         | <b>18</b> |
| <b>2.3.1 Sistema “single-point-bonding” ou “middle-point-bonding” .....</b>           | <b>19</b> |
| <b>2.3.2 Sistema “cross-bonding”.....</b>                                             | <b>19</b> |
| <b>2.3.3 Sistema “both-ends-bonding” .....</b>                                        | <b>21</b> |
| <b>3. Campos Magnéticos de Linhas de Transmissão de Energia.....</b>                  | <b>23</b> |
| <b>3.1 Introdução .....</b>                                                           | <b>23</b> |
| <b>3.2 Metodologia do Cálculo dos Campos Magnéticos de Linhas de Transmissão.....</b> | <b>24</b> |
| <b>3.2.1 Ferramenta desenvolvida.....</b>                                             | <b>28</b> |

|       |                                                                                                            |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3   | <i>Procedimentos de Medição</i> .....                                                                      | 28 |
| 3.3.1 | Medidor de campo magnético .....                                                                           | 29 |
| 4.    | <b>Caracterização do Ambiente Eletromagnético de uma Linha de Transmissão Subterrânea de Energia</b> ..... | 32 |
| 4.1   | <i>Introdução</i> .....                                                                                    | 32 |
| 4.2   | <i>Levantamento dos Dados de Campo</i> .....                                                               | 32 |
| 4.3   | <i>Medições dos campos magnéticos</i> .....                                                                | 33 |
| 4.3.1 | Considerações sobre as medições do campo magnético .....                                                   | 35 |
| 4.4   | <i>Variáveis de Entrada</i> .....                                                                          | 35 |
| 4.5   | <i>Resultados das Medições e Cálculos</i> .....                                                            | 36 |
| 4.6   | <i>Considerações Sobre as Medições do Campo Magnético</i> .....                                            | 46 |
| 4.7   | <i>Considerações Sobre os Casos Comparativos</i> .....                                                     | 47 |
| 4.8   | <i>Análise dos Resultados</i> .....                                                                        | 47 |
| 5.    | <b>Estudo de Caso</b> .....                                                                                | 52 |
| 5.1   | <i>Introdução</i> .....                                                                                    | 52 |
| 5.2   | <i>Análise das Variáveis Geométricas</i> .....                                                             | 52 |
| 5.2.1 | Disposição dos circuitos .....                                                                             | 53 |
| 5.2.2 | Distância entre os cabos condutores (s) .....                                                              | 54 |
| 5.2.3 | Distância entre os circuitos (g).....                                                                      | 56 |
| 5.2.4 | Permutação de fases (ABC-CBA) .....                                                                        | 57 |
| 5.3   | <i>Comparações com Normas e Diretrizes</i> .....                                                           | 62 |
| 6.    | <b>Conclusões</b> .....                                                                                    | 64 |
| 6.1   | <i>Propostas de Continuidade</i> .....                                                                     | 65 |
|       | <b>Referências Bibliográficas</b> .....                                                                    | 67 |
|       | <b>Anexo - Certificados de Calibração do Equipamento de Medição</b> .....                                  | 72 |

# 1 Introdução

## 1.1 *Motivação*

A eletricidade desempenha um papel fundamental nas sociedades industrializadas, sendo essencial para a qualidade de vida e o progresso econômico das populações. A geração, o transporte, a distribuição e a utilização diária de energia elétrica pelos consumidores tornam as habitações, bem como os locais de trabalho, lugares com um ambiente eletromagnético de baixa frequência (30 Hz a 300 Hz) bastante diferente daquele natural.

À medida que as necessidades de energia aumentam, também eleva-se a capacidade de transporte das centrais geradoras para os centros de consumo, em sistemas de transmissão de energia, fazendo uso de tensões cada vez mais elevadas nas linhas de transmissão, além do aumento da potência transportada, apontando para a necessidade de se estudar os efeitos.

A exposição a campos eletromagnéticos (CEMs) é inerente ao sistema de energia elétrica, sendo que o crescimento do uso de aparelhos e equipamentos pela sociedade disseminou estas fontes de radiações eletromagnéticas não ionizantes, tornando-as parte de nosso cotidiano.

Até meados do século passado, as principais preocupações com as linhas de transmissão de energia estavam relacionadas com aspectos estéticos, e com as potenciais interferências nos sistemas de rádio e televisão. A partir dos anos 70, os CEMs produzidos pelas linhas passaram a ser motivo de preocupação de forma que as emissões de campos eletromagnéticos e seus efeitos começaram a ser estudadas, sendo levantadas questões relativas aos possíveis efeitos prejudiciais à saúde humana, tais como câncer infantil [1] - [3], leucemia infantil [4], câncer de mama [5], além de outros tipos de tumores [6] - [7], resultantes da exposição a campos eletromagnéticos de baixa frequência.

Baseando-se nos conhecimentos científicos atuais, a Comissão Internacional para a Proteção contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) [8] definiu em um guia um conjunto de limites básicos de exposição ao campo magnético para

baixas frequências, tanto para a população em geral, como para a população ocupacional (que consiste de adultos que geralmente estão expostos em condições conhecidas e são treinados para estar cientes do risco potencial e tomar precauções apropriadas). Em 1998, em sua primeira edição, o guia apresentava limites mais restritivos. Em novembro de 2010, um novo guia foi editado para a faixa de 1 a 100 kHz, definindo os limites indicados na Tabela 1 para a faixa de 25 Hz a 300 Hz.

**Tabela 1** – Limites de exposição ao campo magnético para linhas de transmissão, definidos pela ICNIRP.

| Exposição          | <i>Valor eficaz do campo magnético, H em [A m]</i> | <i>Valor eficaz do fluxo magnético, B em [<math>\mu</math>T]</i> |
|--------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| População em geral | 160                                                | 200                                                              |
| Ocupacional        | 800                                                | 1.000                                                            |

Os sistemas convencionais de transmissão de energia, compostos por linhas aéreas de transmissão e sistemas de cabos subterrâneos, podem causar impacto ao meio ambiente através de aspectos visuais ou da emissão de campos eletromagnéticos. Com o crescimento das cidades e o adensamento das cargas, esses sistemas, que antes ficavam distantes dos centros populacionais, estão hoje entre as edificações.

Nas grandes cidades, principalmente, devido às crescentes exigências ambientais por parte da população e à compatibilização com as estruturas urbanas, adotam-se as linhas de transmissão subterrâneas, que são normalmente construídas sob as vias públicas, em túneis de cabos, galerias, canaletas e bancos de dutos. Estas linhas, embora invisíveis aos olhos da população, atraindo menos sua atenção que as linhas aéreas, sujeitam as pessoas que sobre elas transitam à exposição a campos magnéticos, às vezes prolongada.

Apesar do desconhecimento quanto aos efeitos nocivos que estes campos possam causar à saúde das pessoas, alguns países europeus adotam limites bastante restritivos, se comparados às diretrizes estabelecidas pela ICNIRP, fazendo-se necessário avaliar e mitigar estes efeitos.

No que diz respeito à proteção da população contra a exposição ao campo eletromagnético, a situação não é homogênea no mundo [9] - [10]. A primeira diferenciação pode ser feita entre os países que têm instrumentos voluntários tais como orientações e recomendações, e os países que têm instrumentos obrigatórios tais como leis ou decretos.

Uma segunda divisão pode ser feita entre as nações que consideram como referência os limites definidos pelas diretrizes do ICNIRP e as que não a levam em conta. Alguns países adotam valores até mais rigorosos. Apenas a título de ilustração, os países da ex-URSS têm limites inferiores, embora alguns desses países estejam considerando novas regras para cumprir, como outros países europeus. A Federação Russa tem ainda valores mais rigorosos: 10  $\mu\text{T}$  para a população e 100  $\mu\text{T}$  para os trabalhadores (50 Hz) [11]. Na Polônia, os valores-limite são de 48  $\mu\text{T}$  para a população e 160  $\mu\text{T}$  para os trabalhadores (50 Hz) [12]. Padrões dos EUA sugerem limites maiores do que os europeus, em consonância com os limites da ANSI/IEEE: 904  $\mu\text{T}$  [13].

Outros países têm precauções adicionais. Na Suíça, por exemplo, os níveis de referência da ICNIRP são aplicados para a proteção contra efeitos adversos à saúde comprovados e devem ser respeitados em todos os locais acessíveis a pessoas. Além disso, a Suíça tem limites de emissão de precaução, os chamados valores-limite de instalação, para os locais de uso sensível (por exemplo, apartamentos, escolas, hospitais, postos de trabalho permanentes, “playgrounds” para crianças). Para as linhas de energia elétrica, estações de transformadores, subestações e vias de trens elétricos, o ILV (valor limite da instalação), é de 1  $\mu\text{T}$  [14]. Para as demais áreas, são seguidos os valores limites da ICNIRP.

A legislação italiana é baseada em uma lei de política geral (Nº. 36/2001), que estabelece os critérios gerais de proteção dos campos eletromagnéticos e define os valores-limite para a proteção da população [15]. Com tal lei, a Itália adotou uma abordagem de precaução contra possíveis efeitos a longo prazo (hipotético, mas não estabelecido) e, assim, os valores são diferentes dos estabelecidos pela União Européia. O limite italiano pode ser resumido da seguinte forma: 100  $\mu\text{T}$  nunca deve ser excedido, 10  $\mu\text{T}$  é o máximo para parques infantis, zonas residenciais, escolas e lugares onde as pessoas costumam ficar mais de 4 h. Já o nível de 3  $\mu\text{T}$  tem que ser assegurado durante o projeto de uma nova subestação.

Diferentemente do valor máximo de 100  $\mu\text{T}$ , 10 e 3  $\mu\text{T}$  são a média estatística durante um período de 24 h.

No Brasil, foi sancionada em 5 de maio de 2009 a lei N°. 11.934 [16], que estabelece limites de exposição humana aos campos eletromagnéticos, associados ao funcionamento de estações transmissoras de radio comunicação, de terminais de usuários e de sistemas de energia elétrica nas faixas de frequências até 300 GHz. De acordo com o Parágrafo Único descrito em seu Artigo 4, *“Enquanto não forem estabelecidas novas recomendações pela Organização Mundial de Saúde, serão adotados os limites da Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante - ICNIRP, recomendados pela Organização Mundial de Saúde”*. Em março de 2010, a ANEEL publicou a Resolução Normativa N°. 398 [17], que ratifica os limites da legislação e do ICNIRP que vigoravam à época, de 83,3  $\mu\text{T}$  para a população em geral e 416,67  $\mu\text{T}$  para a população ocupacional. Segundo a OMS, entende-se por população em geral os indivíduos de todas as idades e graus de saúde variáveis que, em muitos casos, não estão alertas para sua exposição ao campo elétrico e ao campo magnético, podendo estar expostos até 24 horas por dia.

A Prefeitura da cidade de São Paulo, de acordo com a Portaria N°. 80 da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente (SVMA), também estabeleceu limites iguais aos do ICNIRP para as instalações existentes, restringindo-os para as instalações futuras, no caso de permanência por período superior a 4 horas [18]. 10  $\mu\text{T}$  para instalações existentes e 3  $\mu\text{T}$  para instalações futuras.

O estabelecimento destes limites está se tornando uma questão importante para o planejamento de novos sistemas de energia, especialmente em áreas densamente povoadas. Como em cabos blindados o campo elétrico é completamente confinado no interior do cabo, as preocupações concentram-se principalmente em seu campo magnético [19].

O controle dos efeitos indiretos decorrentes da interação dos campos eletromagnéticos produzidos pelas instalações elétricas e objetos próximos sempre deve ser requisito de projeto e operação dessas instalações. Assim, o controle eficaz da densidade do fluxo magnético mantendo-a em nível inferior a um valor razoável para impedir riscos à saúde da população torna-se um problema de responsabilidade dos engenheiros e das concessionárias de energia.

Quando os limites são ultrapassados, faz-se necessária a mitigação dos campos magnéticos, que pode ser feita através de técnicas ativas e passivas. Nas técnicas ativas, há injeção intencional de corrente em um circuito, exigindo uma fonte de energia externa para sua alimentação, enquanto nas técnicas passivas são realizadas alterações de parâmetros físicos e elétricos com a utilização de materiais ferromagnéticos, condutores ou alterações geométricas, para a redução do campo magnético [20] - [27]. Dentre as técnicas passivas, a disposição geométrica dos cabos condutores apresenta vantagens por não utilizar qualquer material ou dispositivo adicional em sua construção.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo da influência de parâmetros geométricos de linhas de transmissão subterrâneas, tais como a disposição do circuito, o espaçamento entre os condutores, a distância entre os circuitos e a permutação de fases, no campo magnético resultante.

## **1.2 Revisão Bibliográfica**

A partir do final dos anos setenta iniciaram-se pesquisas quanto às consequências adversas para a saúde provocadas pela exposição a campos elétricos e magnéticos (CEM), de baixa frequência.

Em 1996, a Organização Mundial de Saúde (OMS) implantou o Projeto Internacional de Campos Eletromagnéticos para investigar os potenciais riscos para a saúde associados a tecnologias emissoras de CEM. Um Grupo de Trabalho da OMS concluiu uma resenha das implicações para a saúde dos campos de baixa frequência (OMS, 2007). Este “Fact Sheet” é fundamentado nas conclusões deste Grupo de Trabalho e atualiza recentes resenhas sobre efeitos dos CEM na saúde publicados em 2002 pela Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (IARC), estabelecida sob os auspícios da OMS, e pela ICNIRP em 2003.

Em 2002, a IARC publicou uma monografia classificando campos magnéticos de baixa frequência como “possível carcinogênico” para humanos, mas a evidência relacionada com leucemia infantil ainda não é forte o suficiente para ser considerada causal.

Enquanto as pesquisas se desenvolvem, a OMS desenvolveu recomendações internacionais de exposição para proteger trabalhadores e o público contra estes efeitos, as quais devem ser adotadas pelos responsáveis pelo desenvolvimento de políticas. Programas de proteção contra CEM devem incluir medição de exposição a fontes onde pode se esperar que a exposição exceda aos valores limites recomendados.

Dentre estas recomendações, especifica-se que o governo e a indústria devem monitorar a ciência e promover programas de pesquisa para aprofundar a redução da incerteza da evidência científica de efeitos sobre a saúde pela exposição a CEM de baixa frequência [28].

Em consonância com esta recomendação, o governo brasileiro sancionou a Lei nº 11.934 em 05 de maio de 2009 estabelecendo limites, sendo que a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 398 em 23 de maio de 2010 regulamentando tal Lei.

A preocupação com a determinação dos campos elétricos e magnéticos data do final dos anos sessenta [29], quando ainda não se dispunha de computadores eficientes para a realização de cálculos. Com a crescente utilização de linhas de alta e extra alta tensão, principalmente nos Estados Unidos e na Europa, entre os anos 70 e 90 foram desenvolvidos projetos de pesquisa que resultaram em diversas publicações definindo as características dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de energia e os procedimentos de medição e cálculos desses campos [30] - [35]. Para o tratamento específico dos campos magnéticos de linhas de transmissão subterrâneas, foram publicados trabalhos que adotavam limitações e hipóteses simplificadoras para viabilizar estas análises, como pode ser verificado em Verité [20] e Hoeffelman [36]. Estes trabalhos validam a Lei de Biot-Savart e o princípio da superposição como ferramentas para o cálculo de campos magnéticos em linhas de transmissão subterrâneas sem a presença de componentes ferromagnéticos.

Devido à preocupação acerca dos possíveis danos causados pelos campos magnéticos aos seres humanos, iniciaram-se pesquisas buscando métodos de mitigação deste campo. Estes métodos são divididos principalmente em duas grandes categorias, quais sejam: 1) proteção passiva e 2) proteção ativa. A primeira categoria é caracterizada pelo fato de não requerer fonte de energia

externa para alimentar o circuito, enquanto a segunda requer alimentação externa. Em ambos os casos, as proteções são colocadas perto da fonte e da região onde se quer reduzir o campo magnético. No que diz respeito à proteção passiva, ela pode ser dividida em duas subcategorias, quais sejam: 1) com a utilização de materiais ferromagnéticos e 2) com materiais condutores [37] - [39].

As primeiras são normalmente feitas de placas de material ferromagnético que interceptam o campo magnético, permitindo que a blindagem reduza-o na região circundante. Normalmente, estes sistemas são usados no caso de linhas de metrô, onde placas de material ferromagnético são colocadas perto da linha de alta tensão subterrânea. Como os valores do campo magnético são geralmente baixos, proteções ferromagnéticas requerem o uso de materiais caracterizados por uma alta permeabilidade magnética em baixos campos magnéticos (chamados de permeabilidade magnética inicial). As proteções passivas de material condutor são caracterizadas por folhas de material condutor, geralmente de alumínio ou de cobre, cujo princípio de funcionamento é baseado na lei de indução eletromagnética: o campo magnético produzido pelas fontes induz correntes de Foucault na superfície do material condutor, que gera um campo oposto. A fim de garantir de garantir uma boa redução de campo, é necessário que as placas que compõem a proteção sejam bem unidas entre si para garantir a continuidade elétrica da blindagem [40], [41].

Um tipo especial de blindagem condutora é representado pelos “loops” passivos. Estas blindagens são feitas de condutores elétricos (geralmente são utilizados os mesmos cabos elétricos da média e baixa tensão) conectados uns aos outros para criar circuitos fechados. O princípio do comportamento é também baseado na lei de indução eletromagnética, com a diferença que, neste caso, as correntes induzidas estão confinadas dentro dos condutores do “loop” [42], [43].

As proteções passivas são caracterizadas por correntes induzidas relativamente baixas, devido ao baixo acoplamento magnético com a fonte, e aos fatores de proteção relativamente baixos, dependendo diretamente da resistência e da reatância indutiva características dos cabos utilizados. Eles apresentam a vantagem de não exigir a presença de componentes ativos para garantir a auto-regulação da proteção de acordo com a fonte [27]. Estudos mostram que a

redução do valor da resistência do cabo do laço contribui para a redução da intensidade do campo magnético resultante de todo o sistema [44], [45].

A permutação de fases é um método que permite uma redução acentuada do campo magnético, dependendo das condições de carga dos circuitos envolvidos e das configurações adotadas [23], [46].

A profundidade do circuito, apesar de permitir o aumento da distância entre o cabo e a superfície, reduzindo o campo magnético, depende de uma série de fatores como: a potência da linha, interferências quando da construção e aumento da restrição pela componente térmica, que implica em aumento da seção transversal do cabo para uma mesma potência em menor profundidade.

Na categoria de proteção ativa, há o inconveniente da necessidade de uma fonte externa, além de um sistema dedicado e sofisticado para prover a alimentação do circuito da blindagem, acompanhando os fluxos de carga do sistema. Esta injeção de potência provoca aumento das perdas por efeito Joule. Ainda não há descrição de casos práticos de aplicação desta técnica, que se justifica quando as técnicas passivas não se mostrarem suficientes para limitar o campo magnético a um valor desejado.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada UFields, que diferencia-se das ferramentas LTCampo, desenvolvida através do P&D 106 e da ferramenta desenvolvida por [19], todas utilizando a mesma fundamentação teórica, no tocante à consideração das impedâncias mútuas dos cabos condutores em seus cálculos. A ferramenta UFields, por tratar do cálculo de valores para a condição de correntes medidas no campo, que já traz esta influência implícita nos valores apurados, não considera as impedâncias mútuas em seu cálculo, enquanto as demais tratam as correntes sem esta influência, condição mais adequada para a comparação de valores teóricos.

### **1.3 Objetivo**

O presente trabalho tem por objetivo implementar e validar uma metodologia de cálculo dos valores do campo magnético nas proximidades de uma linha de transmissão subterrânea, principalmente no ambiente sobre o solo.

Inicialmente, foram estudadas as metodologias utilizadas no cálculo do campo magnético de linhas aéreas e subterrâneas apresentadas na literatura ([27], [30]) comparando-as e avaliando sua aplicabilidade e a necessidade de adaptação. Esta metodologia foi desenvolvida utilizando-se o pacote Office Visual Basic For Application®.

Para a validação da ferramenta desenvolvida, foram realizadas medições de campo para comparação dos valores calculados com os reais, além de dois casos comparativos onde foram utilizados dados apresentados na literatura [19].

Posteriormente, foram avaliados os impactos de variações geométricas na disposição dos cabos condutores quanto à sua disposição do circuito, o espaçamento entre os condutores, a distância entre os circuitos e a permutação de fases, no campo magnético resultante.

Em suma, este trabalho tem como objetivo apresentar uma contribuição à análise dos campos magnéticos de linhas subterrâneas de transmissão e investigar formas de mitigá-los, atendendo assim às exigências normativas.

## **1.4 Organização do Texto**

Este texto é composto por seis capítulos, conforme descrito a seguir.

O segundo capítulo apresenta as características construtivas dos cabos isolados, detalhando suas camadas e a razão do emprego de cada uma delas, os materiais empregados, além das disposições físicas mais comuns e os sistemas de aterramento utilizados.

No terceiro capítulo, são apresentados a metodologia de cálculo e os procedimentos de medição dos campos magnéticos das linhas de transmissão de energia.

O quarto capítulo apresenta os trechos de linhas de transmissão subterrâneas de 138 kV onde foram realizadas as medições e os cálculos. Para a caracterização do ambiente, foram escolhidos pontos que permitissem a realização das medições com o menor grau de incerteza possível, além de locais que possibilitassem a coleta dos dados com segurança. Também são

apresentadas as comparações entre os campos magnéticos medidos e calculados, destacando-se a importância e as considerações nas variáveis de entrada adotadas nos cálculos para a correta caracterização do ambiente eletromagnético de uma LT subterrânea.

No quinto capítulo é apresentado o estudo de caso que avalia a influência na variação do campo magnético em linhas de transmissão subterrâneas diante da variação seus parâmetros geométricos.

No capítulo final, são apresentadas as conclusões alcançadas com o desenvolvimento deste trabalho e discutidas as propostas de continuidade.

## 2. Cabos Elétricos Isolados para Alta Tensão

Este capítulo apresenta as características construtivas dos cabos isolados utilizados em linhas de transmissão subterrâneas, descrevendo suas configurações mais usuais e os sistemas de aterramento mais comumente empregados.

Os cabos elétricos são utilizados em sistemas de transmissão, distribuição, instalações elétricas de baixa tensão e sistemas industriais, dentre outros, devendo ser adequados às características do sistema a que pertencem, operando em faixas bem delimitadas de tensão e potência.

### 2.1 Características Construtivas

Sob o aspecto construtivo, os cabos podem ser classificados considerando-se aspectos tais como: material do condutor (cobre ou alumínio), forma de construção do condutor (sólido, setorial, redondo, compacto, etc.) tipo de isolação elétrica, presença de blindagem e de armadura. Assim, os condutores elétricos isolados apresentam diferentes formas e tipos de fabricação, sendo cada um deles utilizado de acordo com suas características específicas [47].



