



**GRUPO - 10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE BLINDAGEM DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS QUANTO AO FATOR DE REDUÇÃO, A PERDA NA AMPACIDADE DA LINHA E OS CUSTOS FINANCEIROS**

**Rodrigo O. C. Moreira(\*)**  
**CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A.**

**Marco Túlio A. Êvo**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**

**Diogo S. C. Souza Carlos E. F. Caetano Hélder de Paula Ivan J. S. Lopes**  
**Wallace C. Boaventura José O. S. Paulino**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**RESUMO**

Neste trabalho, são apresentados resultados experimentais envolvendo técnicas de mitigação do campo magnético gerado por linhas de distribuição e transmissão subterrâneas. Experimentos foram desenvolvidos em um protótipo constituído de quatro trechos de linhas com cabos de 138 kV, percorridos por correntes de 830 A. No arranjo experimental, foram analisadas as técnicas de mitigação através da utilização de chapas metálicas, de *loops* de compensação de alto acoplamento e de canaleta de aço fechada. Assim, foi possível tanto quantificar a eficácia dessas configurações de blindagem como medir o impacto térmico da presença desses equipamentos nas proximidades da linha. Além disso, é apresentada uma tabela comparativa de diferentes técnicas de atenuação que resume os principais aspectos abordados no projeto de um sistema de blindagem, sendo eles: fator de redução do campo, impacto na ampacidade da linha e o custo.

**PALAVRAS-CHAVE**

Ampacidade, blindagem, campo magnético, linha subterrânea, medição.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os campos elétrico e magnético relacionados ao fornecimento de energia elétrica em frequências de 50 ou 60 Hz são classificados como de baixa frequência. Certamente, um número elevado de pessoas é submetido diariamente a esses campos. Dessa maneira, as possíveis consequências, sobretudo na saúde de seres humanos expostos continuamente aos campos, têm sido exaustivamente analisadas. Embora estes estudos ainda não tenham chegado a conclusões definitivas, normalmente as instituições reguladoras adotam uma postura preventiva, limitando os valores máximos permitidos de exposição (1).

Neste contexto, as linhas de distribuição e transmissão subterrâneas apresentam-se muitas vezes como casos críticos, uma vez que, principalmente por terem seus condutores instalados em distâncias mais próximas à superfície do solo quando comparadas com o sistema aéreo, podem submeter essa região a maiores densidades de fluxo magnético. Em uma situação crítica, dependendo do arranjo da linha e seu nível de carregamento, o campo magnético gerado pode ultrapassar os limites permitidos ou considerados seguros. Assim, diversos métodos foram desenvolvidos com o intuito de reduzir o campo magnético gerado pelas linhas subterrâneas (2). Contudo, a instalação desses materiais ou equipamentos nas proximidades das linhas pode influenciar a distribuição de temperatura nas vizinhanças dos condutores das fases, além de adicionar novas fontes de calor em função das perdas por efeito Joule e/ou magnéticas que ocorrem nesses dispositivos. Isso pode promover uma elevação adicional na temperatura dos condutores da linha, reduzindo, assim, a máxima corrente que pode fluir pela mesma. Logo, para se determinar a eficácia da técnica a ser empregada na blindagem do campo magnético, é preciso realizar também um estudo detalhado sobre o impacto causado na corrente permissível no sistema.

Uma importante contribuição acerca desse tema foi desenvolvida no Projeto de P&D Cemig/ANEEL D-318, intitulado "Linhas de Distribuição Subterrânea: Soluções para Mitigação de Interferências Eletromagnéticas e

(\*) Avenida Barbacena, n° 1.200 – 8º andar – Ala A2 – CEP 30.190-924, Belo Horizonte, MG, – Brasil  
Tel: (+55 31) 3506-2966 – Email: rmoreira@cemig.com.br

Monitoramento da Integridade do Isolamento, sem Comprometimento da Capacidade de Transmissão de Energia". O projeto foi realizado através de uma parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Cemig Distribuição S.A. (CEMIG-D). Diversos trabalhos (3-9) foram gerados para a divulgação das pesquisas desenvolvidas. Em (3-5) são apresentados os resultados de medição de campo magnético em uma linha de distribuição subterrânea de propriedade da CEMIG-D, a comparação entre técnicas de compensação por *loops* e a comparação de técnicas de mitigação utilizando blindagens metálicas, respectivamente. Em (6-8) são apresentadas as metodologias computacionais de cálculo de campo na presença e na ausência de blindagens. Essas metodologias foram validadas e podem ser utilizadas como ferramentas de apoio ao projeto de sistemas diversos de blindagem em linhas subterrâneas. Por fim, em (9), é apresentado um estudo térmico-magnético preliminar, retratando as primeiras medições no arranjo de teste desenvolvido no projeto de pesquisa. O trabalho (9) avalia os impactos térmicos gerados pelas tecnologias de mitigação do campo magnético, permitindo ponderar qual a melhor técnica de blindagem, associando o critério de decisão ao impacto térmico e à perda de capacidade da linha. Os resultados apresentados permitiram a validação do arranjo, garantindo a continuidade e expansão das pesquisas sobre o tema.