**Figura 2.1** – Cabo elétrico isolado a seco. Adaptado de [48]

Em cabos navais ou marinhos, é comum a aplicação de uma armadura metálica abaixo da cobertura ou, até mesmo como camada mais externa do cabo,

tendo como principal função a proteção mecânica das camadas mais internas [49].

## **2.1.1 Condutor elétrico**

### **2.1.1.1 Metais empregados**

Os materiais normalmente utilizados como condutores elétricos são o cobre e o alumínio. A seleção do material condutor leva em conta a capacidade de condução de corrente (ampacidade), limitações de dimensões, custos e, em algumas vezes, a massa do cabo [50].

#### **Alumínio**

O alumínio puro utilizado em condutores isolados é normalmente de têmpera meio dura e de condutibilidade 61% IACS (International Annealed Copper Standard).

#### **Cobre**

O cobre deve ser eletrolítico, ou seja, refinado por eletrólise, de pureza mínima 99,9%, recozido para obter têmpera mole, de condutibilidade 100% IACS a 20°C. Somente em aplicações especiais utiliza-se o cobre de têmpera meio dura e dura.

A Tabela 1 apresenta algumas características físicas e elétricas do cobre e o alumínio.

**Tabela 1** - Características físicas do cobre e do alumínio.

| CARACTERÍSTICA                                                 | COBRE<br>RECOZIDO     | ALUMÍNIO<br>DURO      |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )                                 | 8,890                 | 2,703                 |
| Ponto de fusão (°C)                                            | 108,3                 | 652 a 657             |
| Calor específico volumétrico (J/K.m <sup>3</sup> )             | 3,45x10 <sup>6</sup>  | 2,5x10 <sup>6</sup>   |
| Coefficiente de expansão linear (°C <sup>-1</sup> a 20°C)      | 16,8x10 <sup>-6</sup> | 23,6x10 <sup>-6</sup> |
| Condutividade térmica (cal/(cm.seg.°C))                        | 0,934                 | 0,550                 |
| Carga de ruptura (Kgf/mm <sup>2</sup> )                        | 41                    | 20,3                  |
| Alongamento a ruptura (%)                                      | 25                    | 1,2                   |
| Módulo de elasticidade (Kgf/mm <sup>2</sup> )                  | 11x900                | 6x300                 |
| Resistividade elétrica ( $\Omega$ x mm <sup>2</sup> /m a 20°C) | 0,017241              | 0,028268              |
| Condutividade elétrica (% IACS a 20°C)                         | 100                   | 61                    |

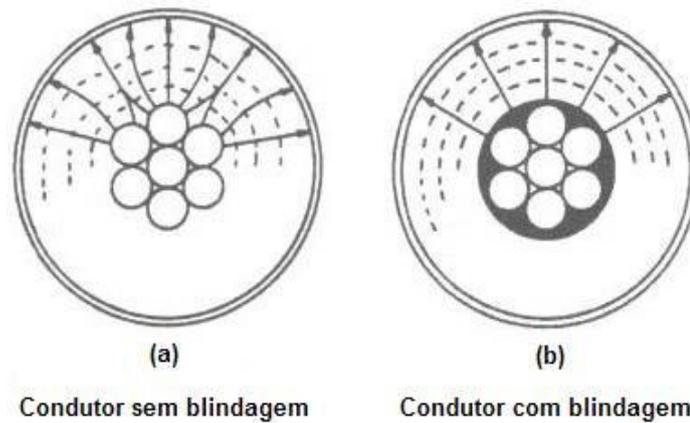
**FONTE:** [51]

## 2.1.2 Blindagens

### 2.1.2.1 Blindagens do condutor e da isolação

As blindagens do condutor e da isolação são compostas de materiais poliméricos semicondutores, tendo como finalidades: (i) eliminar vazios ionizáveis entre a isolação e a blindagem metálica, (ii) uniformizar as linhas de campo elétrico radial e longitudinal, permitindo sua forma perfeitamente cilíndrica; (iii) eliminar os gradientes de tensão em determinados pontos da isolação externa, garantindo uma sollicitação uniforme do dielétrico e aumentando a sua vida útil.

A Figura 2.2 (a) mostra um condutor encordado recoberto apenas por uma camada isolante. Com esta construção, o campo elétrico assume uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor. Assim, as sollicitações elétricas concentradas podem exceder os limites permissíveis da isolação, ocasionando a depreciação na vida útil do cabo até sua ruptura dielétrica. Com a interposição de uma camada semicondutora, o campo elétrico se torna uniforme e o problema é eliminado, como mostra a Figura 2.2 (b).



**Figura 2.2** –Efeito da blindagem do condutor. Retirado de [50]

### 2.1.2.2 Blindagem metálica

É composta por material metálico, como alumínio, liga de alumínio, cobre, liga de chumbo ou aço inoxidável, podendo ser aplicada como uma capa ou fita, com ou sem fios de cobre. É aplicada sobre a blindagem da isolação com as funções de prover: o aterramento do cabo a valores seguros; proteção mecânica do cabo quando de sua instalação; o bloqueio de líquidos e contaminantes, além de confinar o campo eletrostático no interior do cabo e fornecer um caminho de baixa impedância para escoamento das correntes induzidas e de curto-circuito [50] - [52].

### 2.1.3 Isolação

A função da isolação é isolar eletricamente o elemento condutor do meio externo. Basicamente, os isolantes mais utilizados em cabos de energia são divididos em dois grupos:

- Dielétricos laminados ou estratificados;
- Dielétricos sólidos ou extrudados.

### **2.1.3.1 Dielétricos laminados ou estratificados**

As isolações laminadas são constituídas por fitas de papel aplicadas de forma helicoidal sobre o condutor e, em seguida, impregnadas com óleo fluido sob pressão ou massa; por fim, o cabo é coberto por uma camada de chumbo ou alumínio com o objetivo de evitar a fuga do óleo e a penetração de umidade na isolação.

O papel impregnado com óleo fluido sob pressão destaca-se por ser um isolante de alta confiabilidade sendo aplicado em sistemas de alta e extra alta tensão, na faixa de 69 a 345 kV.

Esta tecnologia de isolação foi gradativamente substituída pelos cabos de dielétricos sólidos ou extrudados, não sendo mais fabricada.

### **2.1.3.2 Dielétricos sólidos ou extrudados**

Os dielétricos sólidos são materiais poliméricos colocados sobre o condutor ou sobre a blindagem do condutor, que podem ser fabricados a partir de materiais termoplásticos ou termofixos, segundo seu comportamento termomecânico. Materiais termoplásticos são polímeros de cadeia linear, fabricados à base de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE), e que amolecem com o aumento da temperatura. Materiais termofixos são polímeros tridimensionais, obtidos por vulcanização, fabricados à base de polietileno reticulado (XLPE) ou etileno-propileno (EPR), e não amolecem com o aumento da temperatura.

### **2.1.4 Armadura**

É um reforço mecânico que envolve cabos unipolares ou multipolares, com o objetivo de oferecer resistência à tração e/ou resistência radial dos cabos. Normalmente é aplicada em cabos destinados a serviços onde se deva precaver contra danos mecânicos.

### **2.1.5 Cobertura ou isolação externa**

É uma camada não metálica que tem como objetivo proteger o núcleo contra agentes que possam vir a danificá-lo, principalmente durante o lançamento do cabo, podendo também ser fabricada a partir de materiais termoplásticos ou termofixos.

## **2.2 Métodos de Instalação e Disposição do Sistema de Cabos**

Do ponto de vista do método de instalação do sistema de cabos subterrâneos, os mesmos podem ser instalados em configuração triangular ou plana horizontal ou vertical, unidos ou não, das seguintes formas:

- Diretamente enterrados;
- Em bandejas, cercados por ar;
- Em túneis ou galerias, cercados por ar;
- Em dutos, sendo os mesmos cercados por ar ou diretamente enterrados;
- Em um banco de dutos enterrado, etc.

### **2.2.1 Disposição plana horizontal**

Esta disposição é normalmente empregada em linhas de grande potência de transmissão e onde há disponibilidade para a abertura de valas mais largas. Ela permite melhor dissipação térmica dos cabos, maior facilidade para a instalação dos dutos e maior facilidade para vencer interferências quando não é possível a adoção de outra disposição. Sua desvantagem reside quando da necessidade de lançamento de dois ou mais circuitos requerendo uma vala de grande largura que, além de requerer área disponível, onera o custo das obras civis. A Figura 2.3 ilustra a disposição plana horizontal para um e dois circuitos.

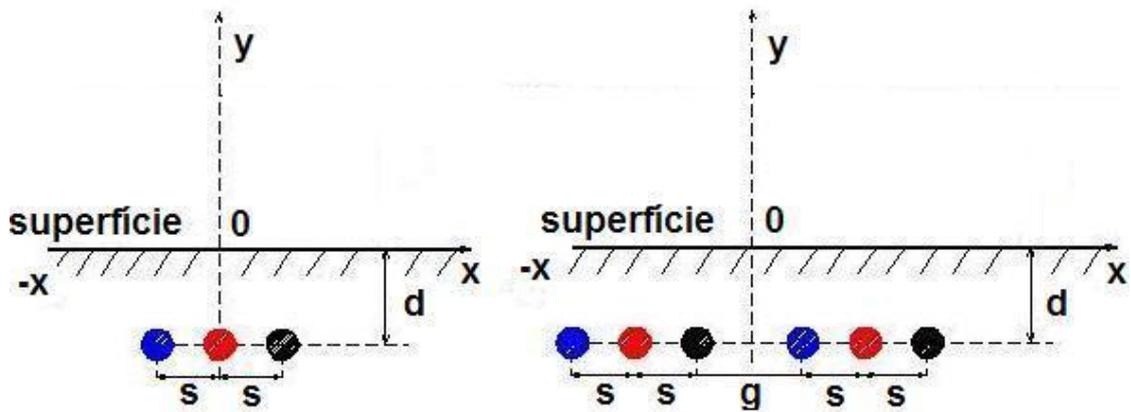


Figura 2.3 - Disposição plana horizontal para um e dois circuitos [19]

## 2.2.2 Disposição plana vertical

Esta disposição também é empregada em linhas de grande potência de transmissão, normalmente aplicada para dois ou mais circuitos. Sua maior vantagem sobre a disposição plana horizontal se dá quando da necessidade de lançamento de dois ou mais circuitos, pois necessita de uma vala mais estreita, reduzindo o espaço necessário e o custo da obra civil. Seu maior inconveniente está na necessidade de construção de valas mais profundas e na dissipação térmica dos cabos mais profundos. A Figura 2.4 ilustra a disposição plana vertical para um e dois circuitos.

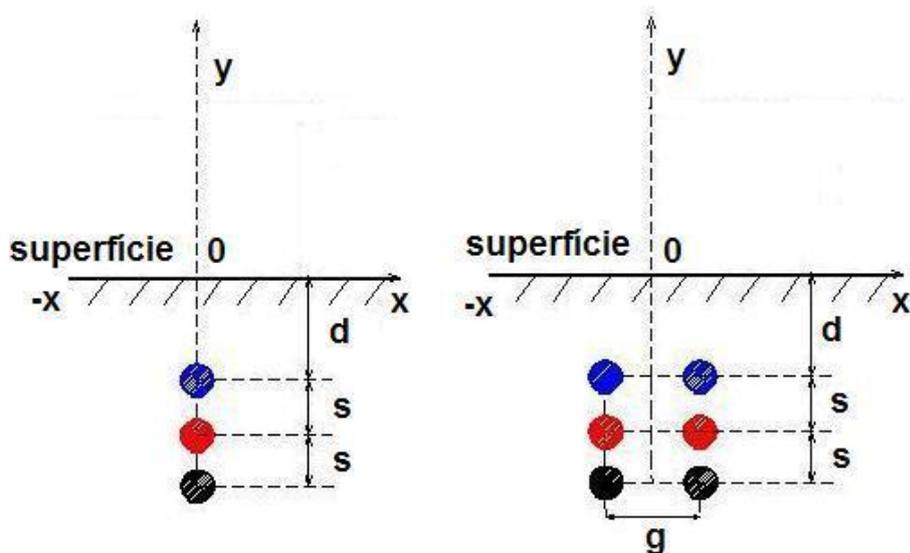


Figura 2.4 - Disposição plana vertical para um e dois circuitos [19]

### 2.2.3 Disposição triangular ou trifólio

Esta disposição é empregada comumente em linhas de baixa potência de transmissão pois oferece uma pior condição de dissipação térmica, mas permite a utilização de valas mais estreitas do que na disposição plana horizontal. A Figura 2.5 ilustra a disposição para um e dois circuitos.

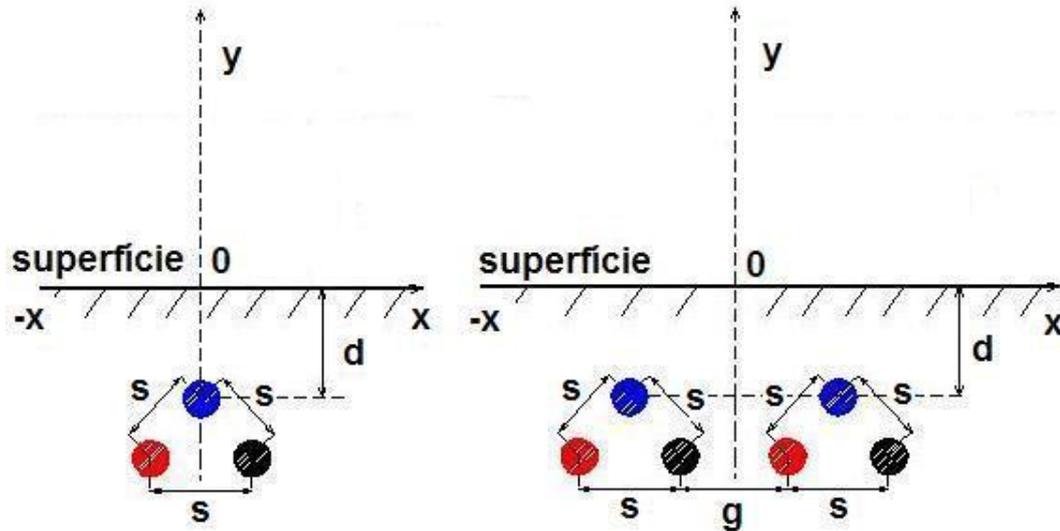


Figura 2.5 - Disposição triangular para um e dois circuitos [19]

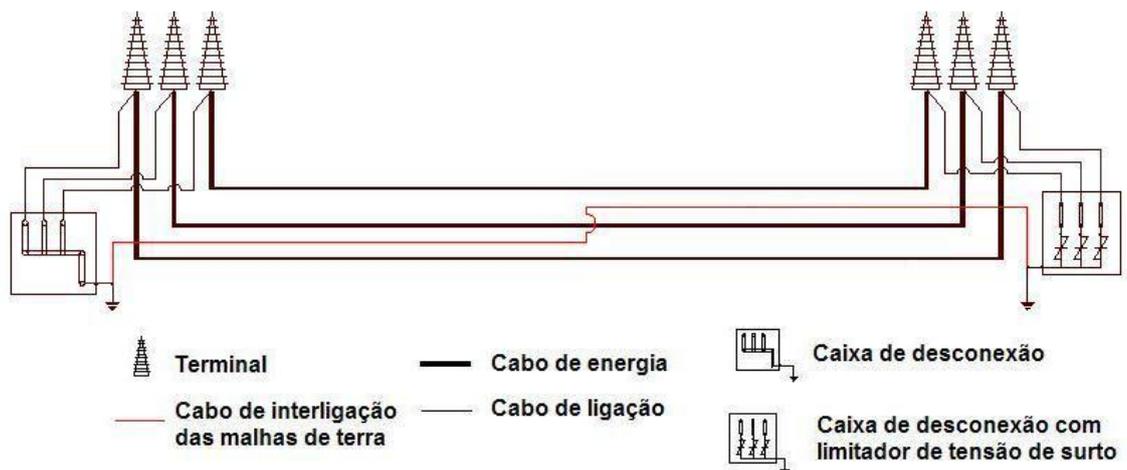
### 2.3 Sistemas de Aterramento de Linhas Subterrâneas de Alta Tensão

São três os principais sistemas de aterramento das linhas subterrâneas de alta tensão: aterramento em uma extremidade da linha (“single-point-bonding” ou “midle-point-bonding”), aterramento cruzado (“cross-bonding”) e aterramento em ambas as extremidades da linha (“both-ends-bonding”). Os sistemas de aterramento podem ser em uma ou ambas as extremidades da linha ou cruzado, e têm a finalidade de eliminar ou reduzir as correntes circulantes nas blindagens metálicas e aumentar a capacidade de transporte do cabo [19], [53] e [54].

### 2.3.1 Sistema “single-point-bonding” ou “middle-point-bonding”

Em linhas relativamente curtas, que não requerem nenhuma emenda (ou somente uma emenda) o sistema “cross-bonding” não é viável economicamente. Em tais casos as blindagens metálicas dos cabos podem ser conectadas e aterradas em um único ponto, resultando assim em uma tensão induzida na outra extremidade que deve ser limitada através dos limitadores de tensão, a um valor adequado para atender aos requisitos de segurança. Em particular, no caso de curto circuito fase-terra, a corrente não retorna pela capa metálica, mas somente pelo solo, dando origem a sobretensões na extremidade aberta. Neste caso utiliza-se um condutor terra paralelo (cabo de interligação das malhas de terra) para escoar a corrente de curto circuito.

Caso a extremidade não aterrada resulte em uma tensão induzida elevada na blindagem metálica, a mesma poderá ser reduzida a um nível aceitável aterrando-se a blindagem metálica no ponto médio da linha (“middle-point-bonding”) resultando em uma tensão na blindagem metálica igual à metade daquela com aterramento em apenas uma extremidade. A Figura 2.6 ilustra o esquema sistema de aterramento “single-point-bonding” de uma linha de transmissão subterrânea.



**Figura 2.6** – Sistema de aterramento pelo método “single-point-bonding”. Adaptado de [19]

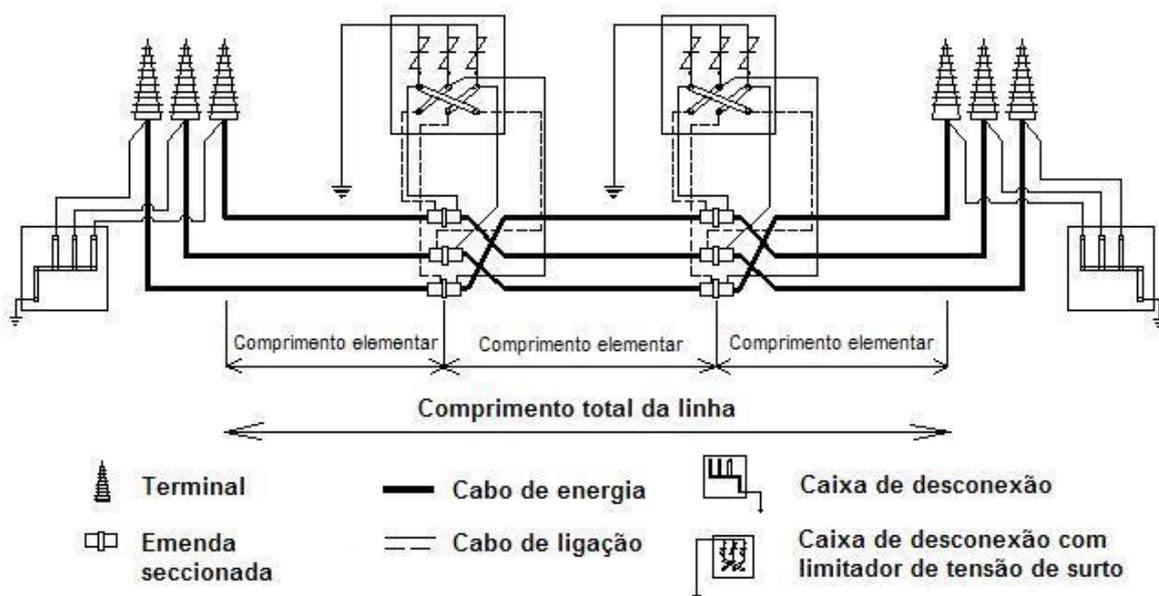
### 2.3.2 Sistema “cross-bonding”

Neste método, a extensão total da linha é dividida em um número de lances de cabos múltiplo de três. Cada lance é delimitado por emendas cuja blindagem

metálica é isolada por meio de flanges isolantes entre os dois lados da carcaça isolante da emenda de transição. As blindagens metálicas dos lances adjacentes do cabo estão isoladas entre si conforme ilustra a Figura 2.7.

Desde que os comprimentos dos lances de cabo sejam iguais e a disposição dos cabos simétrica, o vetor soma das tensões induzidas nas blindagens metálicas pelas correntes no condutor será nulo e assim não provocará a circulação de corrente através das mesmas e portanto as perdas são minimizadas.

Os cabos são, portanto, transpostos a cada posição da emenda seccionada e as blindagens metálicas são conectadas em linha reta através das caixas de desconexão com limitador de tensão de surto, ou seja, a blindagem metálica do cabo central da seção 1 conecta a blindagem metálica da blindagem central da seção 2 e assim por diante. Com este método, o vetor soma das tensões nas blindagens metálicas após três comprimentos sucessivos é igual a zero. Nas extremidades da linha, os cabos são aterrados através de caixas de desconexão, que possibilitam os testes de capa externa após a instalação dos cabos para manutenção do sistema.



**Figura 2.7** – Sistema de aterramento pelo método “cross-bonding”. Adaptado de [19]

O método “cross-bonding” é empregado em linhas de potência elevada e grande comprimento (acima de 1 km), apresentando as seguintes vantagens:

- As perdas nas blindagens metálicas são reduzidas; assim, menos potência deve ser fornecida pelo sistema;
- O aquecimento do cabo devido às perdas na blindagem metálica é reduzido, de forma que um condutor com menor seção transversal pode ser utilizado ou, alternativamente, uma corrente maior pode ser transportada por um condutor de determinada seção transversal;
- Os cabos podem ser dispostos em formação horizontal com espaçamentos relativamente grandes, melhorando assim a dissipação do calor e permitindo um acréscimo na corrente nominal. Com um sistema solidamente conectado e aterrado, os benefícios da melhoria de dissipação de calor por dispor os cabos com grandes espaçamentos, são anulados devido ao acréscimo nas correntes circulantes nas blindagens metálicas.

As desvantagens são:

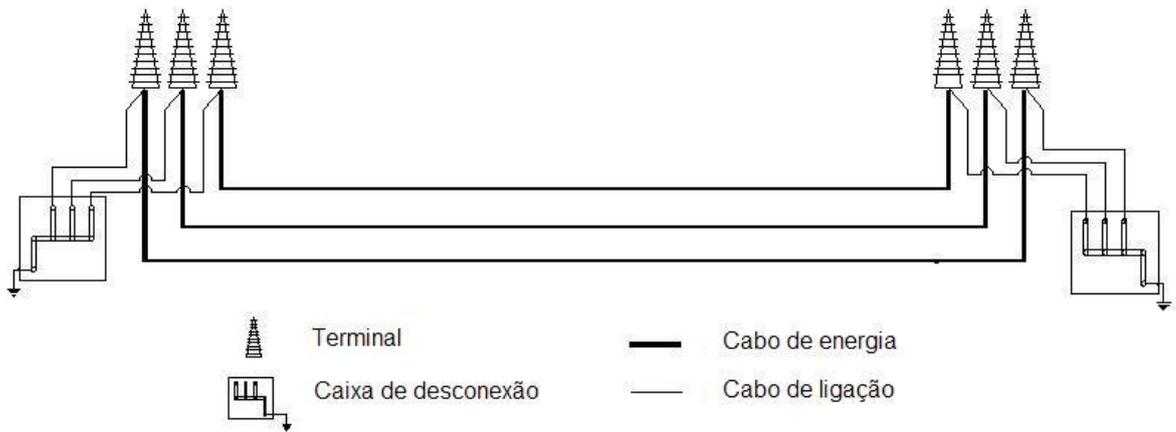
- As blindagens metálicas dos cabos devem ser continuamente isoladas uma da outra e do solo;
- São necessárias emendas com flanges isolantes entre as duas metades e as carcaças metálicas das emendas devem ser isoladas do solo;
- Há tensão elétrica nas blindagens metálicas dos cabos e na maioria das emendas. Esta tensão deve ser limitada a um valor seguro;
- Fenômenos transitórios (operações de manobra e condições de falta) podem provocar tensões elevadas através dos flanges isolantes das emendas e através da cobertura anti-corrosiva do cabo exigindo cuidados especiais para limitá-las a um nível aceitável

### **2.3.3 Sistema “both-ends-bonding”**

Este sistema é utilizado em linhas que não requeiram grande potência. As duas extremidades da linha são aterradas. As vantagens deste sistema residem na ausência de tensão elétrica residual nas blindagens metálicas, dispensando o uso de acessórios especiais e na atenuação do campo magnético, já que haverá circulação de corrente elétrica no sentido oposto ao das correntes circulantes nos condutores. Esta circulação de corrente nas blindagens proporciona uma redução

do campo magnético gerado pela linha de transmissão, quando comparado aos demais sistemas de aterramento.

As desvantagens deste sistema decorrem da necessidade de utilização de cabos de secções transversais maiores, para linhas de maior potência quando comparadas ao aterramento pelos outros 2 sistemas, além das perdas geradas. O aumento de secção decorre da necessidade de compensar o aquecimento gerado pelas perdas nas blindagens metálicas devido à circulação de corrente nas mesmas. A Figura 2.8 ilustra o esquema deste aterramento.



**Figura 2.8** – Sistema de aterramento pelo método “both-ends-bonding”. Adaptado de [19]

Neste capítulo foram apresentadas as características físicas e construtivas dos cabos isolados, as disposições físicas mais empregadas nas linhas de transmissão subterrâneas e os sistemas de aterramento utilizados.

## 3. Campos Magnéticos de Linhas de Transmissão de Energia

### 3.1 *Introdução*

Neste capítulo são abordados a metodologia de cálculo dos campos magnéticos de linhas de transmissão subterrâneas, os procedimentos de medição adotados, a ferramenta desenvolvida para os cálculos e a composição dos medidores de campo e sua teoria de operação. No capítulo seguinte, serão apresentadas comparações com medições de campo e valores calculados através de uma outra metodologia para a devida validação da ferramenta desenvolvida.

Há duas categorias de fontes de campos e ondas eletromagnéticas: as naturais, como o campo magnético da terra, que é quase permanente na faixa de 30-60  $\mu\text{T}$  dependendo da localização [55], e as ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas atmosféricas. A segunda fonte de campos e ondas eletromagnéticas refere-se àquelas criadas pelo homem, como as ondas geradas em sistemas de comunicação de dados e voz, fontes de energia e pulsos eletromagnéticos, como no caso de bombas nucleares.

Os cálculos dos campos magnéticos em linhas de transmissão subterrâneas têm como base a metodologia de simulação de cargas elétricas e a Lei de Biot-Savart, usando o princípio da superposição em um plano bidimensional apresentados em [56], que foi baseada em [30]. Para a validação da ferramenta desenvolvida, denominada UFields, foram realizadas medições de campo para a comparação dos valores calculados com os valores reais, além de dois casos comparativos, onde foram utilizados dados apresentados em [19] e realizados os cálculos para os mesmos dados.

O valor do campo magnético é dado em valor eficaz (rms), no ponto em que se tem a máxima componente fasorial, representado pela magnitude e pela direção do maior semi-eixo da elipse que define o lugar geométrico do campo no espaço.

Como a terra não é uma boa blindagem para campos magnéticos de 60 Hz, a formulação utilizada é a mesma adotada para linhas aéreas, desprezando-se as imagens. 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 linhas de transmissão subterrâneas.

### **3.2 Metodologia do Cálculo dos Campos Magnéticos de Linhas de Transmissão**

Em qualquer plano perpendicular em relação ao condutor, a densidade de fluxo magnético é dada por [56]:

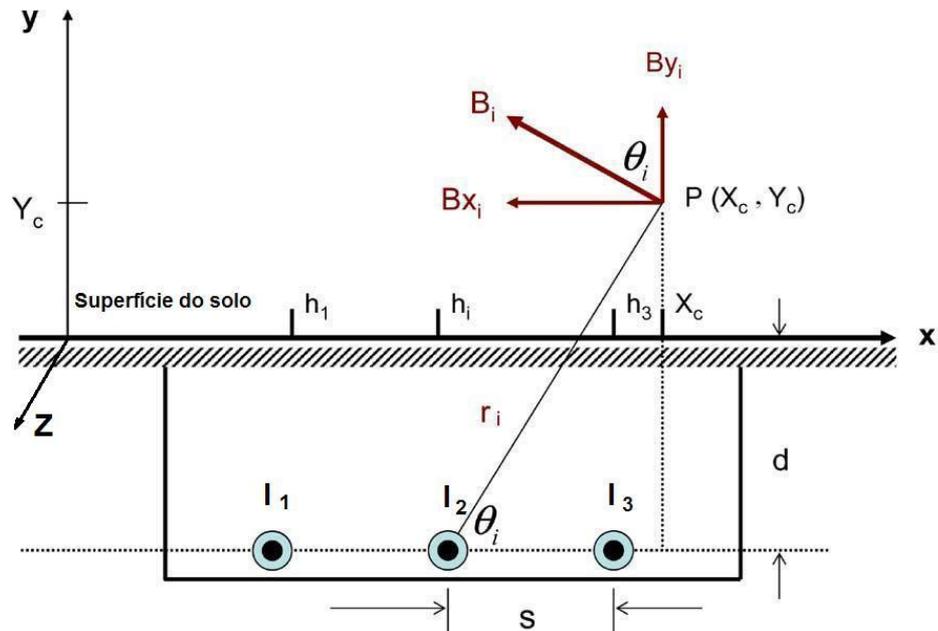
$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} . \quad (3.1)$$

Considerando a permeabilidade magnética relativa do meio ( $\mu_r$ ) igual a um, temos:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} . \quad (3.2)$$

Usando o sistema de coordenadas descrito na figura 3.1, onde o eixo Z é paralelo à linha, com os condutores enterrados a uma profundidade **d** abaixo do nível do solo e a distância entre quaisquer dois cabos vizinhos é **s**, para se determinar a densidade de fluxo magnético **B** no ponto P ( $X_c$ ,  $Y_c$ ) devido às correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  que circulam por eles, são adotadas as seguintes premissas:

- A terra não tem efeito sobre o campo magnético produzido pelos cabos;
- O campo magnético total em qualquer ponto é determinado pela superposição linear do campo magnético produzido pela corrente que flui em cada um dos condutores individuais;
- O efeito no campo magnético pelas correntes induzidas na blindagem é desprezível;
- Cada cabo é considerado infinitamente longo e reto;
- A direção das correntes através dos condutores está em sentido para fora da página.



**Figura 3.1** – Sistema subterrâneo com três cabos para cálculo do campo magnético  
(Fonte: [56])

A densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  devido à corrente  $I_i$  é:

$$\vec{B}_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_i} \vec{a}_{\varphi_i}, \quad (3.3)$$

onde  $\vec{a}_{\varphi_i}$  é o vetor unitário ao longo da direção tangente ao ponto P em um caminho circular em torno do cabo condutor com a corrente  $I_i$ .

A densidade do fluxo magnético pode ser decomposta ao longo dos eixos em dois fasores e reescrita como:

$$B_{xi} = \frac{-\mu_0 I_i}{2\pi r_i^2} (Y_c + d), \quad (3.4)$$

$$B_{yi} = \frac{-\mu_0 I_i}{2\pi r_i^2} (X_c - h_i), \quad (3.5)$$

onde

$h_i$  é a coordenada x do cabo condutor  $i$  (m);

$d$  é a profundidade do cabo à superfície do solo do cabo condutor  $i$  (m).

A magnitude  $B_\alpha$  da componente do campo ao longo da direção definida pelo ângulo  $\alpha$ , com relação à horizontal é expressa por:

$$(B_{\alpha})^2 = (B_{ry} \sin \alpha + B_{rx} \cos \alpha)^2 + (B_{iy} \sin \alpha + B_{ix} \cos \alpha)^2. \quad (3.6)$$

Para determinar os ângulos correspondentes aos campos máximo e mínimo, a derivada da expressão Equação 3.6 em relação ao ângulo  $\alpha$  é igualada a zero

$$\frac{d(B_{\alpha})^2}{d\alpha} = 0. \quad (3.7)$$

Após simplificações, a Equação 3.7 pode ser escrita como uma equação quadrática com  $\tan \alpha$  como uma variável desconhecida:

$$\begin{aligned} \tan^2 \alpha (B_{ry} \cdot B_{rx} + B_{iy} \cdot B_{ix}) + \tan \alpha (-B_{iy}^2 + B_{ix}^2 - B_{ry}^2 + B_{rx}^2) \\ - (B_{ry} \cdot B_{rx} + B_{iy} \cdot B_{ix}) = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

A Equação 3.8 tem duas soluções que correspondem ao maior e ao menor eixo da elipse. A dimensão do semi-eixo é obtida substituindo os ângulos na Equação 3.6.

Derivando-se no tempo a partir das componentes vertical (V) e horizontal (H) expressas como vetores variando instantaneamente no tempo.

$$\vec{B}_x = H \cos(\omega t + \theta) \cdot \vec{u}_x, \quad (3.9)$$

e

$$\vec{B}_y = V \cos(\omega t + \varphi) \cdot \vec{u}_y, \quad (3.10)$$

onde

$H$  é componente máxima horizontal

$$H^2 = B_{rx}^2 + B_{ix}^2;$$

$\theta$  é o ângulo de fase da componente horizontal

$$\theta = \arctan \frac{B_{ix}}{B_{rx}};$$

$V$  é a componente máxima vertical

$$V^2 = B_{ry}^2 + B_{iy}^2;$$

e  $\varphi$  é o ângulo de fase da componente vertical

$$\varphi = \arctan \frac{B_{iy}}{B_{ry}} .$$

O campo instantâneo é um vetor no espaço expresso por

$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y . \quad (3.11)$$

O quadrado da magnitude do campo instantâneo é

$$B^2 = H^2 \cos^2(\omega t + \theta) + V^2 \cos^2(\omega t + \varphi) . \quad (3.12)$$

O campo é máximo ou mínimo quando

$$\frac{dB^2}{dt} = 0 . \quad (3.13)$$

A solução da Equação 3.13 é

$$\tan(2\omega t) = \frac{H^2 \sin 2\theta + V^2 \sin 2\varphi}{H^2 \cos 2\theta + V^2 \cos 2\varphi} . \quad (3.14)$$

Se  $\omega t_1$  é uma solução da Equação 3.14, a outra solução é

$$\omega t_m = \omega t_1 + (m - 1) \pi / 2 \quad (3.15)$$

Há 4 soluções para  $m=1$  a 4. Os pares  $t_1, t_3$  e  $t_2, t_4$  correspondem a duas direções do mesmo eixo. As magnitudes dos semi-eixos são obtidas substituindo estes termos na Equação 3.12.

A densidade de fluxo magnético total dos cabos condutores no ponto P então é:

$$\vec{B} = \left( \sum_{i=1}^n B_{xi} \right) \vec{a}_x + \left( \sum_{i=1}^n B_{yi} \right) \vec{a}_y . \quad (3.16)$$

### **3.2.1 Ferramenta desenvolvida**

A metodologia apresentada no item anterior foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida no ambiente do pacote Office Visual Basic For Application<sup>®</sup>, denominada UFields.

### **3.3 Procedimentos de Medição**

As geometrias das linhas de transmissão de energia subterrâneas podem ser consideradas simplificadas quando se deseja calcular os campos magnéticos no nível do solo ou sobre ele, sendo basicamente as mesmas das linhas aéreas.

As dificuldades nas medições residem nas características intrínsecas do solo e de suas interferências ao longo do traçado das linhas, que provocam alterações nos parâmetros físicos de projeto como variações na profundidade e no afastamento entre os cabos condutores. Outros fatores que podem afetar as condições da instalação são as alterações causadas pelo envelhecimento dos materiais que compõem o cabo e por danos provocados por agentes químicos e biológicos, além de alterações causadas por intervenções ao longo do tempo, que não são registradas. Também são fatores que causam variações na coleta de dados, as interferências, principalmente as de materiais ferromagnéticos que são incorporadas ao ambiente das linhas sem identificação visível da superfície, a distâncias desconhecidas e sem registro identificável como dutos metálicos de abastecimento de água, de ramais telefônicos e de energia elétrica, dutos de gases e outros produtos, este último mais comumente em ambiente industrial. A determinação precisa dos parâmetros a serem utilizados nos cálculos pode se tornar uma tarefa difícil e até inviável, levando, na maioria das vezes, a aproximações através de valores médios ou simplificações.

As medições de campo devem ser realizadas seguindo os procedimentos estabelecidos na Norma NBR 15415 [57]. Esta norma prescreve métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos nas frequências de 50 e 60 Hz. Ela foi publicada em 2006, sendo que uma parte foi baseada na IEC 61786:1998 [31] e a outra desenvolvida em função de experiências realizadas no Brasil.

Esta norma brasileira fornece um guia para medição dos valores eficazes do estado permanente de campos elétricos e magnéticos quase estáticos que têm componentes de frequência de 50 Hz a 60 Hz. Fontes de campo quase estáticos incluem dispositivos que operam nas frequências industriais, produzindo campos nessas frequências e suas harmônicas. Os limites de magnitude abordados por esta norma são de 100 nT a 100 mT e 1 V/m a 50 kV/m para campos magnéticos e campos elétricos, respectivamente. Ela também define a terminologia, aborda critérios para estabelecimento de valores de referência, aspectos técnicos das grandezas medidas, e critérios e procedimento de medição, especificações e calibração de instrumentos e tipos de medidores.

A Norma IEC 61786:1998 fornece um guia para a medição dos valores eficazes de regime permanente de campos elétricos e magnéticos quase estáticos que têm componentes de frequência que variam de 15 Hz a 9 kHz. Essa norma identifica os requisitos de especificação de medidores de campo, indica métodos de calibração e orienta na definição de protocolos de medição dos campos elétricos e magnéticos. Para a caracterização dos campos magnéticos através de medições, deve ser realizada uma definição adequada dos procedimentos de medição. De acordo com a necessidade específica da medição, várias características dos campos, como a variação temporal, a variação espacial, as componentes de frequência, dentre outras, devem ser avaliadas para que os objetivos sejam alcançados.

Definidos os objetivos, deve ser feita a escolha adequada da instrumentação a ser utilizada. Dentre os medidores disponíveis no mercado para as medições de campo magnético de linhas de transmissão, os mais indicados são os de indução, amplamente recomendados pela literatura ([32], [33], [35]) e por normas ([31], [57]). Além disso, por serem portáteis, apresentam boa mobilidade e facilidade de manuseio.

### **3.3.1 Medidor de campo magnético**

Medidores de campos magnéticos são compostos de duas partes: a sonda ou elemento sensor de campos, e o detector, que processa o sinal do sensor e indica

o valor do campo magnético em um visor. Alguns equipamentos podem ser programados para apresentar o valor do campo resultante (*rms*) ou de pico.

A sonda ou elemento sensor, pode ser de eixo único ou de três eixos. Sensores de eixo único requerem a orientação no eixo desejado de medição. Podem ser usados para medir o valor do campo magnético máximo, através da orientação do sensor nos três eixos até que uma leitura máxima seja obtida. Também podem ser utilizados para a medição de campo resultante através da medição dos valores *rms* dos três componentes espaciais ortogonais e o cálculo com a aplicação de (3.17).

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad \text{onde} \quad (3.17)$$

Os sensores de três eixos possuem três bobinas circulares com eixos ortogonais que detectam o campo nas três direções do espaço. O campo magnético resultante é também determinado pelo detector através da Equação (3.17).

Durante as medições do campo magnético, o sensor pode ser segurado manualmente sem nenhuma perturbação significativa do campo devido à proximidade do operador.

### 3.3.1.1 Teoria de operação

O princípio de operação do medidor de campo magnético mostrado na Figura 3.2 é baseado na lei de Faraday, que prevê que uma tensão  $V$  é induzida no terminal de um laço de fio aberto colocado em um campo magnético variável. Especificamente, a tensão é igual ao valor da taxa de variação do fluxo  $\varphi$  em relação ao tempo através do laço, conforme a Equação (3.18).

$$V = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[ \int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dA \right] , \quad (3.18)$$

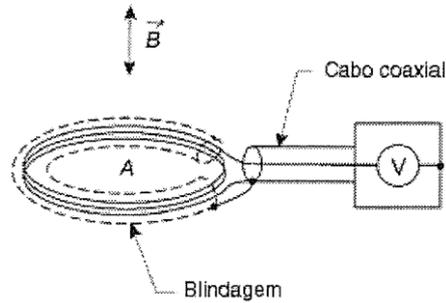
onde:  $\mathbf{B}$  é o vetor densidade de fluxo magnético;

$\mathbf{n}$  é o vetor unitário perpendicular à área do laço;

$\phi$  é o fluxo magnético

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

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



**Figura 3.2** – Princípio de funcionamento do medidor de campo magnético [57]

Se o campo magnético for livre de frequências harmônicas, como  $H = H_0 \text{sen } \omega t$  é perpendicular à área da sonda, a densidade de fluxo magnético será  $B = B_0 \text{sen } \omega t$ . Então:

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t , \quad (3.19)$$

onde a frequência angular  $\omega$  é igual a  $2\pi f$ , (sendo  $f$  a frequência) e  $B_0$  é a amplitude de campo magnético alternado, em Tesla.

Para  $N$  voltas do fio no laço, a tensão dada pela Equação (3.19) irá se desenvolver em cada volta e a tensão total será  $-N\omega B_0 A \cos \omega t$ . A Equação (3.19) mostra que a sensibilidade aumenta com a área da sonda [58].

Neste capítulo, foram abordadas características dos campos magnéticos de linhas de transmissão subterrâneas, a metodologia adotada para os cálculos destes campos, o procedimento de medição e aspectos do instrumento medidor de campo.

## 4. Caracterização do Ambiente Eletromagnético de uma Linha de Transmissão Subterrânea de Energia

### 4.1 *Introdução*

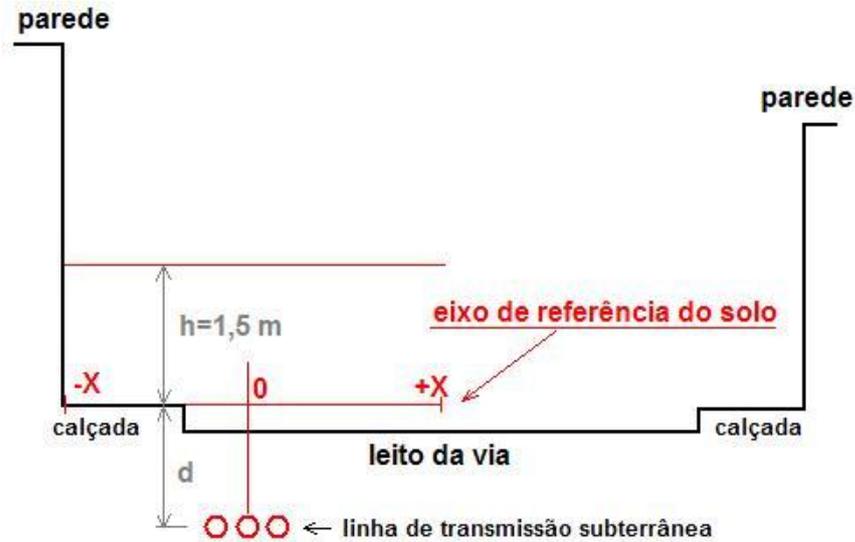
Este capítulo apresenta o procedimento adotado para a validação da ferramenta desenvolvida através da aplicação dos procedimentos de medição e cálculo abordados no capítulo anterior, com vistas ao estudo de caso que será apresentado no Capítulo 5.

Desta forma, foram selecionados pontos de algumas linhas de transmissão subterrâneas com o objetivo de contemplar as três configurações geométricas normalmente utilizadas. A metodologia apresentada no capítulo anterior foi então, utilizada na comparação dos resultados das medições, e dos resultados apresentados em [19], cujas tabelas forneceram os dados necessários aos cálculos, com os resultados obtidos pela ferramenta.

### 4.2 *Levantamento dos Dados de Campo*

A escolha dos pontos de medição foi definida através de aspectos técnicos e ambientais, buscando áreas ideais como locais de circuito retilíneo, ausência de circuitos de média tensão nas proximidades, ausência de interferência ferromagnética visível na superfície do terreno e/ou nas plantas do projeto, facilidade para a coleta de dados (trânsito de pouca intensidade tanto de veículos quanto de pessoas), superfície regular, terreno com pouca declividade, etc.

As medições foram realizadas em intervalos de 50 cm ao longo do eixo transversal à linha de transmissão subterrânea, limitando-se por um lado às paredes das edificações sobre a calçada e ao passeio do lado oposto da via. A referência de superfície do solo foi tomada considerando a altura da calçada. Para as medições realizadas na superfície, sobre o leito da via, a altura da calçada foi somada, tornando-se a referência, conforme ilustra a Figura 4.1.