O presente trabalho tem como objetivo encerrar esse longo ciclo de pesquisas, apresentando os resultados finais obtidos no estudo de técnicas de mitigação de campo magnético e os respectivos impactos térmicos de cada técnica. Se comparado com (9), este trabalho expande os estudos daquele, apresentando resultados de medição nas condições de corrente nominal dos cabos subterrâneos (830 A), submetidos a um maior tempo de energização (10 h). Além disso, novos arranjos de blindagem são analisados, onde técnicas não convencionais, como os *loops* de alto acoplamento, são apresentadas e estudadas. Dentre as técnicas em estudo, pode-se listar: rearranjo dos cabos, *loops* passivos, chapas metálicas e canaleta fechada. De forma complementar, é apresentada uma análise qualitativa do custo financeiro de cada solução. Assim, este trabalho serve como fonte para auxiliar na escolha da blindagem mais apropriada para cada situação, fornecendo um sólido material de apoio aos engenheiros e projetistas de linhas subterrâneas para concessionárias e transmissoras de energia.

## 2.0 - TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

### 2.1 Rearranjo dos cabos

O rearranjo dos cabos é uma técnica utilizada na etapa inicial do projeto do sistema e pode diminuir o valor do campo com custos adicionais substancialmente baixos ou até mesmo nulos. Em linhas gerais, a configuração triangular proporciona menores níveis de campo que a horizontal e a vertical (considerando a mesma distância e profundidade dos cabos) (2). Uma redução adicional pode ser obtida diminuindo a distância entre os condutores (2). Além disso, como a intensidade do campo decai com a distância, o aumento da profundidade em que os cabos estão enterrados resultam em menores valores de campo em um mesmo ponto (2).

### 2.2 Loops de Compensação

As técnicas de compensação consistem em utilizar um ou mais cabos isolados curto-circuitados em forma de laços (*loops*), devidamente posicionados e dimensionados, de modo a permitir a circulação de corrente nos mesmos. Neste contexto, a redução do campo gerado pelas correntes nas fases é resultado do surgimento de um novo campo em oposição ao campo da linha, criado pelas correntes circulantes nos laços. A compensação pode ser passiva ou ativa, sendo que a diferença entre ambas consiste na forma com que é gerada a corrente que circula nos *loops*.

Para a compensação passiva, a corrente é gerada por meio de indução. A eficiência desta técnica depende basicamente da combinação de parâmetros geométricos e elétricos relacionados aos *loops*, tais como: a disposição dos cabos, o número de voltas, o posicionamento e parâmetros elétricos (resistência e indutância) (2). Como o acoplamento entre os *loops* e os condutores da linha é realizado pelo ar, a porcentagem de corrente induzida e, conseqüentemente, os níveis de mitigação do campo, são demasiadamente restritos. Dessa forma, uma maneira de se incrementar a eficiência na atenuação do campo é aumentar o acoplamento existente entre os *loops* e as fases com a inserção de núcleos ferromagnéticos (transformadores de corrente), como exemplificado em (10) e (11).

Por outro lado, na compensação ativa a corrente circulante no *loop* é injetada por meio de uma fonte externa. Ao contrário do que ocorre para a compensação passiva, a posição e as características elétricas dos *loops* não são parâmetros críticos para a eficiência da técnica; entretanto, posições ótimas podem ser obtidas para que a eficiência da atenuação seja alta com requisitos energéticos minimizados (12).

### 2.3 Materiais metálicos

As blindagens constituídas de materiais metálicos normalmente são formadas por placas de espessura reduzida que podem ser dispostas como uma superfície aberta (configuração aberta), ou por uma superfície que encerra certa região do espaço (configuração fechada). Nesta situação, dois fenômenos físicos distintos podem contribuir para a atenuação do campo. O primeiro diz respeito aos materiais condutivos, os quais permitem que o campo

gerado pelas correntes induzidas na blindagem se oponham ao campo da fonte. Já o segundo tem relação com os materiais ferromagnéticos, que promovem um desvio nas linhas de campo, alterando a distribuição espacial do campo magnético entre a fonte geradora e a área de interesse.