**Figura 4.1** – Parâmetros para as medições

### **4.3** *Medições dos campos magnéticos*

O equipamento utilizado nas medições de campo foi um instrumento analisador de campo modelo eletromagnético EFA 300, fabricado pela “NARDA Safety Test Solutions”, calibrado, mostrado na Figura 4.2. O instrumento possui características isotrópicas, permitindo a medição dos campos através de valores eficazes nas três direções do espaço em tempo real, e é equipado com filtros seletivos, o que possibilita a medição dos campos numa faixa de frequência de 5 Hz a 32 kHz. Nas medições realizadas, foi selecionada apenas a frequência de 60 Hz. A medição foi apurada em *r.m.s.*, onde a média quadrática é calculada a partir das médias quadráticas para os três eixos de medidas (apenas em medidas isotrópicas).



**Figura 4.2** – Analisador de campo EFA 300

Conforme consta no manual de operação do equipamento utilizado [59], para as configurações escolhidas nas medições, o erro típico para a densidade de fluxo magnético é menor que  $3\% \pm 1\eta T$ , incluindo todos os erros parciais (absoluto, resposta em frequência, isotropia e desvio de temperatura).

Os dados das instalações, as características construtivas dos cabos, a disposição dos circuitos, as distâncias entre os condutores e a profundidade foram obtidos dos respectivos projetos das linhas. O sentido do fluxo de potência e os valores eficazes das correntes das fases foram informados pela área de operação da concessionária (Cemig).

A coleta dos dados de campo foi realizada seguindo os procedimentos estabelecidos na Norma NBR 15415. Esta norma prescreve métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos nas frequências de 50 e 60 Hz e determina, em seu item 8.5.3.1, que para linhas de transmissão, a medição deverá ser realizada “*no limite da faixa de segurança a uma altura de 1,5 m do solo, transversalmente ao eixo da linha, no ponto de menor distância entre o condutor fase e o solo*”. Como as linhas subterrâneas não possuem faixa de segurança, a largura adotada foi o limite físico imposto por obstáculos como paredes, muros ou cercas. As alturas adotadas foram na

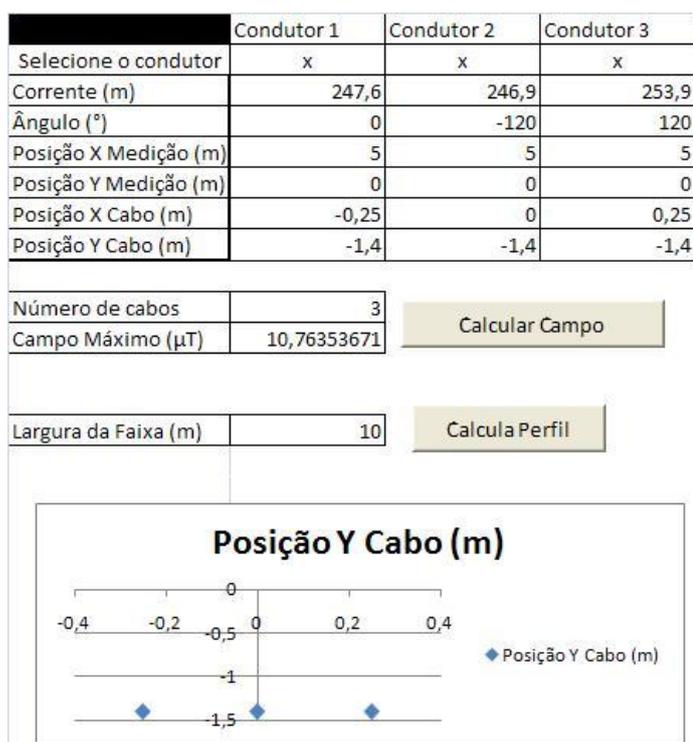
superfície e a 1,5 m da superfície na análise para validação da ferramenta e a 1,5 m da superfície para o estudo de caso.

### **4.3.1 Considerações sobre as medições do campo magnético**

Face à quantidade de parâmetros envolvidos no cálculo e no ambiente onde foram realizadas as medições de campo, foram adotadas as seguintes premissas para tornar o ambiente da ferramenta e a coleta de dados mais simplificados: o defasamento angular foi considerado ideal entre as correntes ( $120^\circ$  entre fases), fatores térmicos do cabo e do solo foram desconsiderados; devido à pequena distância entre os cabos, foram desconsideradas as correntes de retorno pela terra; como a terra não é tida como uma boa blindagem para os campos magnéticos de 60 Hz, a formulação utilizada é a mesma adotada para as linhas aéreas, desprezando-se as imagens. Além disso, foi desconsiderada a presença de materiais ferromagnéticos subterrâneos como tubulações de água e energia elétrica nas proximidades. A corrente para cada fase foi fornecida pelo centro de operação da concessionária (Cemig) e é registrada em intervalos de 15 minutos.

## **4.4 Variáveis de Entrada**

As variáveis de entrada adotadas para o procedimento de cálculo são: (i) a quantidade de cabos condutores, (ii) as correntes em cada condutor no intervalo das medições; (iii) seus ângulos considerados, (iv) a posição de medição no eixo horizontal; (v) a largura da faixa adotada do eixo considerado; (vi) no eixo vertical a altura sobre o solo ( $h$ ) e (vii) a posição dos cabos condutores em relação ao eixo da referência. Estes dados permitem estabelecer as distâncias entre os condutores e as distâncias entre cada condutor e os eixos cartesianos considerados ( $x,y$ ), além da profundidade e a altura de referência, conforme a Figura 4.3.



**Figura 4.3** – Interface da aplicação criada para a realização dos cálculos. Programa UFields.

A caracterização dos campos magnéticos foi feita com a medição da densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$ , medida em  $\mu\text{T}$ .

Devido às dificuldades em se definir datas e horários para as medições, elas foram realizadas em função da disponibilidade das instalações e das pessoas necessárias à sua realização. Os valores das correntes foram obtidos posteriormente à realização das medições junto ao órgão de operação da concessionária, que os disponibiliza em intervalos de 15 minutos. Devido à dificuldade e/ou indisponibilidade de profissionais que pudessem medir a corrente presente em cada um dos cabos da blindagem no momento das medições na linha, simultaneamente à coleta dos dados de campo, em apenas uma medição foi possível obter estes dados.

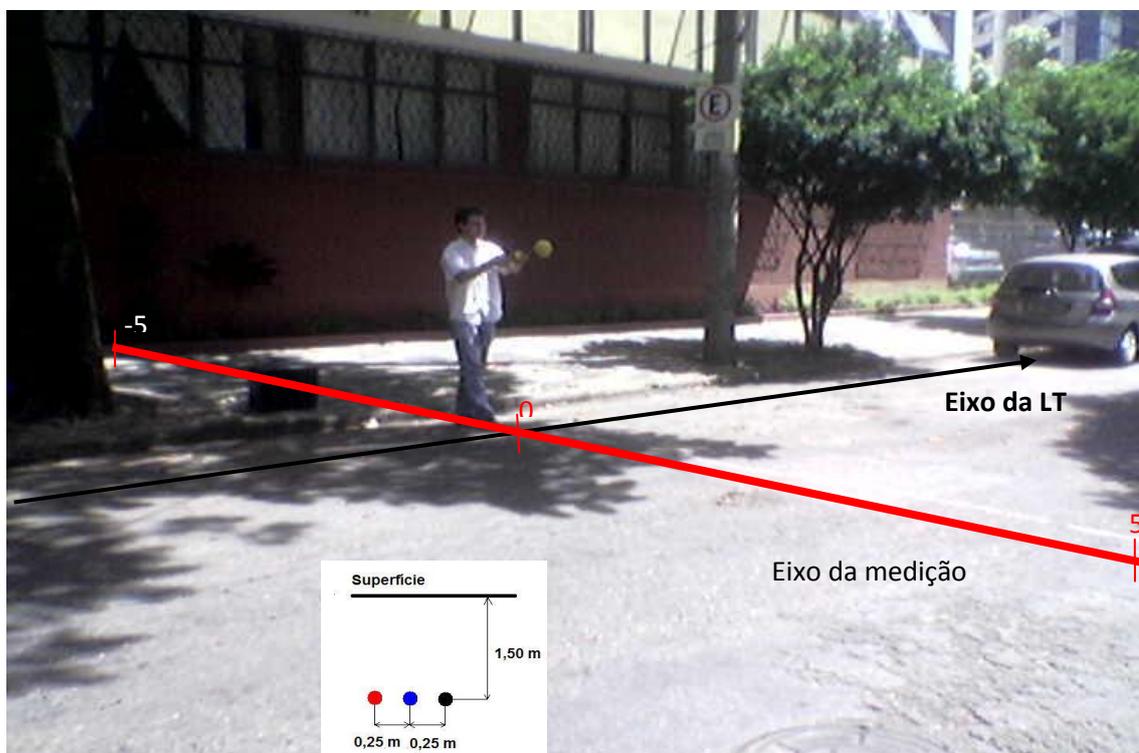
#### **4.5 Resultados das Medições e Cálculos**

Os resultados das medições, simulações e comparações são apresentados em tabelas e gráficos. Foram realizadas medições em 2 circuitos e realizadas comparações com os valores calculados. Em outros dois casos, foram

comparados os cálculos da ferramenta desenvolvida com os valores calculados pela ferramenta apresentada no em [19], que adotou uma metodologia diferente. Nas medições foram realizadas coletas de dados em intervalos de 50 cm e nos casos comparativos os dados são fornecidos a intervalo de 1 m.

### a) Caso 1

Foram feitas medições em uma linha de 138 kV, com potência nominal de 150 MVA, com cabos OF de alumínio, 550 mm<sup>2</sup> em circuito simples em disposição horizontal, aterramento “cross-bonding”. A Figura 4.4 ilustra as características geométricas da linha e o local, quando da realização da medição.



**Figura 4.4** – Fotografia do local no momento da realização da coleta de dados no campo

A Tabela 4.1 apresenta os dados da medição realizada no campo e os valores calculados para a linha do caso 1.

**Tabela 4.1 – Valores de medição e calculados para o caso 1**

| Ponto de medição | Coordenada |       | Corrente eficaz (A) |        |        | Campo magnético ( $\mu\text{T}$ ) |                 | Diferença % |
|------------------|------------|-------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------|-----------------|-------------|
|                  | x (m)      | y (m) | Fase A              | Fase B | Fase C | Valor medido                      | Valor calculado |             |
| P1               | -5,0       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,09                              | 0,81            | 26%         |
| P2               | -4,5       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,28                              | 0,98            | 23%         |
| P3               | -4,0       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,54                              | 1,15            | 25%         |
| P4               | -3,5       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,88                              | 1,45            | 23%         |
| P5               | -3,0       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,38                              | 1,88            | 21%         |
| P6               | -2,5       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 3,04                              | 2,51            | 17%         |
| P7               | -2,0       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 4,00                              | 3,45            | 14%         |
| P8               | -1,5       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 5,25                              | 4,85            | 8%          |
| P9               | -1,0       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 6,75                              | 6,22            | 8%          |
| P10              | -0,5       | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 8,29                              | 8,20            | 1%          |
| P11              | 0,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 9,03                              | 9,26            | -3%         |
| P12              | 0,5        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 8,76                              | 8,44            | 4%          |
| P13              | 1,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 7,54                              | 6,53            | 13%         |
| P14              | 1,5        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 5,81                              | 4,71            | 19%         |
| P15              | 2,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 4,12                              | 3,38            | 18%         |
| P16              | 2,5        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 3,09                              | 2,67            | 14%         |
| P17              | 3,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,33                              | 2,00            | 14%         |
| P18              | 3,5        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,82                              | 1,55            | 15%         |
| P19              | 4,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,56                              | 1,23            | 21%         |
| P20              | 4,5        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,32                              | 1,00            | 24%         |
| P21              | 5,0        | 0,0   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,12                              | 0,83            | 26%         |
| P22              | -5,0       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 0,89                              | 0,66            | 26%         |
| P23              | -4,5       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,01                              | 0,77            | 24%         |
| P24              | -4,0       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,18                              | 0,87            | 26%         |
| P25              | -3,5       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,35                              | 1,04            | 23%         |
| P26              | -3,0       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,56                              | 1,24            | 21%         |
| P27              | -2,5       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,78                              | 1,48            | 17%         |
| P28              | -2,0       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,11                              | 1,76            | 17%         |
| P29              | -1,5       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,30                              | 2,07            | 10%         |
| P30              | -1,0       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,50                              | 2,29            | 8%          |
| P31              | -0,5       | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,68                              | 2,51            | 6%          |
| P32              | 0,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,77                              | 2,63            | 5%          |
| P33              | 0,5        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,79                              | 2,55            | 9%          |
| P34              | 1,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,69                              | 2,35            | 13%         |
| P35              | 1,5        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,50                              | 2,06            | 18%         |
| P36              | 2,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 2,12                              | 1,76            | 17%         |
| P37              | 2,5        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,92                              | 1,55            | 19%         |
| P38              | 3,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,60                              | 1,31            | 18%         |
| P39              | 3,5        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,35                              | 1,10            | 19%         |
| P40              | 4,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,11                              | 0,93            | 16%         |
| P41              | 4,5        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 1,00                              | 0,79            | 21%         |
| P42              | 5,0        | 1,5   | 246,9               | 253,9  | 247,6  | 0,89                              | 0,68            | 24%         |

A Figura 4.5 ilustra a comparação entre os valores medidos e calculados para o campo magnético referente à Tabela 4.1.

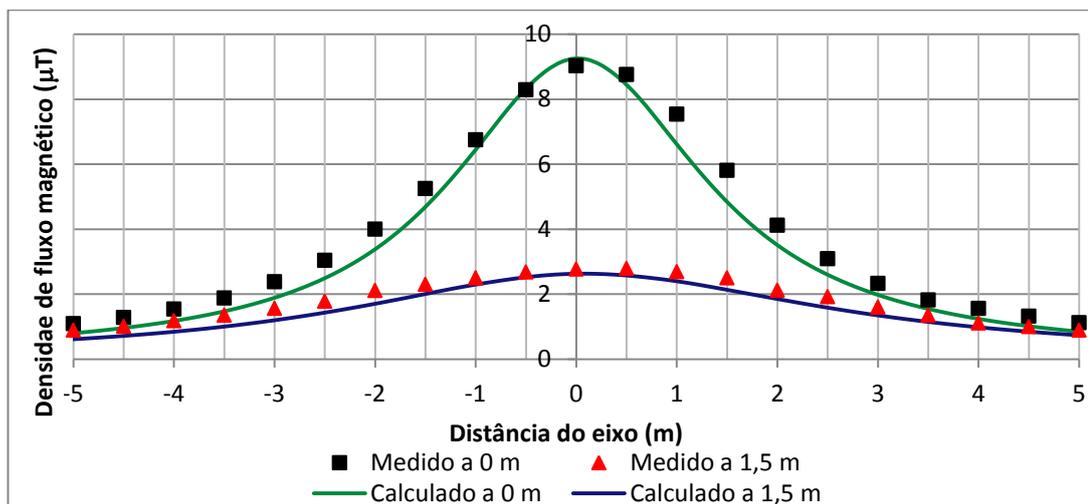
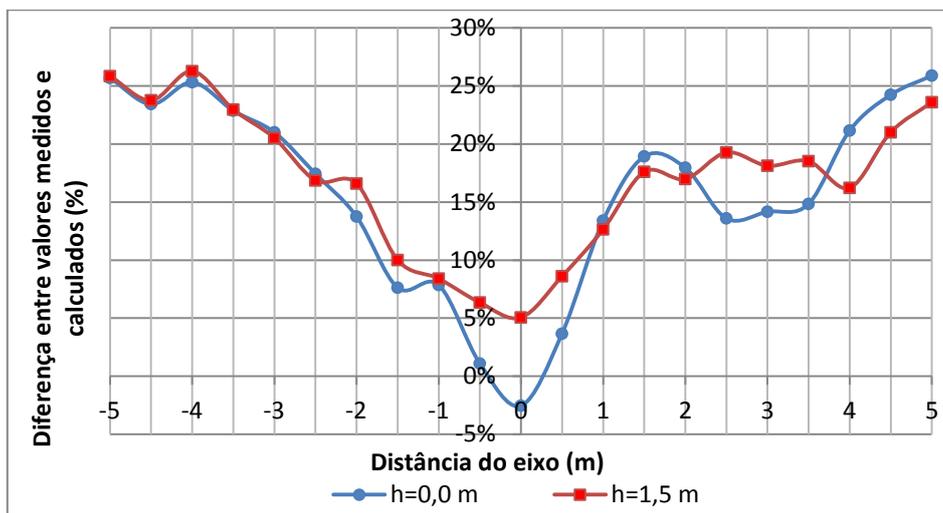


Figura 4.5 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores medidos para o caso

1

Há uma maior discordância entre os valores medidos e calculados ao longo do eixo de medição para ambos os lados, à medida que se afasta do eixo da linha de transmissão. Nas medições realizadas tanto no nível da superfície quanto a 1,5m acima, a maior diferença encontra-se nos pontos das extremidades a partir de -2,5 metros do eixo no sentido da calçada e a partir de 2,0 metros do eixo no sentido da rua. Estas diferenças podem ter sido causadas por: (i) interferências não visíveis como ramais de baixa tensão e redes de material ferromagnético como telefonia e água; (ii) diferença entre os parâmetros adotados, que são tratados como ideais, e os parâmetros reais, como defasagem entre as correntes, valores das correntes no exato momento da coleta dos dados, já que são calculadas sobre a base fornecida, cuja informação disponível as apresenta em intervalos de 15 minutos; e (iii) da existência de corrente circulante na blindagem devido à não exatidão dos lances de cabos no sistema de aterramento cross-bonding e furos na capa externa provocados por térmitas (cupins). Nesta coleta de dados no campo, não foi possível realizar a medição das correntes nas caixas link box, local onde a blindagem metálica dos cabos isolados é acessível.

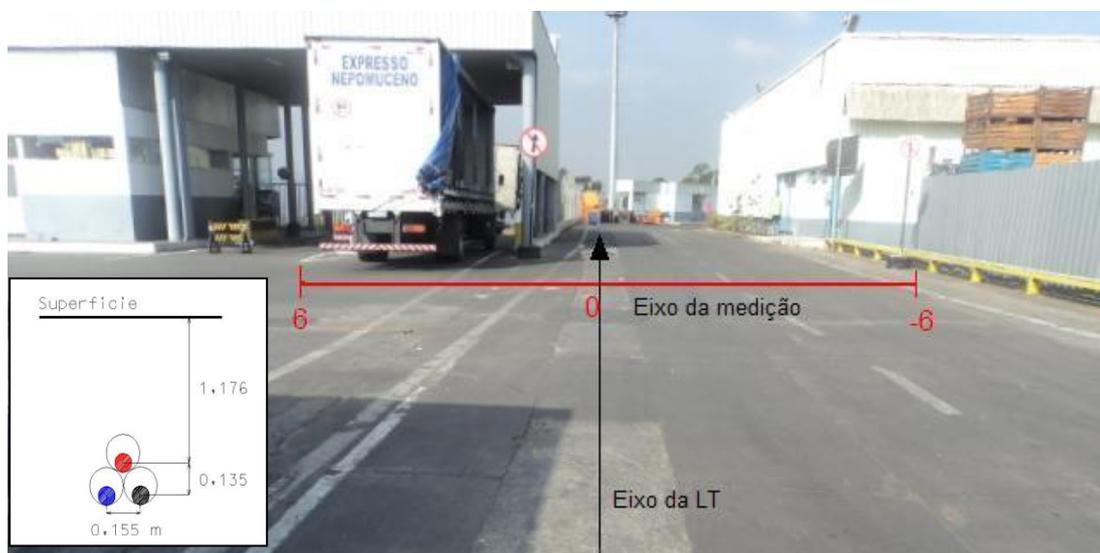
A Figura 4.6 ilustra a variação percentual entre os valores medidos e calculados para o caso 1, ao nível do solo e à altura de 1,5 m.



**Figura 4.6** – Comparação gráfica da variação percentual entre os valores calculados e os valores medidos para o caso 1

### b) Caso 2

Foram feitas medições em uma linha de 138 kV, com potência nominal de 150 MVA, com isolamento em XLPE, condutores de cobre, 500 mm<sup>2</sup> em circuito simples em disposição triangular, com aterramento “both-ends-bonding”. A Figura 4.7 ilustra as características geométricas da linha e o local da realização da medição.



**Figura 4.7** – Fotografia do local da realização da coleta de dados no campo para o caso 2

A Tabela 4.2 apresenta os dados da medição realizada no campo e os valores calculados para a linha do caso 2.

Tabela 4.2 – Valores de medição e calculados para o caso 2

| Ponto de medição | Coordenada |       | Corrente eficaz (A) |        |        | Campo magnético ( $\mu\text{T}$ ) |                 | Ponto de medição | Coordenada |       | Corrente eficaz (A) |        |        | Campo magnético ( $\mu\text{T}$ ) |                 |
|------------------|------------|-------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------|-----------------|
|                  | x (m)      | y (m) | Fase A              | Fase B | Fase C | Valor medido                      | Valor calculado |                  | x (m)      | y (m) | Fase A              | Fase B | Fase C | Valor medido                      | Valor calculado |
| P1               | -6,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,18                              | 0,29            | P26              | -6,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,22                              | 0,26            |
| P2               | -5,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,24                              | 0,33            | P27              | -5,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,26                              | 0,29            |
| P3               | -5,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,33                              | 0,80            | P28              | -5,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,30                              | 0,32            |
| P4               | -4,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,35                              | 0,45            | P29              | -4,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,36                              | 0,36            |
| P5               | -4,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,36                              | 0,51            | P30              | -4,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,41                              | 0,40            |
| P6               | -3,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,61                              | 0,61            | P31              | -3,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,46                              | 0,45            |
| P7               | -3,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,85                              | 0,77            | P32              | -3,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,52                              | 0,52            |
| P8               | -2,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 1,03                              | 0,99            | P33              | -2,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,61                              | 0,59            |
| P9               | -2,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 1,32                              | 1,31            | P34              | -2,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,70                              | 0,68            |
| P10              | -1,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 1,67                              | 1,79            | P35              | -1,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,75                              | 0,76            |
| P11              | -1,0       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 2,32                              | 2,30            | P36              | -1,0       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,77                              | 0,81            |
| P12              | -0,5       | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 3,07                              | 3,03            | P37              | -0,5       | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,77                              | 0,83            |
| P13              | 0,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 3,29                              | 3,36            | P38              | 0,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,82                              | 0,84            |
| P14              | 0,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 2,76                              | 2,80            | P39              | 0,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,76                              | 0,77            |
| P15              | 1,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 2,02                              | 1,86            | P40              | 1,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,67                              | 0,68            |
| P16              | 1,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 1,33                              | 1,17            | P41              | 1,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,57                              | 0,57            |
| P17              | 2,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,93                              | 0,77            | P42              | 2,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,47                              | 0,47            |
| P18              | 2,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,63                              | 0,58            | P43              | 2,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,37                              | 0,40            |
| P19              | 3,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,44                              | 0,42            | P44              | 3,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,30                              | 0,33            |
| P20              | 3,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,33                              | 0,32            | P45              | 3,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,25                              | 0,27            |
| P21              | 4,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,25                              | 0,25            | P46              | 4,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,20                              | 0,23            |
| P22              | 4,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,20                              | 0,21            | P47              | 4,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,16                              | 0,19            |
| P23              | 5,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,16                              | 0,17            | P48              | 5,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,14                              | 0,16            |
| P24              | 5,5        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,13                              | 0,15            | P49              | 5,5        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,12                              | 0,14            |
| P25              | 6,0        | 0,0   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,11                              | 0,13            | P50              | 6,0        | 1,5   | 197,7               | 189,8  | 195,3  | 0,09                              | 0,13            |

A Figura 4.8 ilustra a comparação entre os valores medidos e calculados para o campo magnético referente à Tabela 4.2.

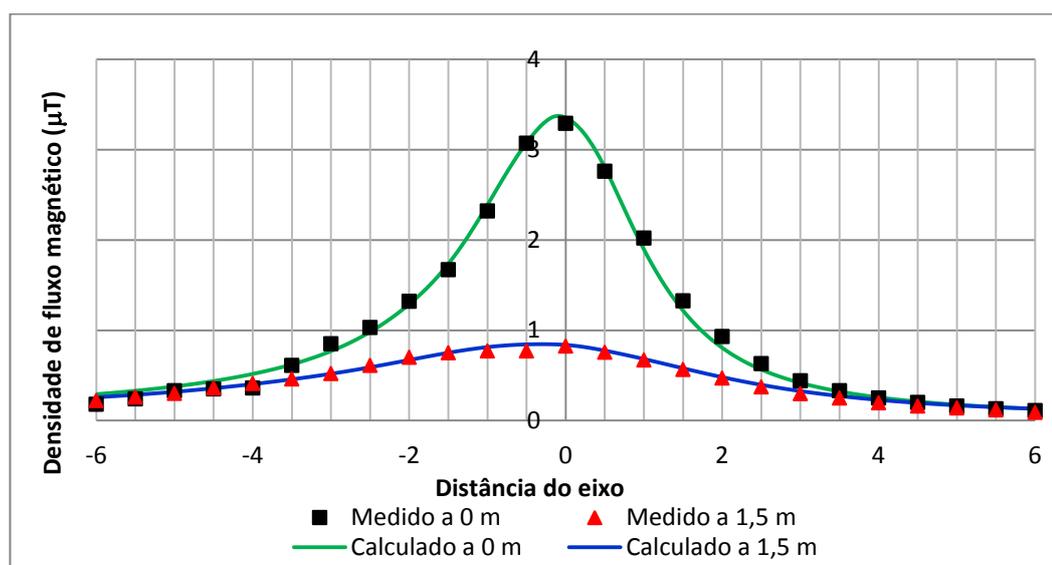
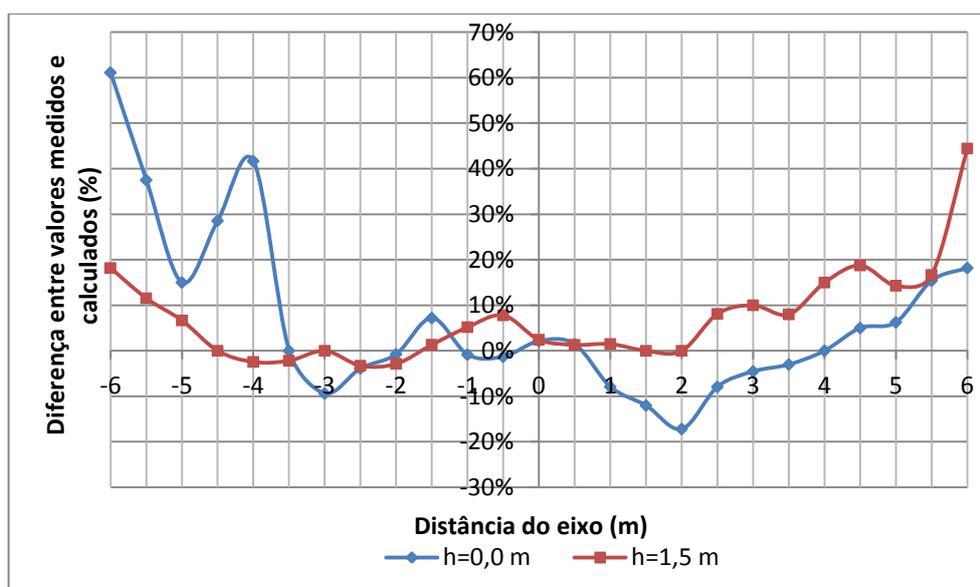


Figura 4.8 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores medidos para o caso 2

Estas medições foram realizadas no interior de uma área industrial. Assim como no caso anterior, as diferenças aumentam na medida em que o ponto de medição se afasta do eixo da linha. Estas diferenças podem ter sido causadas por interrupções frequentes na coleta dos dados quando realizadas do lado de trânsito de veículos da via, e pela proximidade à cerca metálica do lado oposto (presença de material ferromagnético), além das correntes no momento da medição, já que foram obtidas através de amperímetros instalados na baixa tensão dos transformadores da subestação da carga. Outros fatores que, podem ter influenciado na divergência entre valores medidos e calculados podem ser causados por: interferências não visíveis, como tubulações metálicas de água do sistema de combate a incêndios; diferenças entre os parâmetros adotados, que são tratados como ideais, e os parâmetros reais, como a defasagem entre as correntes e os valores das mesmas no exato momento da coleta dos dados.

As correntes circulantes nas blindagens foram apuradas em medição realizada na caixa de desconexão mais próxima do ponto de coleta de dados e consideradas nos cálculos.

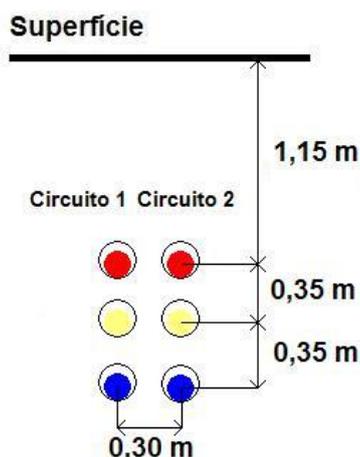
A Figura 4.9 ilustra a variação percentual entre os valores medidos e calculados para o caso 2, ao nível do solo e à altura de 1,5 m.



**Figura 4.9** – Comparação gráfica da variação percentual entre os valores calculados e os valores medidos para o caso 2

### c) Caso comparativo 1

Foram feitas simulações em uma linha de 88 kV composta por 2 circuitos instalados em disposição plana vertical, faseamento ABC-ABC com aterramento “cross-bonding” e cabos com isolamento em XLPE. A Figura 4.10 ilustra as características geométricas da linha adotada para este caso comparativo, onde foram confrontadas as metodologias.



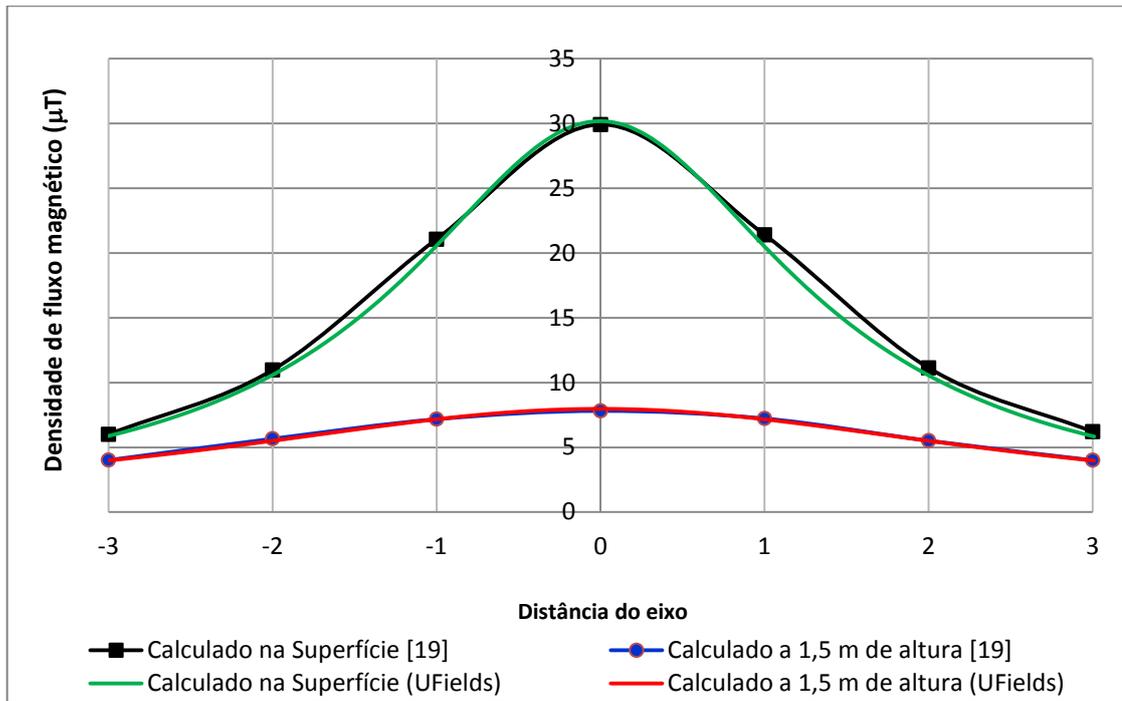
**Figura 4.10** – Características geométricas da linha

A Tabela 4.3 apresenta os valores calculados na referência [19] e pela ferramenta adotada neste trabalho.

**Tabela 4.3** – Valores de medição e calculados para o caso comparativo 1

| Ponto de medição | Coordenada |       | Corrente eficaz (A) |         |         | Corrente eficaz (A) |         |         | Campo magnético ( $\mu$ T) |                         |             |
|------------------|------------|-------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|----------------------------|-------------------------|-------------|
|                  | x (m)      | y (m) | Fase VM             | Fase BR | Fase AZ | Fase VM             | Fase BR | Fase AZ | Valor calculado [19]       | Valor calculado Ufields | Diferença % |
| P1               | 3,0        | 0,0   | 282                 | 291     | 280     | 276                 | 283     | 273     | 6,21                       | 5,83                    | 6%          |
| P2               | 2,0        | 0,0   | 282                 | 289     | 280     | 278                 | 285     | 275     | 11,13                      | 10,76                   | 3%          |
| P3               | 1,0        | 0,0   | 277                 | 282     | 271     | 273                 | 277     | 269     | 21,40                      | 19,72                   | 8%          |
| P4               | 0,0        | 0,0   | 270                 | 276     | 269     | 264                 | 270     | 260     | 29,91                      | 30,18                   | -1%         |
| P5               | -1,0       | 0,0   | 274                 | 280     | 272     | 268                 | 270     | 261     | 21,06                      | 20,31                   | 4%          |
| P6               | -2,0       | 0,0   | 275                 | 277     | 269     | 268                 | 273     | 263     | 10,97                      | 10,18                   | 7%          |
| P7               | -3,0       | 0,0   | 272                 | 274     | 270     | 270                 | 276     | 267     | 6,00                       | 5,97                    | 1%          |
| P8               | 3,0        | 1,5   | 290                 | 296     | 287     | 278                 | 284     | 276     | 4,01                       | 3,96                    | 1%          |
| P9               | 2,0        | 1,5   | 285                 | 293     | 282     | 278                 | 287     | 276     | 5,52                       | 5,55                    | -1%         |
| P10              | 1,0        | 1,5   | 287                 | 288     | 281     | 276                 | 282     | 274     | 7,23                       | 7,08                    | 2%          |
| P11              | 0,0        | 1,5   | 284                 | 291     | 284     | 278                 | 286     | 275     | 7,82                       | 7,97                    | -2%         |
| P12              | -1,0       | 1,5   | 282                 | 287     | 277     | 278                 | 285     | 275     | 7,18                       | 7,14                    | 1%          |
| P13              | -2,0       | 1,5   | 287                 | 290     | 282     | 282                 | 289     | 279     | 5,67                       | 5,40                    | 5%          |
| P14              | -3,0       | 1,5   | 283                 | 292     | 282     | 281                 | 286     | 276     | 4,02                       | 4,02                    | 0%          |

A Figura 4.11 ilustra a comparação entre os valores calculados pela referência [19] e pela ferramenta adotada, para o campo magnético referente à Tabela 4.3.

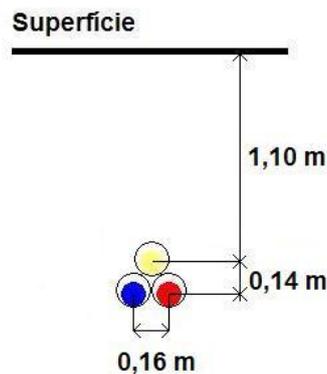


**Figura 4.11** – Comparação gráfica entre valores calculados e valores medidos para o caso comparativo 1

A comparação realizada entre as ferramentas neste caso, permite concluir que a ferramenta desenvolvida (UFields) apresenta boa confiabilidade com diferenças que variam de 1% e 2% em relação aos valores calculados pela referência no centro do eixo.

#### d) Caso comparativo 2

Foram realizadas comparações entre os valores calculados por [19] para uma linha na tensão de 88 kV, circuito simples em disposição triangular, com aterramento cross-bonding e isolamento em XLPE. A Figura 4.12 ilustra as características geométricas da linha adotada para este caso comparativo.

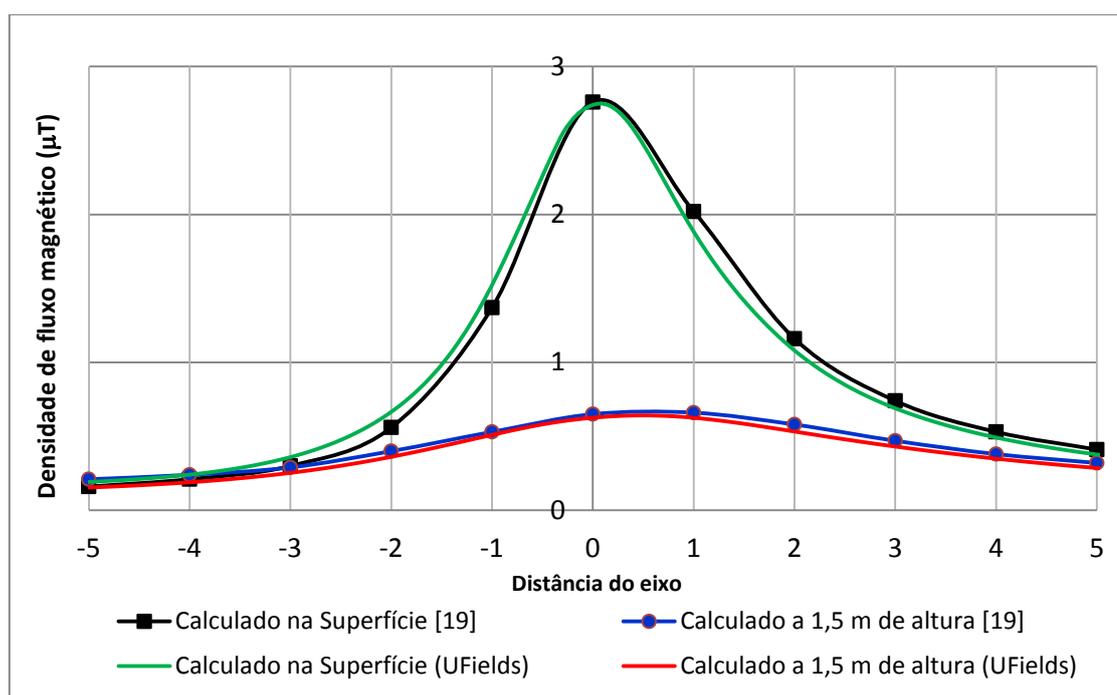


**Figura 4.12** – Características geométricas da linha

A Tabela 4.4 apresenta os valores calculados na referência [19] e pela ferramenta adotada neste trabalho para o caso comparativo 2.

**Tabela 4.4** – Valores de medição e calculados para o caso comparativo 2

| Ponto de medição | Coordenada |       | Corrente eficaz (A) |         |         | Campo magnético ( $\mu\text{T}$ ) |                         |             |
|------------------|------------|-------|---------------------|---------|---------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|
|                  | x (m)      | y (m) | Fase VM             | Fase BR | Fase AZ | Valor calculado [19]              | Valor calculado Ufields | Diferença % |
| P1               | 5,0        | 0,0   | 106                 | 103     | 98      | 0,41                              | 0,37                    | 10%         |
| P2               | 4,0        | 0,0   | 105                 | 100     | 96      | 0,53                              | 0,49                    | 8%          |
| P3               | 3,0        | 0,0   | 104                 | 100     | 96      | 0,74                              | 0,70                    | 5%          |
| P4               | 2,0        | 0,0   | 104                 | 99      | 95      | 1,16                              | 1,05                    | 9%          |
| P5               | 1,0        | 0,0   | 102                 | 98      | 95      | 2,02                              | 1,87                    | 7%          |
| P6               | 0,0        | 0,0   | 103                 | 98      | 95      | 2,76                              | 2,73                    | 1%          |
| P7               | -1,0       | 0,0   | 103                 | 98      | 94      | 1,37                              | 1,60                    | -17%        |
| P8               | -2,0       | 0,0   | 101                 | 97      | 93      | 0,56                              | 0,67                    | -20%        |
| P9               | -3,0       | 0,0   | 100                 | 96      | 93      | 0,30                              | 0,36                    | -20%        |
| P10              | -4,0       | 0,0   | 99                  | 95      | 92      | 0,21                              | 0,23                    | -10%        |
| P11              | -5,0       | 0,0   | 99                  | 95      | 92      | 0,16                              | 0,19                    | -19%        |
| P12              | 5,0        | 1,5   | 98                  | 93      | 91      | 0,32                              | 0,28                    | 12%         |
| P13              | 4,0        | 1,5   | 98                  | 93      | 91      | 0,38                              | 0,35                    | 8%          |
| P14              | 3,0        | 1,5   | 98                  | 93      | 91      | 0,47                              | 0,43                    | 8%          |
| P15              | 2,0        | 1,5   | 98                  | 93      | 91      | 0,58                              | 0,53                    | 9%          |
| P16              | 1,0        | 1,5   | 98                  | 94      | 91      | 0,66                              | 0,62                    | 5%          |
| P17              | 0,0        | 1,5   | 98                  | 94      | 91      | 0,65                              | 0,62                    | 4%          |
| P18              | -1,0       | 1,5   | 98                  | 94      | 91      | 0,53                              | 0,52                    | 2%          |
| P19              | -2,0       | 1,5   | 98                  | 94      | 90      | 0,40                              | 0,36                    | 9%          |
| P20              | -3,0       | 1,5   | 98                  | 94      | 90      | 0,29                              | 0,25                    | 13%         |
| P21              | -4,0       | 1,5   | 98                  | 94      | 90      | 0,24                              | 0,19                    | 23%         |
| P22              | -5,0       | 1,5   | 98                  | 94      | 90      | 0,21                              | 0,15                    | 28%         |



**Figura 4.13** – Comparação gráfica entre valores calculados e valores medidos para o caso comparativo 2

Na comparação realizada entre as ferramentas para o caso comparativo 2, observa-se que os perfis apresentam características semelhantes com discrepâncias de 1% e 4% nos valores no eixo da linha para os cálculos na superfície e a 1,5 m de altura respectivamente, o que permite concluir que a ferramenta desenvolvida apresenta boa confiabilidade. As diferenças para distâncias mais afastadas do eixo decorrem principalmente da diferença nas ferramentas quanto à entrada de dados. A ferramenta UFields calcula a partir de uma única entrada de dados de correntes, que no caso foram adotadas as correntes para as coordenadas do eixo, ao passo que a outra ferramenta calcula para correntes instantâneas e há variações ao longo das medições.

#### **4.6 Considerações Sobre as Medições do Campo Magnético**

Há de se tecer algumas considerações com relação às medições e simulações realizadas.

No desenvolvimento deste trabalho, as diferenças apuradas entre os valores medidos e calculados são decorrentes de fatores como: a falta de ferramentas e documentos que pudessem fornecer a exata posição do eixo das linhas de transmissão subterrâneas, tanto em relação à profundidade no ponto, quanto à situação em relação às referências localizadas na superfície; o trânsito das vias, que causam interrupções, às vezes frequentes, descontinuando a coleta; a distância exata entre os cabos nos trechos medidos, a presença de materiais ferromagnéticos enterrados sob o solo no eixo das medições, como redes de abastecimento de água e tubulações de ramais subterrâneos de energia elétrica; as correntes circulantes na blindagem dos cabos com sistema de aterramento *cross-bonding*, já que os lances apresentam trechos com pequenas diferenças de comprimento além da presença de furos na capa externa causados por térmitas (cupins), e cujas correntes não foram medidas; a influência dos campos criados pelas redes de baixa e média tensões de distribuição localizadas no limite das calçadas e cruzando as vias; o desconhecimento quanto à correta defasagem entre as correntes nas três fases dos cabos no momento da medição, que são

tratadas como idéias, defasadas de exatos  $120^\circ$ . Há também certa imprecisão nas correntes fornecidas pelo órgão de operação da concessionária, já que apesar de serem registradas continuamente, são fornecidas a intervalos de 15 minutos e obtidas através de equipamento (TC) com grau de precisão variável. Estas imprecisões tornam-se relevantes face às pequenas distâncias consideradas entre os cabos

Em todas as medições, as informações acerca da profundidade de instalação dos cabos foram obtidas através da documentação de projeto das instalações, que não fornecem valores exatos, mas aproximados. A imprecisão na profundidade influencia significativamente os valores calculados já que o valor do campo magnético é muito influenciado pela distância.

No primeiro caso, trata-se de uma instalação construída no início dos anos oitenta e seus desenhos estão em nanquim sobre papel vegetal, não permitindo acuidade na verificação da escala.

No segundo caso, por tratar-se de instalação recente com maior precisão dos dados de projeto, e da realização da medição da corrente circulante na blindagem, pode-se auferir resultados mais próximos entre os valores medidos e calculados

Pode-se concluir que os valores calculados são próximos dos valores medidos em campo, validando a ferramenta para as análises destes arranjos.

#### **4.7      *Considerações Sobre os Casos Comparativos***

Nas comparações, observa-se uma boa concordância para os valores calculados por ambas metodologias, exceto nos pontos intermediários, onde a diferenças podem ser decorrentes da diferença metodológica adotada em cada uma das ferramentas.

#### **4.8      *Análise dos Resultados***

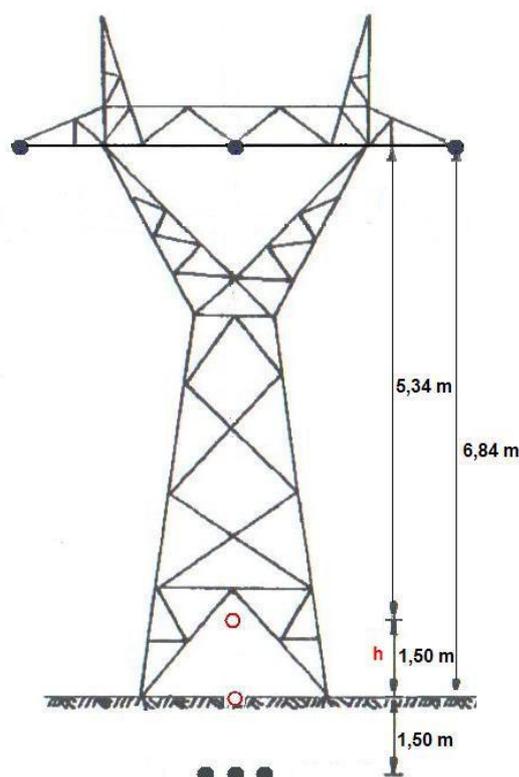
Apesar das instalações de linhas de transmissão subterrânea adotarem distâncias bastante reduzidas entre os condutores (geralmente inferiores a 0,8 m),

em relação às linhas aéreas (acima de 3,0 m para 138 kV), o que levaria à geração de campos magnéticos menores para as mesmas condições de carga, ou seja, para a mesma corrente, isto nem sempre se verifica, conforme apresentado nas Figuras 4.15 e 4.16. Os campos magnéticos dependerão da distância considerada entre os cabos de cada circuito e o ponto de medição.

Nas linhas de transmissão subterrâneas a instalação dos cabos é realizada à profundidade de aproximadamente 1,5 m da superfície e na linha aérea a altura mínima de norma (NBR 5422) [60] é de 6,84 m acima da superfície para 138 kV. Assim, para medições sob os critérios da NBR 15415, a 1,5 m acima do solo, o cabo mais superficial da linha subterrânea estará a 3,0 m do ponto de medição enquanto o cabo da linha aérea mais próxima deste ponto estará a 5,34 m, conforme ilustra a Figura 4.14.

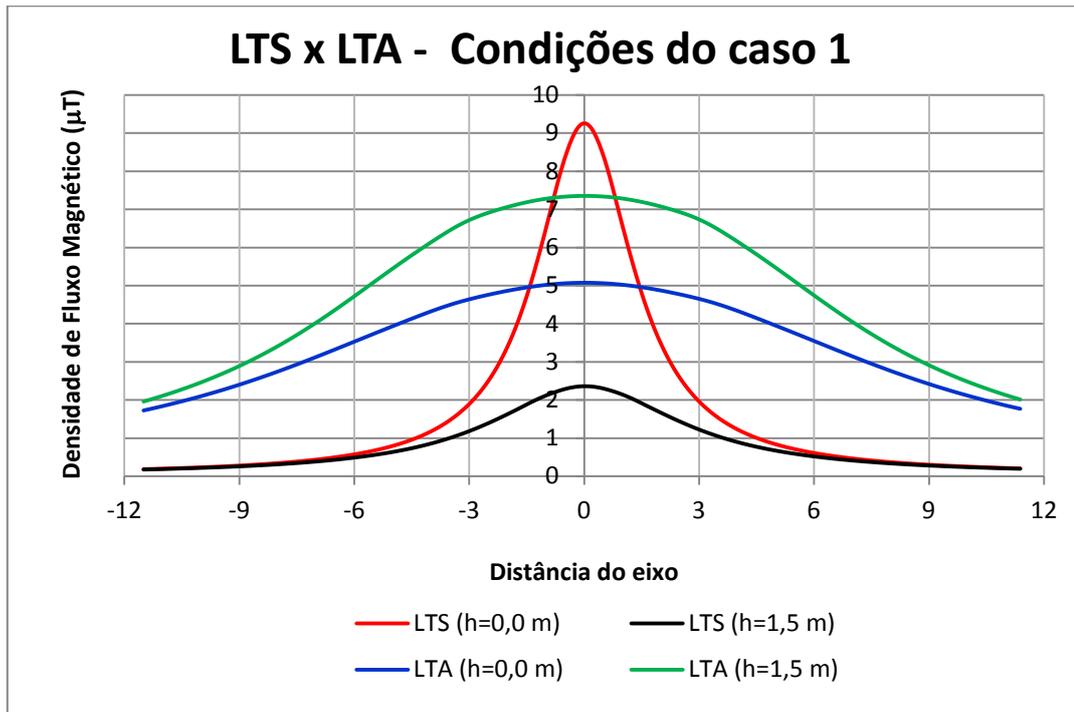
**Tabela 4.5** – Menor distância entre o ponto de medição e o cabo mais próximo deste ponto para linhas de 138 kV

| Ponto de medição | Distância entre o cabo mais próximo e o ponto de medição no eixo da linha (m) |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                  | p/ h=0,0 m                                                                    | p/ h=1,5 m |
| Aérea            | 6,84                                                                          | 5,34       |
| Subterrânea      | 1,50                                                                          | 3,00       |



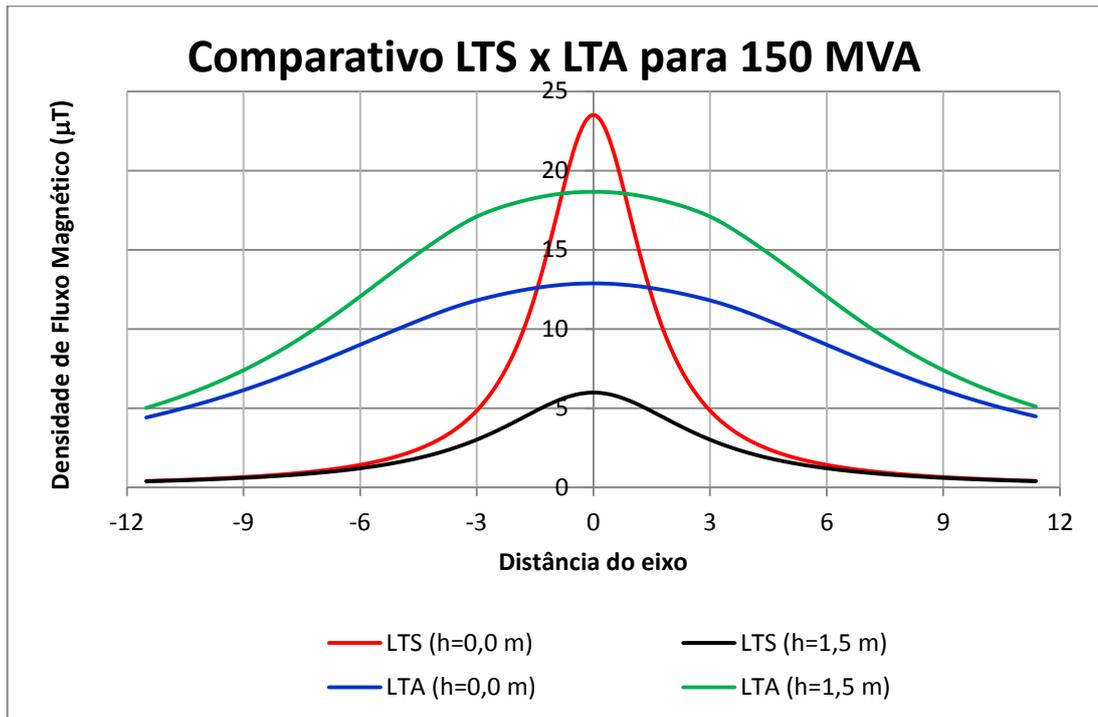
**Figura 4.14** – Distâncias entre os pontos de medição e os cabos mais próximos em uma LTA e uma LTS

Adotando a mesma ferramenta, em uma comparação entre uma linha de transmissão aérea em disposição horizontal, e uma linha de transmissão subterrânea em disposição plana horizontal, em 138 kV nas mesmas condições de operação do caso 1 pode ser observada na Figura 4.15. O campo magnético no centro do eixo à altura de 1,5 m da superfície, para a linha aérea será de 7,4  $\mu\text{T}$  quando os cabos estiverem a 6,84 m de altura do solo, enquanto para a linha subterrânea este valor é de 2,4  $\mu\text{T}$ , para uma profundidade de 1,5 metros. Já para o nível do solo, o campo da linha aérea será de 5,1  $\mu\text{T}$  enquanto da linha subterrânea será de 9,3  $\mu\text{T}$ .



**Figura 4.15** – Comparativo entre LTS e LTA para as condições do caso 1

Se esta verificação for realizada para a potência de 150 MVA (capacidade limite das linhas subterrânea dos casos 1 e 2, nas mesmas condições geométricas, estes campos serão de 12,9  $\mu\text{T}$  para a linha aérea e 23,5  $\mu\text{T}$  para a linha subterrânea calculados para a superfície. Já para o limite da faixa adotado para a linha aérea, conforme determina a norma NBR 15415 (para a medição), de 11,5 metros para cada lado, estes campos serão de 4,4  $\mu\text{T}$  para a linha aérea e 0,4  $\mu\text{T}$  para a linha subterrânea, como apresentado na Figura 4.16.



**Figura 4.16** – Comparativo dos campos magnéticos entre LTS e LTA para a uma linha de 138 kV e 150 MVA

Neste capítulo, foi apresentado o equipamento utilizado nas medições de campo, a interface do ferramenta UFields, além do procedimento para sua validação. Foram realizadas e analisadas as comparações com as medições de campo para dois casos reais e com os valores calculados em dois casos comparativos da referência [19].

## 5. Estudo de Caso

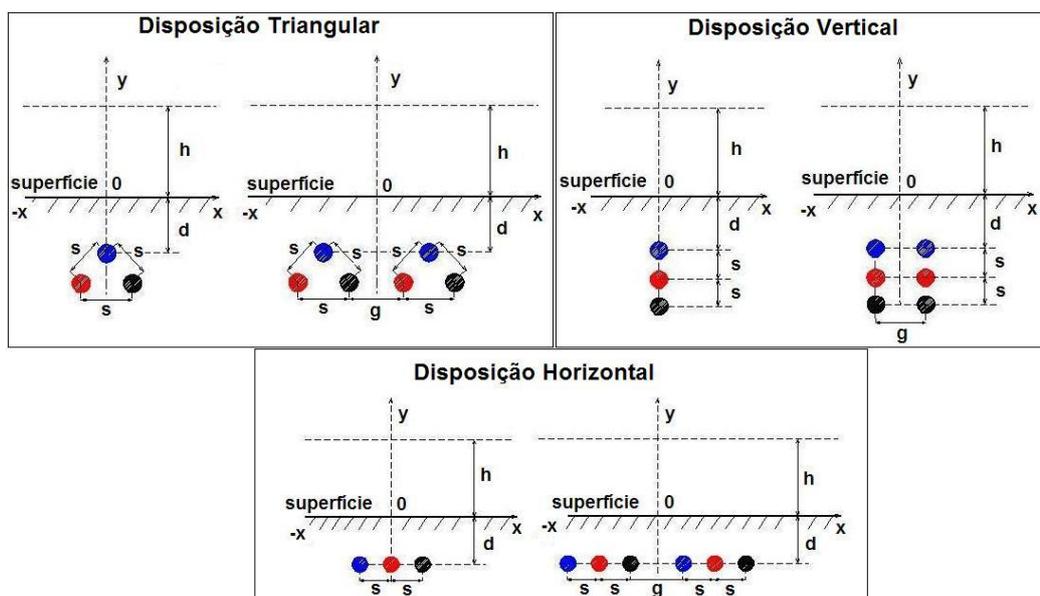
### 5.1 Introdução

Validada a ferramenta desenvolvida para o cálculo do campo magnético de linhas subterrâneas, foi feito o estudo de caso analisando a variação dos parâmetros geométricas dos condutores para mitigação dos campos.

### 5.2 Análise das Variáveis Geométricas

Para o estudo de caso foram consideradas, além das premissas do desenvolvimento da ferramenta, as correntes nos cabos condutores, a profundidade =1,5 m (d) e a distância do ponto de referência =1,5 m (h). Foram comparadas as 3 disposições, triangular, vertical e horizontal para a variação das distâncias entre os condutores (s) em 0,15 m, 0,25 m e 0,40 m, as distâncias entre os circuitos (g), quando duplos, em 0,5 m e 0,8 m e para a permutação de fases. As correntes nas blindagens foram desprezadas.

Os parâmetros geométricos são apresentados na Figura 5.1, para os circuitos simples e duplos, nas três disposições analisadas.



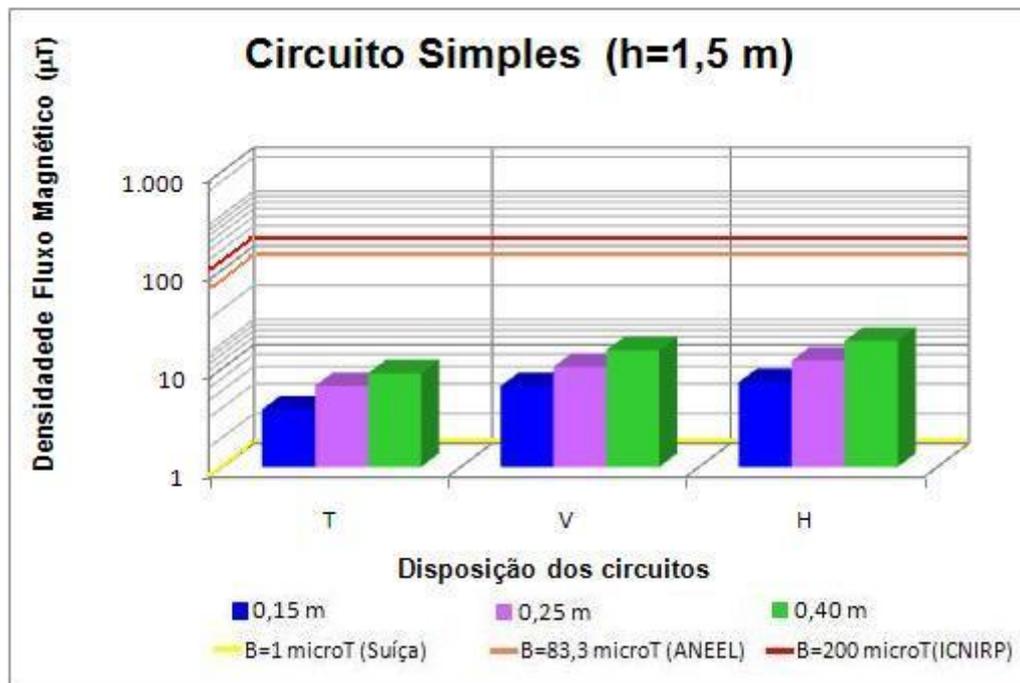
**Figura 5.1** – Parâmetros geométricos das linhas de transmissão subterrâneas

## 5.2.1 Disposição dos circuitos

Considerando-se circuitos simples e variando-se as distâncias entre os cabos condutores (s) para as três disposições, para uma potência de referência de 300 MVA, que corresponde a 1255 A em 138 kV, tem-se o gráfico da Figura 5.2.

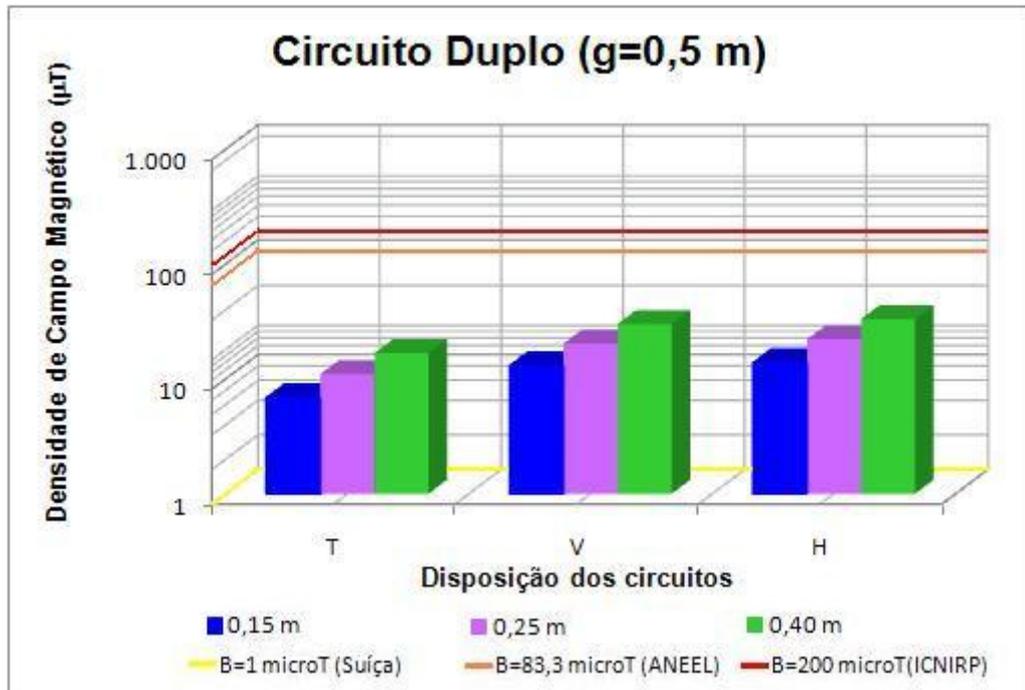
Para o circuito duplo foi considerada a situação de corrente de 1255 A em cada condutor, totalizando 600 MVA nos 2 circuitos.

A Figura 5.2 apresenta os valores dos campos magnéticos para circuitos simples calculados para o ponto de referência e variando as distâncias entre os cabos condutores e os limites de campo magnético para as referências da Suíça, da Resolução n.º 398 da ANEEL e do ICNIRP.



**Figura. 5.2.** Comparação dos valores de campo magnético para os 3 arranjos a 1,5 metros acima do solo aos limites admissíveis definidos nas normas.

A Figura 5.3 apresenta os valores dos campos magnéticos para circuitos duplos, mantendo-se fixa a distância entre circuitos (g) em 0,5 m e variando as distâncias entre os cabos condutores (s), comparados aos limites de campo magnético para as referências da Suíça, da Resolução n.º 398 da ANEEL e do ICNIRP.



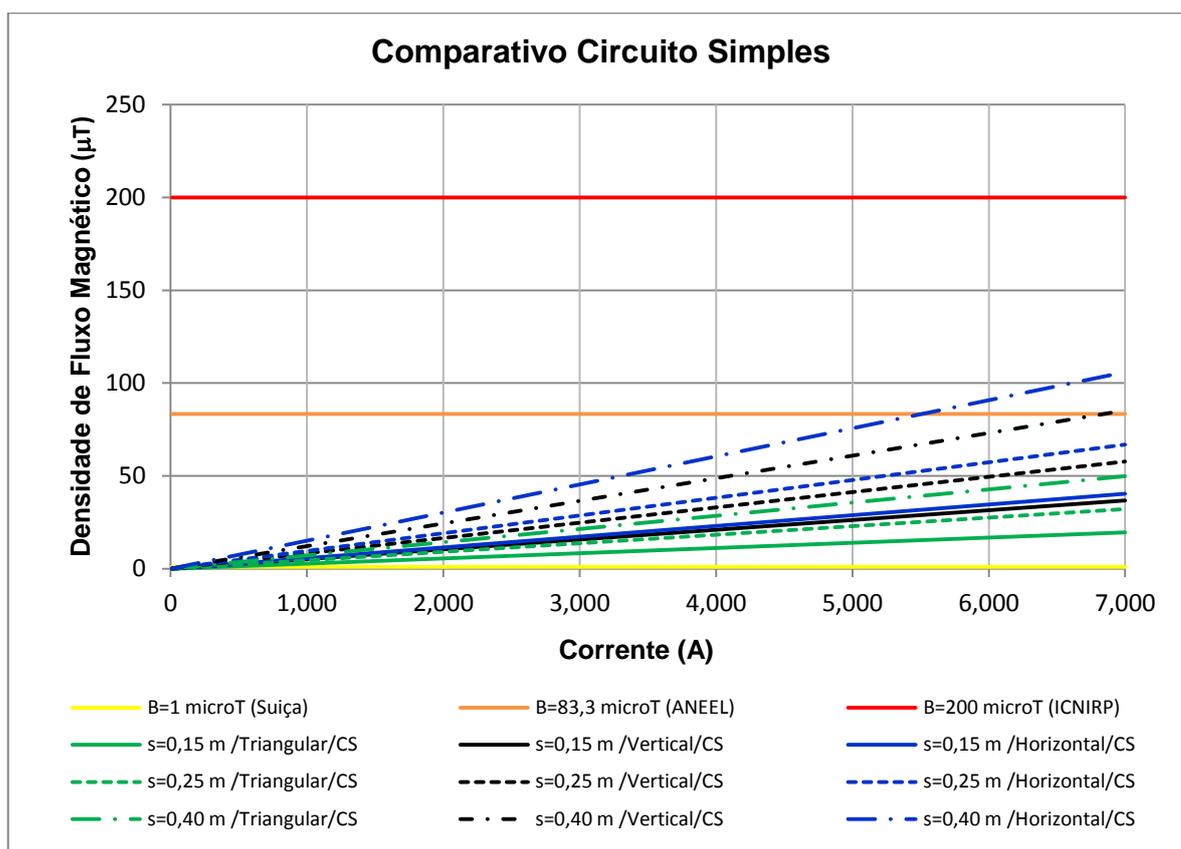
**Figura. 5.3.** Comparação entre os valores de campo magnético para circuitos duplos, para as 3 disposições variando a distância entre os condutores, em relação aos limites admissíveis definidos nas normas.

Portanto, para arranjos de linhas tanto de circuitos simples quanto de circuitos duplos, para a tensão de 138 kV e potência de 300 MVA em cada circuito, somente o limite Suíço é violado para o campo magnético. Nestas condições, a norma brasileira é obedecida.

### 5.2.2 Distância entre os cabos condutores (s)

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam as curvas da densidade de fluxo magnético para as correntes variando de zero até 7000 A para as disposições triangular, vertical e horizontal em circuito simples e duplo. Os campos foram calculados à altura de 1,5 metros do solo, variando as distâncias entre os cabos condutores (s) em 0,15 m, 0,25 m e 0,40 m. O circuito duplo está apresentado para o afastamento entre os circuitos (g) de 0,5 m (Figura 5.5) e 0,8 m (Figura 5.6), e a comparação entre estas curvas e os limites de referência da Suíça para áreas de uso sensível (1  $\mu$ T), da Resolução n.º 398 da ANEEL (83,3 $\mu$ T) e do ICNIRP (200 $\mu$ T). As correntes são referentes a cada condutor.

Na Figura 5.4 são apresentadas comparativamente as curvas das 3 disposições em circuito simples.



**Figura 5.4.** Comparativo do campo magnético máximo para circuito simples nas três disposições

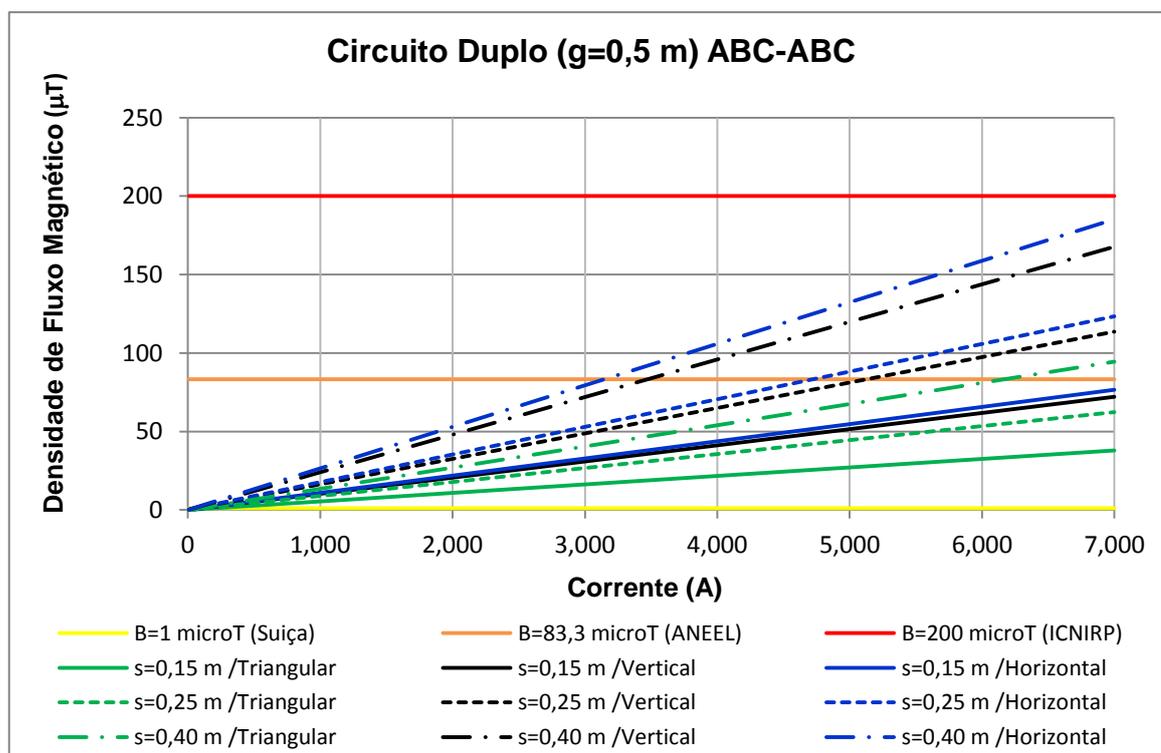
Em nenhuma das condições analisadas para circuitos simples o campo magnético se aproxima do limite normativo do ICNIRP e apenas nas condições das disposições vertical e horizontal o limite da resolução da ANEEL é violado, para o primeiro em corrente próxima de 7000A e para o segundo próxima de 5500A, correspondendo a potências improváveis para os níveis de tensão entre 138 kV e 500 kV, que correspondem a 1315 MVA para 138 kV, 3287 MVA para 345 kV e 4763 MVA para 500 kV a 5500 A. Para o limite adotado na Suíça para áreas denominadas de uso sensível, mesmo correntes muito baixas o violam, exigindo a utilização de sistemas de controle.

Com a tecnologia ora disponível, na tensão de 138 kV, pode ser considerada improvável a utilização de circuitos com correntes superiores a 1255 A, 300 MVA, pois “a escolha da tensão de uma linha é principalmente um problema de equilíbrio entre o investimento inicial na construção da linha e nos equipamentos, e o custo de sua operação. Até certos limites, aumentando-se a tensão obtêm-se menores perdas para uma dada secção de um condutor, ou condutores mais finos para uma dada perda de potência.” [61]. As limitações decorrem dos aumentos de

custos dos componentes como cabos, emendas e terminações empregados na própria linha e nos equipamentos e estruturas das subestações como disjuntores, transformadores, seccionadores, barramentos, etc., além das perdas elétricas nestas condições.

### 5.2.3 Distância entre os circuitos (g)

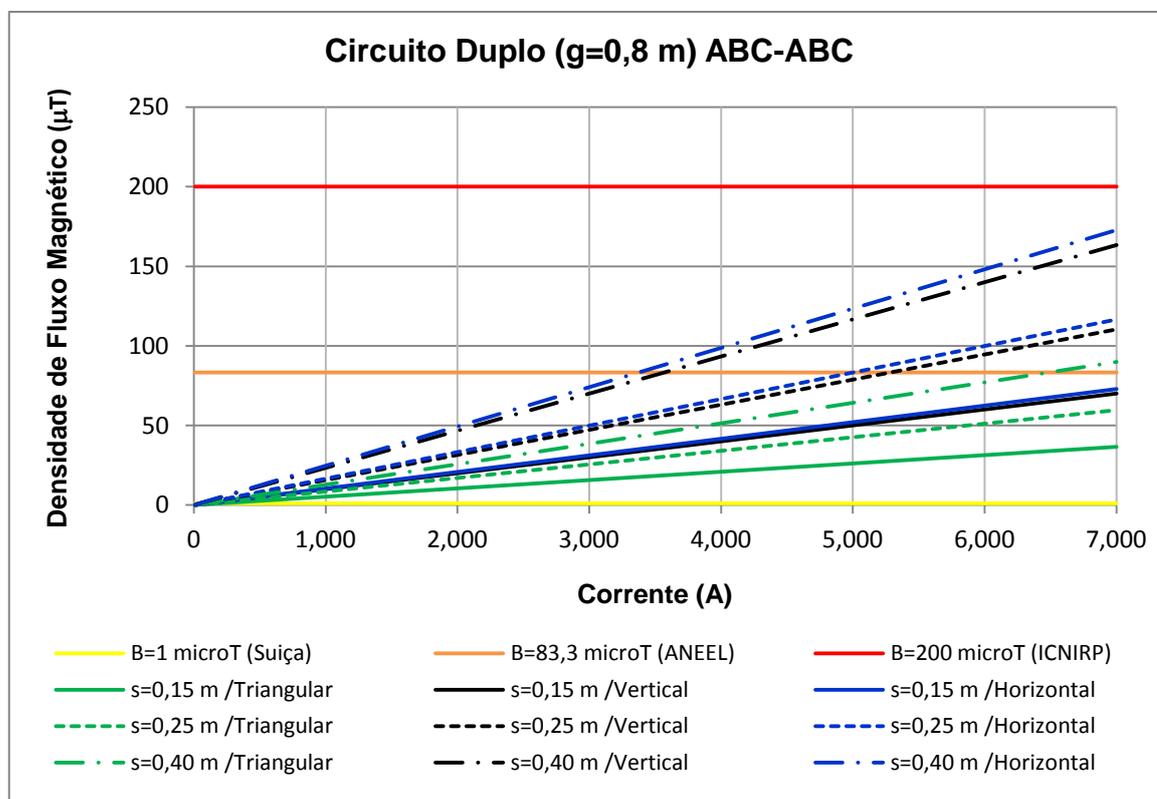
As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as curvas da densidade de fluxo magnético para as correntes variando de zero até 7000 A para as disposições triangular, vertical e horizontal em circuito duplo. Os campos foram calculados à altura de 1,5 metros do solo, variando as distâncias entre os cabos condutores (s) em 0,15 m, 0,25 m e 0,40 m e o afastamento entre os circuitos (g) de 0,5 m e 0,8 m. Estas curvas de campo são comparadas aos limites de referência da Suíça (1  $\mu\text{T}$ ), da Resolução n.º 398 da ANEEL (83,3  $\mu\text{T}$ ) e do ICNIRP (200  $\mu\text{T}$ ).



**Figura 5.5.** Comparativo do campo magnético máximo para circuito duplo nas três disposições com a distância entre circuitos (g) de 0,5 m

O comportamento do circuito duplo guarda a mesma relação do circuito simples, apresentando uma maior aproximação ao limite normativo do ICNIRP e

violação do limite da Resolução da ANEEL acima de 3000A para a disposição horizontal, 3500A para a disposição vertical e 6000A para a disposição triangular com afastamento de 0,40 m entre os condutores. Para a condição de afastamento de 0,25 m entre os condutores, apenas nas disposições horizontal e vertical ocorre a violação, próximo da corrente de 5000 A.

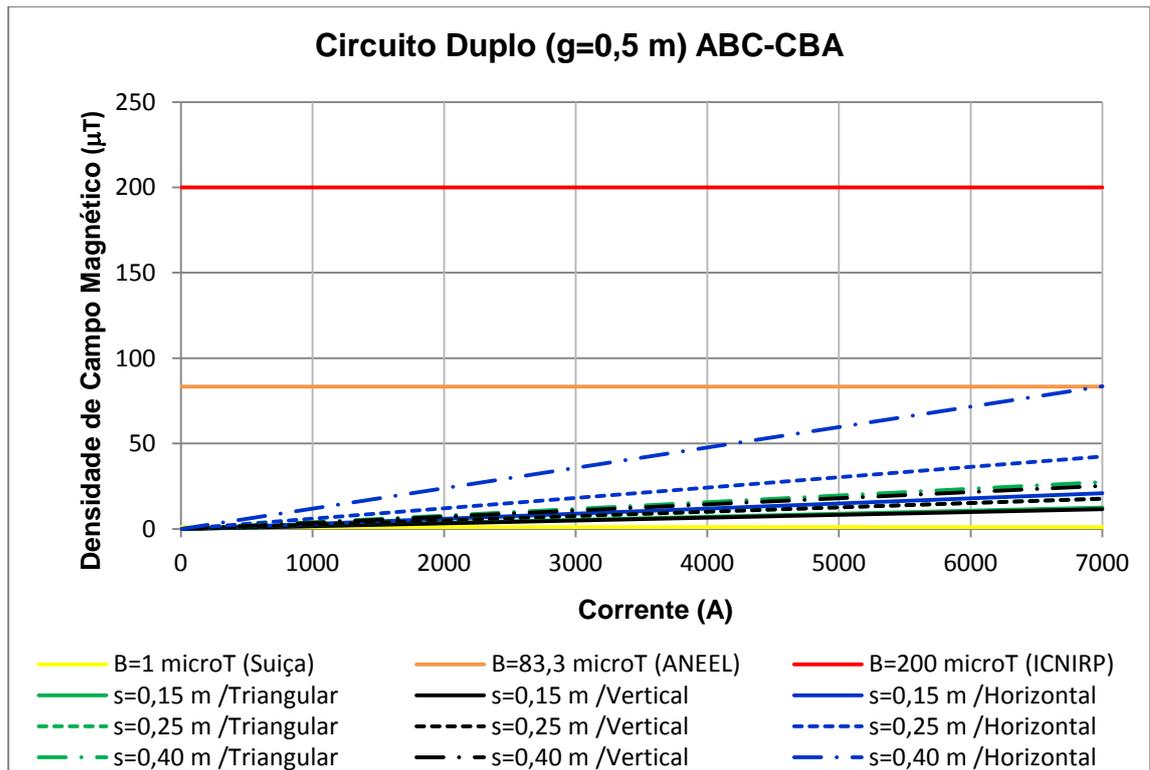


**Figura 5.6.** Comparativo do campo magnético máximo para circuito duplo nas três disposições com a distância entre circuitos (g) de 0,8 m

Para a variação das distâncias entre circuitos (g) de 0,5 m para 0,8 m, o comportamento das curvas se mantém observando-se uma redução do campo magnético máximo entre 5% e 7%, conforme a configuração, como apresentado na Tabela 5.1

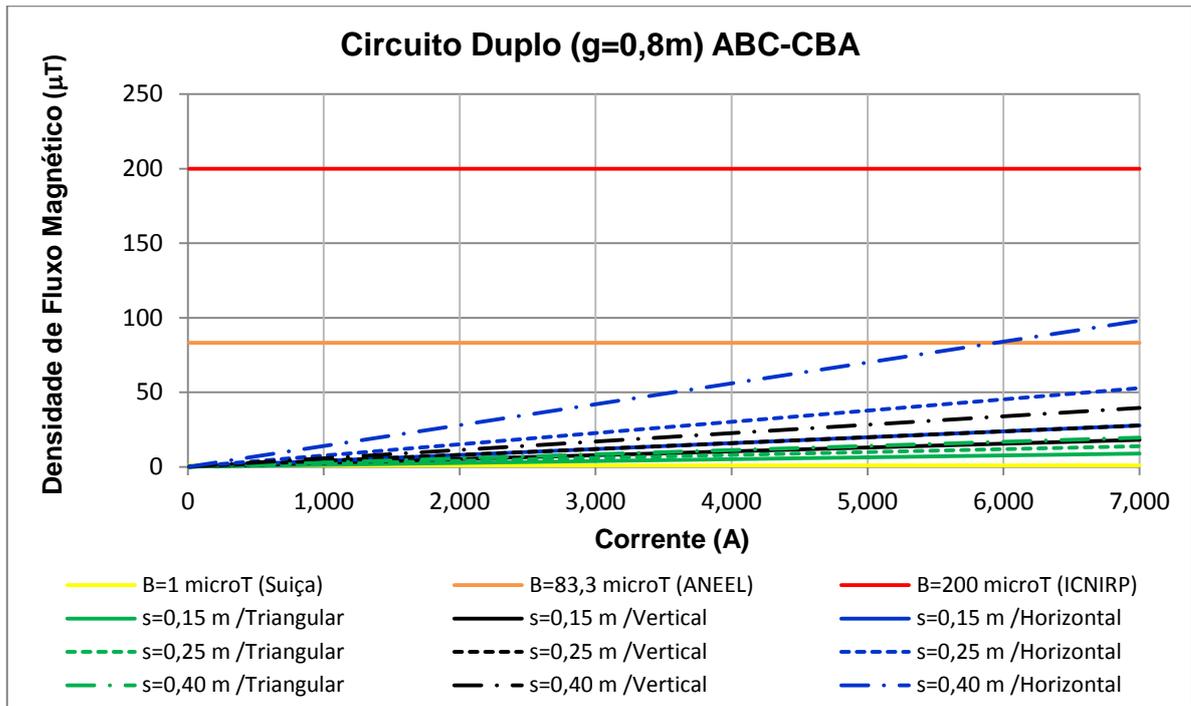
#### 5.2.4 Permutação de fases (ABC-CBA)

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam a comparação das três disposições na condição de permutação de fases (ABC-CBA) em circuitos duplos, alterando-se a distâncias entre os circuitos (g). Para esta análise, as correntes de todos os cabos condutores foram consideradas iguais.



**Figura 5.7** Comparativo do campo magnético máximo para dois circuitos nas três disposições com distância entre circuitos (g) de 0,5 m e transposição de fases ABC-CBA

A transposição de fases altera o comportamento das disposições quanto à redução do campo magnético máximo. Para a condição de afastamento dos circuitos (g) de 0,5 m, a redução do campo varia entre 55% e 84% em relação à configuração ABC-ABC, conforme o arranjo geométrico, como apresenta a Tabela 5.2.



**Figura 5.8.** Comparativo do campo magnético máximo para dois circuitos nas três disposições com distância entre circuitos (g) de 0,8 m e transposição de fases ABC-CBA

Na situação de permutação de fases para a condição de circuito duplo com afastamento entre circuitos (g) = 0,5 m, apenas a disposição horizontal violaria o limite da Resolução da ANEEL, quando o afastamento entre os condutores (s) fosse de 0,40 m e próximo da corrente de 7000A. Para a mesma situação, alterando somente o parâmetro de afastamento entre circuitos (g) para 0,8 m, ocorreria a violação do mesmo limite pela mesma disposição horizontal, porém próximo de 6000A.

A Tabela 5.1 apresenta o percentual de variação do campo magnético para a variação das distâncias entre circuitos (g), das distâncias entre os cabos (s), para cada uma das disposições, quando da configuração de fases ABC-ABC e da transposição ABC-CBA.

**Tabela 5.1** – Variação do campo magnético para a situação de variação da distância entre os circuitos  $g=0,5$  m e  $g=0,8$  m, sem e com transposição de fases

| Variação do Campo Magnético<br>$g=0,5$ m / $g=0,8$ m |            |          |            |         |            |          |            |
|------------------------------------------------------|------------|----------|------------|---------|------------|----------|------------|
| ABC-ABC                                              |            |          |            | ABC-CBA |            |          |            |
| s (m)                                                | Triangular | Vertical | Horizontal | s (m)   | Triangular | Vertical | Horizontal |
| 0,15                                                 | -4%        | -3%      | -5%        | 0,15    | -28%       | 57%      | 33%        |
| 0,25                                                 | -4%        | -3%      | -5%        | 0,25    | -28%       | 57%      | 25%        |
| 0,40                                                 | -5%        | -3%      | -7%        | 0,40    | -29%       | 57%      | 17%        |

A Tabela 5.2 apresenta o percentual de redução do campo magnético para a variação da distância entre os cabos (s), para cada uma das distâncias entre circuitos (g), para cada uma das disposições, quando da transposição de fase, de ABC-ABC para ABC-CBA.

**Tabela 5.2** – Variação do campo magnético para a situação de transposição de fases para  $g=0,5$  m e  $g=0,8$  m

| Variação do Campo Magnético<br>ABC-ABC / ABC-CBA |            |          |            |           |            |          |            |
|--------------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|------------|----------|------------|
| $g=0,5$ m                                        |            |          |            | $g=0,8$ m |            |          |            |
| s (m)                                            | Triangular | Vertical | Horizontal | s (m)     | Triangular | Vertical | Horizontal |
| 0,15                                             | -67%       | -84%     | -73%       | 0,15      | -76%       | -74%     | -62%       |
| 0,25                                             | -72%       | -84%     | -66%       | 0,25      | -77%       | -75%     | -55%       |
| 0,40                                             | -71%       | -84%     | -55%       | 0,40      | -78%       | -76%     | -43%       |

Na Tabela 5.2 pode-se observar que a transposição de fases proporciona redução significativa do campo magnético em todas as configurações avaliadas, sendo percentualmente maior na distância entre circuitos (g) de 0,8 m apenas para a disposição triangular.

Na configuração ABC-ABC, todas as disposições apresentam reduções de campo magnético, ainda que baixas, quando da variação da distância entre os circuitos (g), de 0,5 m para 0,8 m, além de certa coerência com o aumento da redução do campo magnético percentual na medida em que se afastam os condutores. O campo em valores absolutos cresce. Já na condição de

transposição de fases (ABC-CBA), apenas na disposição triangular ocorre a redução percentual havendo um acréscimo constante para a disposição vertical independente da distância entre os condutores e decrescente para a disposição horizontal.

A disposição triangular somente não apresenta o menor campo magnético quando comparada às demais disposições nas mesmas condições geométricas para o arranjo com a distância entre circuitos ( $g$ ) de 0,5 m e transposição de fases, quando a disposição vertical apresenta valores 8% menores e a disposição horizontal apresenta sempre os maiores campos magnéticos.

O aumento na distância entre os cabos condutores ( $s$ ) sempre causa acréscimo nos campos magnéticos para todas as disposições e em todas as condições avaliadas, conforme pode ser verificado graficamente nas Figuras 5.4 a 5.8 e nas Tabelas 5.3 e 5.4.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam a variação do campo magnético para os parâmetros geométricos utilizados quando da variação da distância entre os condutores ( $s$ ), de 0,15 m para 0,25 m e de 0,25 m para 0,40 m.

**Tabela 5.3** – Variação do campo magnético para a situação de variação da distância entre os condutores ( $s$ ), para a distância entre circuitos ( $g$ ) de 0,5 m

| Variação do Campo Magnético<br>$g=0,5$ m |            |          |            |            |            |          |            |
|------------------------------------------|------------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|
| ABC-ABC                                  |            |          |            | ABC-CBA    |            |          |            |
| $s$<br>(m)                               | Triangular | Vertical | Horizontal | $s$<br>(m) | Triangular | Vertical | Horizontal |
| 0,15                                     | 65%        | 57%      | 61%        | 0,15       | 54%        | 53%      | 103%       |
| 0,25                                     |            |          |            | 0,25       |            |          |            |
| 0,40                                     | 52%        | 48%      | 50%        | 0,40       | 43%        | 42%      | 97%        |

**Tabela 5.4** – Variação do campo magnético para a situação de variação da distância entre os condutores (s), para a distância entre circuitos (g) de 0,8 m

| Variação do Campo Magnético<br>g=0,8 m |            |          |            |          |            |          |            |
|----------------------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| ABC-ABC                                |            |          |            | ABC-CBA  |            |          |            |
| s<br>(m)                               | Triangular | Vertical | Horizontal | s<br>(m) | Triangular | Vertical | Horizontal |
| 0,15                                   | 63%        | 58%      | 60%        | 0,15     | 53%        | 53%      | 91%        |
| 0,25                                   |            |          |            | 0,25     |            |          |            |
| 0,40                                   | 51%        | 48%      | 48%        | 0,40     | 42%        | 42%      | 85%        |

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 observa-se uma variação percentual pouco expressiva entre as situações de afastamento entre os circuitos em 0,5 m e 0,8 m, onde a maior variação está na disposição horizontal.

A variação das distâncias entre os circuitos (g), nas condições simuladas causa impacto pouco expressivo nos valores máximos dos campos magnéticos, conforme se pode observar nas Figuras 5.5 e 5.6, reduzindo-o na medida em que se afastam os circuitos, devido à redução na superposição dos campos.

A variação do parâmetro transposição de fases propicia a maior e mais expressiva redução de campo magnético para todas as condições, desde que as correntes circulantes sejam as mesmas nos dois circuitos.

### **5.3 Comparações com Normas e Diretrizes**

Os valores medidos estão coerentes com os valores calculados e são relativamente baixos quando comparados com os valores limites estabelecidos pela legislação brasileira. Nas medições dos casos 1 e 2, o valor máximo foi de 9,03  $\mu\text{T}$  para uma linha que poderia atingir 23,5  $\mu\text{T}$  (calculado) se utilizada em sua capacidade nominal. Assim para o caso avaliado, segundo a norma NBR 15415 que define o critério de medição para linhas de transmissão sem distinguir aéreas de subterrâneas, e por esta última não dispor de faixa de segurança, tomando-se o *ponto de menor distância entre o condutor e o solo*, a comparação entre seus campos deve ser realizada a altura de 1,5 m do solo, a linha subterrânea

apresenta o campo magnético aproximadamente 3 vezes menor que uma linha aérea nas mesmas condições de carga.

Nas medições realizadas, o valor máximo foi de 9,03  $\mu\text{T}$  para uma linha que poderia atingir 23,5  $\mu\text{T}$  (calculado) se utilizada em sua capacidade nominal (150 MVA). A legislação determina o valor limite de 200  $\mu\text{T}$ , recomendado pelo ICNIRP, e a ANEEL 83,3  $\mu\text{T}$ . Para atingir o limite legal, seria necessária uma potência nominal improvável de ser alcançada neste nível de tensão, 138 kV (5.350 A  $\rightarrow$  1.278.773 MVA).

Tratando-se da linha de transmissão isoladamente, os campos situam-se bem aquém do limite estabelecido, porém locais que apresentem condições específicas com maior densidade de instalações que são as fontes de campos, como saídas de subestações de grande capacidade instalada e com linhas e redes subterrâneas de energia, são merecedoras de atenção e análise, buscando controlar suas emissões, se necessário.

## 6. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de redução do campo magnético no entorno de linhas de transmissão subterrâneas, através da variação de seus parâmetros geométricos. Esta solução pode ser implementada na fase de projeto, não acarretando custos adicionais já que não implica no acréscimo de mão de obra, materiais, sistemas auxiliares ou equipamentos, apesar de apresentar limitações quanto à redução proporcionada.

A metodologia desenvolvida foi confrontada com medições de campo e com um caso comparativo para sua validação. Os parâmetros geométricos avaliados foram (i) as disposições dos condutores, (ii) a distância entre os condutores ( $s$ ), (iii) a distância entre os circuitos ( $g$ ) para circuitos duplos e (iv) a transposição de fases.

Para a avaliação quanto ao atendimento aos limites do campo magnético das normas e diretrizes, os valores calculados foram comparados com um valor bastante restritivo, que é o limite suíço para áreas de uso sensível, com os limites brasileiros definidos na Resolução n.º 398/2010 da ANEEL e na Lei n.º 11.934/2009, que adota o limite do ICNIRP.

Em circuitos simples, somente nas disposições vertical e horizontal há violação dos limites da ANEEL, mas em correntes improváveis de serem atingidas para tensões entre 138 kV e 500 kV.

Os valores calculados para os circuitos duplos indicam que os corredores de linhas com grande número de circuitos devem ser avaliados em cada situação, pois podem extrapolar os limites normativos. Já nos circuitos duplos o limite do ICNIRP não foi atingido em qualquer arranjo avaliado, ocorrendo violação do limite da Resolução da ANEEL em correntes superiores a 3000A.

A disposição triangular apresenta o menor campo magnético dentre as demais disposições, exceto na configuração com transposição de fases, onde a disposição vertical apresenta valores aproximadamente 8% menores para a condição de afastamento entre condutores ( $s$ ) = 0,15 m.

A variação do parâmetro geométrico de afastamento entre os condutores (s) proporciona aumento do campo magnético na medida em que estas distâncias também são aumentadas.

A variação do parâmetro geométrico de distância entre os circuitos (g), nas condições avaliadas, proporciona redução do campo magnético para um maior afastamento entre os circuitos, variando de 3% a 7% sem a adoção da transposição de fases. Na situação de transposição de fases, apenas a disposição triangular apresenta redução, da ordem de 28% e as demais, aumentos entre 17% e 57%.

A transposição de fases apresenta as maiores reduções do campo magnético dentre todas as variações geométricas avaliadas, variando de 43% a 84% conforme a configuração geométrica.

## **6.1 Propostas de Continuidade**

Uma das fontes de campo eletromagnético em baixas frequências em torno de nós são as linhas de transmissão de energia elétrica, incluindo as linhas aéreas e as subterrâneas. As linhas subterrâneas por não serem aparentes chamam menos a atenção, no entanto por estarem localizadas mais próximas à superfície, exigem atenção quanto aos possíveis efeitos biológicos que possam provocar à saúde devido à exposição a seu campo magnético, embora os estudos até então desenvolvidos neste sentido ainda não apresentem resultados conclusivos, devendo ser investigados para fornecer um melhor contorno de sua extensão.

Diante da necessidade da população ter que compartilhar sua convivência com estas instalações, fonte destes campos magnéticos, exige-se que sejam desenvolvidos mecanismos que mitiguem estes campos, reduzindo-os a valores aceitáveis, que não ofereçam riscos ao público.

O método de mitigação através da variação dos parâmetros geométricos, apresenta a vantagem de permitir sua utilização associado a outros métodos passivos e ativos, maximizando a capacidade de redução do campo magnético na proximidade da instalação.

Este trabalho estudou os parâmetros geométricos das linhas de transmissão subterrâneas, desprezando a componente térmica inerente à sua constituição e determinante na fase de projeto, uma vez que os materiais da isolação dos cabos trabalham com limites restritos de temperatura. Deverá ser desenvolvida uma ferramenta que contemple esta variável.

Mesmo para as geometrias nas condições avaliadas, alguns aspectos deverão ser investigados na condição real, tais como correntes circulantes em cada um dos circuitos, profundidade das instalações, presença de circuitos de média tensão subterrâneos na proximidade ou compartilhando estrutura física como túneis, galerias e bancos de dutos, a mudança de fluxo de potência, dentre outros.

A associação de outras técnicas de blindagem passiva de mitigação do campo magnético à de parâmetros geométricos e mesmo de técnicas de blindagem ativa (que utilizam de fontes externas, transformadores, capacitores ou quaisquer outros elementos adicionais, exceto placas metálicas, ferromagnéticas e cabos dispostos paralelamente aos cabos de energia) deve ser considerada em trabalhos futuros.

A utilização de GPR (Radar de Penetração no Solo) também conhecido no Brasil como “Georadar”, para mapeamento do subsolo e identificação das interferências, além de precisar a profundidade e afastamento dos cabos no trecho a ser medido é um aspecto interessante a ser considerado.

Por fim, propõe-se a realização de estudos em trechos de emendas dos cabos (caixas de emendas) onde, devido ao maior afastamento exigido para a acomodação dos acessórios e à disposição geralmente adotada (plana horizontal), os valores de campos magnéticos são maiores que ao longo dos circuitos.

## Referências Bibliográficas

- [1] Wertheimer, N., Leeper, E., “*Electrical wiring configurations and childhood cancer*”, A. Jour. Epidemiology, vol. 109, nº 3, pp. 273-284, Mar. 1979.
- [2] Savitz, D. A., Wachtel, H. Barnes, F. S., John, E. M., Tvrdik, J. G., “*Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic field*”, Am. Jour. Epidemiology, vol. 128, nº 1, pp. 21-38, July 1988.
- [3] Feychting, M., Ahlbom, A., “*Magnetic Fields and Cancer in Children Residing Near Swedish High Voltage Power Lines*”, Am.J. Epidemiology, Vol. 138, nº. 7, pp.467-481, Oct. 1993.
- [4] Fulton, J. P., Cobb, S., Preble L., Leone, L., Edwin, F., “*Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island*”, Am. Jour. Epidemiology, vol. 111, nº 3, pp. 292-296, March 1980.
- [5] E. R. Schoenfeld, E. S. O’Leary, K. Henderson, R. Grimson, G. C. Kabat, S. Ahnn, W. T. Kaune, M. D. Gammon, M. C. Leske and for the EBCLIS Group Electromagnetic., “*Fields and Breast Cancer on Long Island: A Case-Control Study*” A. Jour. Epidemiology, vol. 158, nº 1, pp. 47-58, Apr. 2003.
- [6] Pool, R., “*Electromagnetic Fields: The Biological Evidence*”, Science, Vol. 249, pp. 1378-1381, Sep. 1990.
- [7] Floderus, B., “*Occupational Exposure to Electromagnetic Fields in Relation to Leukemia and Brain Tumors*”, Dept. of Neuromedicine, The National Institute of Occupational Health, Solna, Sweden, pp. 465-476, Sep. 1993.
- [8] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). vol. 99, no.6, pp. 818-836. December 2010. Disponível em <http://www.icnirp.de/documents/LFgdl.pdf>
- [9] World Health Organization Website. (2010, Dec. 4). [Online]. Disponível em <http://www.who.int>
- [10] Union of the Electricity Industry Eurelectric, “*EMF exposure standards applicable in europe and elsewhere*,” Tech. Rep., Mar. 2006, ref. no. 2006-450-0006.0
- [11] Federal law “*The sanitary-epidemiological welfare of the population*” from March 30th, 1999 no. 52-FZ. Disponível em [http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Europe/Russia\\_files/table\\_rs\\_files/law.pdf](http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Europe/Russia_files/table_rs_files/law.pdf)

- [12] Ordinance of the Ministry of Environment Safety, Republic of Poland, Journal of Law, No.192/2003, pos.1883. Disponível em [http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Europe/Poland\\_files/table\\_datoteke/poljski1883.pdf](http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Europe/Poland_files/table_datoteke/poljski1883.pdf)
- [13] C95.6 IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields 0-3 kHz, C95.6 IEEE Std., Standards Coordinating Committee 28,2002.
- [14] Kandel, S., “*Elf policies worldwide protection of general public*” in WHO Workshop, Geneva, Switzerland, Jun. 2007.
- [15] Legge 22 febbraio 2001, n. 36, legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici magnetici ed elettromagnetici, Part 1, no. 55, Mar. 7, 2001.
- [16] Brasil. Lei n 11.934, de 05 de maio de 2009. Dispõe sobre limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Diário oficial da União, Brasília, 06 de maio de 2009, Seção 1, pp. 1-3.
- [17] Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de 23 maio de 2010.
- [18] SÃO PAULO (Município). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. Regulamenta os procedimentos para o controle ambiental da instalação e da operação de subestações e de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica do município. Portaria nº. 80, 13 de outubro de 2005. Diário Oficial do Município, São Paulo, p. 30, out. 2005.
- [19] Oliveira, F. G.; “*Estudos de Instalações de Linhas Subterrâneas de Alta Tensão com Relação a Campos Magnéticos*”, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [20] Vérité, J.C., Cont, R. I., Bjorlow-Larsen, K., Deschamps ,F., Drugge, B., Garcia, F., Dular, P., Pirotte, P., Swingler, R., “*Magnetic field in HV cable systems 1: Systems without ferromagnetic component*”. Cigré guide 104 SC 21 Doc 95/16 – JTF 36-01/21 – June 1996.
- [21] Habiballah, I.O., Farag, A. S., Dawoud, M. M. and Firoz, A., “*Underground cable magnetic field simulation and management using new design configurations*”, *Int. J. Elect. Power Systems Research (EPSR)*, vol. 45, pp. 141 – 148, 1998.
- [22] Murta, M. L., “*Blindagem ativa para campos magnéticos em baixa frequência*”. Tese de Doutorado, UFMG, 2002.

- [23] Zucca, M.; Ribaldone, P.; “*Magnetic Field Mitigation above a Double Trefoil HV Underground Power Line*”, 18th International Conference on Electricity Distribution – CIRED, 6 – 0. June 2005, Turin, Itália.
- [24] R. Conti, F. Donazzi, P. Maioli, R. Rendina, E. A. Sena, “*Some italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues*”, Cigré SC C4-303, 2006.
- [25] “*Mitigation Techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems*”. WG C4-204, Cigré – February 2009.
- [26] Neto, A. M., Silva, R. M. C., Barbosa, C. R. N., Domingues, L. A. M. C., Cedrola. Jr, C. A., Correa, S. L., Costa, M. A., “*Avaliação dos níveis dos campos elétrico e magnético em áreas de livre acesso ao público - Subestação de energia elétrica Florianópolis Agrônômica*”. In XIII ERIAC, May 2009. Puerto Iguazú
- [27] Canova, A; Giaccone L., “*A Novel Technology for Magnetic-Field Mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, nº. 3, Feb 2011
- [28] World Health Organization – Fact Sheet nº 322 – June 2007. Disponível em [http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322 ELF\\_fields\\_portuguese.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322 ELF_fields_portuguese.pdf)
- [29] Miller Jr., C. J., “*The Measurement of Electric Fields in Live Line Working*” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, nº 4, pp. 493-498, April, 1967.
- [30] “*Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*”, EPRI – Electric Power Research Institute, Second Edition, 1982.
- [31] IEC Standard 61786-1998. “*Measurement of low frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings. - Special requirements for instruments and guidance for measurements*” – 1998.
- [32] “*Measurement of Electric and Magnetic Fields From Alternating Current Power Lines*”, A report prepared by the Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97,n.º 4, pp 1104-1114, July/Aug, 1978.
- [33] IEEE Std 644-1994, “*Measurement of Low-Frequency Magnetic and Electric Fields with Regard to Exposure of Human Beings*”, IEEE Standards Board, 1994.

- [34] Gary, C., Cortina, R., Hirsch, F., et al., “*Electric and Magnetic Fields Produced by Transmission Systems*”, Brochure 21 – TF 36-01, Cigré, 1980.
- [35] “*Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields Near Overhead Power Lines*”, Brochure 375 – WG C4.203, CIGRÉ, April 2009.
- [36] Hoeffelman, J., Conti, R., Romero, P. L. C., et al. “*Characterization of ELF Magnetic Fields*”, Brochure 320 – TF C4.205, CIGRÉ, April 2007.
- [37] Bucea, G., Kent, H., “*Shielding techniques to reduce magnetic fields associated with underground power cables – Case study from Sydney Australia*”, Session 21-201. Paris: Cigré, 1998.
- [38] Du, Y., Cheng, T., Farag, and A., “*Principles of power-frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors*”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 3, pp. 450–459, Aug. 1996.
- [39] Canova, A., Manzin, A., and Tartaglia, M., “*Evaluation of different analytical and semi-analytical methods for the design of elf magnetic field shields*,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 788–796, May/Jun. 2002.
- [40] Cruz, P., Izquierdo, C., and Burgos, M., “*Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field*”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1357–1362, Oct. 2003.
- [41] Canova, A., Grusso, G., and Repetto, M., “*Optimal shielding of low frequency fields*”, *COMPEL*, vol. 23, pp. 173–186, 2004.
- [42] Shperling, B., Menemenlis-Hopkins, L., Fardanesh, B., Clairmont, B., and Child, D., “*Reduction of magnetic fields from transmission lines using passive loops*”, in *Proc. CIGRE*, 1996, Paper 36-103.
- [43] Yamazaki, K., Kawamoto, T., and Fujinami, H., “*Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor*”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 2, pp. 646–651, Apr. 2000.
- [44] Cruz, P., Hoeffelman, J., Del Pino, J. C., “*Passive loop-based mitigation of magnetic fields from underground power cable*”, *IEEE Latin America Transactions*, v. 6, n° 1, pp. 59-65, Mar. 2008.
- [45] Maioli, P., Zaccone, E., “*Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations*”. In: *Jicable*, 7<sup>th</sup>., Versailles, 2007.
- [46] Salinas, E., ET AL. “*Mitigation techniques of Power-frequency magnetic fields originated from electric Power systems*”, Technical Brochure 373. Paris: Cigré, WG C4-204, Feb. 2009. 172 p.

- [47] Nishimura, F., “*Curso de cabos de potência para transmissão subterrânea - Parte 3*”, Apostila, [S.l.: s.n., 19--].
- [48] LS EHV Cable System – 66–500kV XLPE Cable & Accessories, Published in 2009.
- [49] Rocha, P. E. D., “*Modelagem de cabos subterrâneos e submarinos para estudos de transitórios*” março 2007.
- [50] Teixeira Junior, M. D. “*Cabos de Energia*”, 2 ed. São Paulo: Artliber, 2004.
- [51] Cicarelli, L. D., “*Estudo de capacidade de corrente dos cabos subterrâneos*”. 1991. Dissertação de mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da USP.
- [52] Nishimura, F., “*Sistema de transmissão subterrânea com conexões especiais*”, 1988. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da USP.
- [53] WORKING GROUP 07 OF STUDY COMMITTEE nº. 21 OF CIGRÉ. The design of specially bonded cable systems. **Electra**, Paris, nº. 28, p. 55-81, May 1973.
- [54] WORKING GROUP 07 OF STUDY COMMITTEE nº. 21 OF CIGRÉ. The design of specially bonded cable systems (Second part). **Electra**, Paris, nº. 47, p. 61-86, July 1976.
- [55] USGS Geomagnetism Program, disponível em <http://geomag.usgs.gov>
- [56] Lai, Gordon G.; Yang C. F.; Huang, H. M.; Su, C. T.; “*Optimal Connection of Power Transmission Lines With Underground Power Cables to Minimize Magnetic Flux Density Using Genetic Algorithms*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 3, pp. 1553 – 1560, July, 2008.
- [57] ABNT NBR 15415, Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz, 30 nov. 2006.
- [58] Guimarães, G. E., “*Medições e Cálculos de Campos Elétricos e Magnéticos de uma Linha de Transmissão de 500 kV*”. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. UFMG, 2005.
- [59] Narda Safety Test Solutions, EFA-200/300 Analisador de Campo Eletromagnético, “Manual de Operação”.
- [60] NBR-5422, “*Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento*”, ABNT, Março, 1985.
- [61] Stevenson Jr., W. D., “*Elementos de Análise de Sistemas de Potência*”, McGraw-Hill, Brasil, 1974

- Anexo -

Certificados de Calibração do  
Equipamento de Medição

**Narda Safety Test Solutions GmbH**  
 Sandwiesenstrasse 7 · D-72793 Pfullingen · Germany  
 Phone: +49-7121-9732-0 · Fax: +49-7121-9732-790



## Calibration Certificate

Narda Safety Test Solutions hereby certifies that the referenced equipment has been calibrated by qualified personnel to Narda's approved procedures. The calibration was carried out within a certified quality management system conforming to DIN EN ISO 9001:2000.

The metrological confirmation system for test equipment complies with ISO 10012-1.

|                                     |                                             |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Object                              | <b>B-Field Meter EFA-300</b>                |
| Type                                | <b>2245/30</b>                              |
| Serial Number                       | <b>H-0016</b>                               |
| Manufacturer                        | Narda Safety Test Solutions                 |
| Customer                            |                                             |
| Date of Calibration                 | 20-Apr-2010                                 |
| Confirmation interval (recommended) | 24 months                                   |
| Ambient conditions                  | 23 °C ± 3 °C<br>(20 ... 60) % rel. humidity |
| Calibration procedure               | 2245-8710-00C                               |

Pfullingen, 20-Apr-2010

Person in charge  
 M. Budim

Head of Laboratory  
 N. Moll



Certified by DQS against  
 DIN EN ISO 9001:2000  
 (Reg.-No. 99379-QM)

This certificate may only be published in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director.

**Narda Safety Test Solutions GmbH**  
 Sandwiesenstrasse 7 · D-72793 Pfullingen · Germany  
 Phone: +49-7121-9732-0 · Fax: +49-7121-9732-790



## Calibration Certificate

Narda Safety Test Solutions hereby certifies that the referenced equipment has been calibrated by qualified personnel to Narda's approved procedures. The calibration was carried out within a certified quality management system conforming to DIN EN ISO 9001:2000.

The metrological confirmation system for test equipment complies with ISO 10012-1.

|                                     |                                             |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Object                              | <b>E-Field Unit</b>                         |
| Type                                | <b>2245/90.31</b>                           |
| Serial Number                       | <b>G-0019</b>                               |
| Manufacturer                        | Narda Safety Test Solutions                 |
| Customer                            |                                             |
| Date of Calibration                 | 20-Apr-2010                                 |
| Confirmation interval (recommended) | 24 months                                   |
| Ambient conditions                  | 23 °C ± 3 °C<br>(20 ... 60) % rel. humidity |
| Calibration procedure               | 2245-8712-00B                               |

Pfullingen, 20-Apr-2010

  
 Person in charge  
 M. Budim

  
 Quality management representative  
 W. Kumbier

This certificate may only be published in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director.



Certified by DQS against  
 DIN EN ISO 9001:2000  
 (Reg.-No. 99379-QM)

**Narda Safety Test Solutions GmbH**  
 Sandwiesenstrasse 7 · D-72793 Pfullingen · Germany  
 Phone: +49-7121-9732-0 · Fax: +49-7121-9732-790



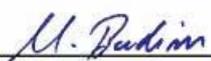
## Calibration Certificate

Narda Safety Test Solutions hereby certifies that the referenced equipment has been calibrated by qualified personnel to Narda's approved procedures. The calibration was carried out within a certified quality management system conforming to DIN EN ISO 9001:2000.

The metrological confirmation system for test equipment complies with ISO 10012-1.

|                                     |                                                                   |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Object                              | <b>B-Field Probe 100 cm<sup>2</sup><br/>B-Field Meter EFA-300</b> |
| Type                                | <b>2245/90.10<br/>2245/30</b>                                     |
| Serial Number                       | <b>T-0019<br/>H-0016</b>                                          |
| Manufacturer                        | Narda Safety Test Solutions                                       |
| Customer                            |                                                                   |
| Date of Calibration                 | 20-Apr-2010                                                       |
| Confirmation interval (recommended) | 24 months                                                         |
| Ambient conditions                  | 23 °C ± 3 °C<br>(20 ... 60) % rel. humidity                       |
| Calibration procedure               | 2245-8711-00C                                                     |

Pfullingen, 20-Apr-2010

  
 Person in charge  
 M. Budim

  
 Head of Laboratory  
 N. Moll



Certified by DQS against  
 DIN EN ISO 9001:2000  
 (Reg.-No. 99379-QM)

This certificate may only be published in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director.

**Narda Safety Test Solutions GmbH**  
 Sandwiesenstrasse 7 · D-72793 Pfullingen · Germany  
 Phone: +49-7121-9732-0 · Fax: +49-7121-9732-790



## Calibration Certificate

Narda Safety Test Solutions hereby certifies that the referenced equipment has been calibrated by qualified personnel to Narda's approved procedures. The calibration was carried out within a certified quality management system conforming to DIN EN ISO 9001:2000.

The metrological confirmation system for test equipment complies with ISO 10012-1.

|                                     |                                                       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Object                              | <b>B-Field Probe Ø 3 cm<br/>B-Field Meter EFA-300</b> |
| Type                                | <b>2245/90.20<br/>2245/30</b>                         |
| Serial Number                       | <b>H-0012<br/>H-0016</b>                              |
| Manufacturer                        | Narda Safety Test Solutions                           |
| Customer                            |                                                       |
| Date of Calibration                 | 20-Apr-2010                                           |
| Confirmation interval (recommended) | 24 months                                             |
| Ambient conditions                  | 23 °C ± 3 °C<br>(20 ... 60) % rel. humidity           |
| Calibration procedure               | 2245-8713-00C                                         |

Pfullingen, 20-Apr-2010

Person in charge  
M. Budim

Head of Laboratory  
N. Moll



Certified by DQS against  
 DIN EN ISO 9001:2000  
 (Reg.-No. 99379-QM)

This certificate may only be published in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director.