As blindagens condutivas fechadas são formadas por longos dutos de seção circular ou trapezoidal. As configurações abertas, por sua vez, são formadas por placas finas que podem ser dispostas de forma horizontal, denominada placa plana, ou por blindagens parcialmente fechadas, conhecidas como “U” invertido e “H”. A condutividade elétrica do material, as dimensões e a espessura das placas, a distância em relação à linha e o tipo de configuração adotada para a blindagem são os principais parâmetros que definem a eficácia da blindagem em atenuar o campo. Por possuírem condutividade elétrica elevada, os materiais condutivos mais empregados são o alumínio e o cobre. Vale ressaltar que, para as configurações em “U” invertido e “H”, um bom contato elétrico entre as placas é um fator fundamental para o desempenho das técnicas.

Nos casos de uso de configurações abertas de materiais ferromagnéticos, as linhas de campo não podem acompanhar um circuito fechado de material ferromagnético, fazendo-as escapar, obrigatoriamente, pelo ar, o que reduz de maneira drástica sua eficácia de blindagem. Assim, o uso de blindagens abertas de material ferromagnético leva, em geral, a menores fatores de redução de campo, se comparado com o uso da mesma técnica constituída de materiais condutivos (2). Por outro lado, as blindagens ferromagnéticas formadas por arranjos fechados são as alternativas que proporcionam maior redução da intensidade do campo magnético, podendo ter sua configuração disposta no formato cilíndrico (tubos) ou no de canaletas. A eficiência da blindagem depende, sobretudo, da permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material, além de suas dimensões.

### 3.0 - ARRANJO EXPERIMENTAL

Um arranjo experimental foi construído no Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Esse arranjo é formado por quatro trechos de linhas subterrâneas trifásicas com cabos de 138 kV, 800 mm<sup>2</sup>, Al/XLPE de dez metros de comprimento. Os cabos foram curto-circuitados em uma de suas extremidades e enterrados a 1,5 metros de profundidade, sendo três trechos dispostos numa configuração planar horizontal e um em arranjo triangular. O primeiro trecho, denominado linha I, é composto apenas pela linha subterrânea, sem qualquer dispositivo de blindagem, sendo utilizado como referência para as medições de campo e temperatura. Os demais trechos (linhas II – IV) possuem três diferentes técnicas de mitigação de campo magnético, uma em cada circuito. A linha II possui a técnica de compensação por *loops* passivos de alto acoplamento. Nesse circuito, os condutores dos *loops* (500 mm<sup>2</sup> - Al) estão acoplados magneticamente à linha por meio de transformadores de corrente. Em (4) podem ser encontrados mais detalhes do projeto e aplicação dessa técnica de compensação por *loops*. Nesse trabalho a técnica de *loops* com alto acoplamento foi denominada de “High Magnetic Coupling Passive Loop” (HMCPL) em referência a configuração proposta em (10). A linha III utiliza a técnica de blindagem aberta, composta por chapas de aço SAE 1010 em formato ‘H’. O quarto e último trecho possui um sistema de blindagem fechado, do tipo canaleta de aço SAE 1010, dentro do qual os condutores da linha são dispostos num arranjo triangular. A Figura 1 apresenta fotografias das terminações dos condutores das linhas subterrâneas, com detalhes para os condutores dos termopares utilizados, e dos transformadores de alimentação dos circuitos. Além disso, em (9) podem ser encontrados mais detalhes e fotografias do arranjo experimental.



FIGURA 1 – Fotos do arranjo experimental: (a) conexão dos cabos de energização com a linha subterrânea; (b) transformadores de energização dos circuitos.

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático do arranjo experimental utilizado, sendo possível identificar cada uma das quatro linhas e, em detalhe, os respectivos cortes transversais de cada um dos quatro trechos estudados, ilustrando as geometrias das blindagens. Por meio de um sistema de alimentação controlável formado por três variadores de tensão monofásicos, os cabos subterrâneos foram alimentados de forma a se obter a circulação de 830 A de corrente equilibrada nas três fases, representando a corrente nominal de uma linha de 200 MVA / 138 kV. O tempo de energização das linhas foi de 10 horas. Os níveis de corrente e potência das linhas foram monitorados em tempo real, por meio de um sistema de medição e de um software desenvolvido para essa finalidade. Vale destacar que, nas medições desenvolvidas, os trechos de linha foram energizados individualmente, para que não houvesse influência magnética e térmica entre os arranjos.

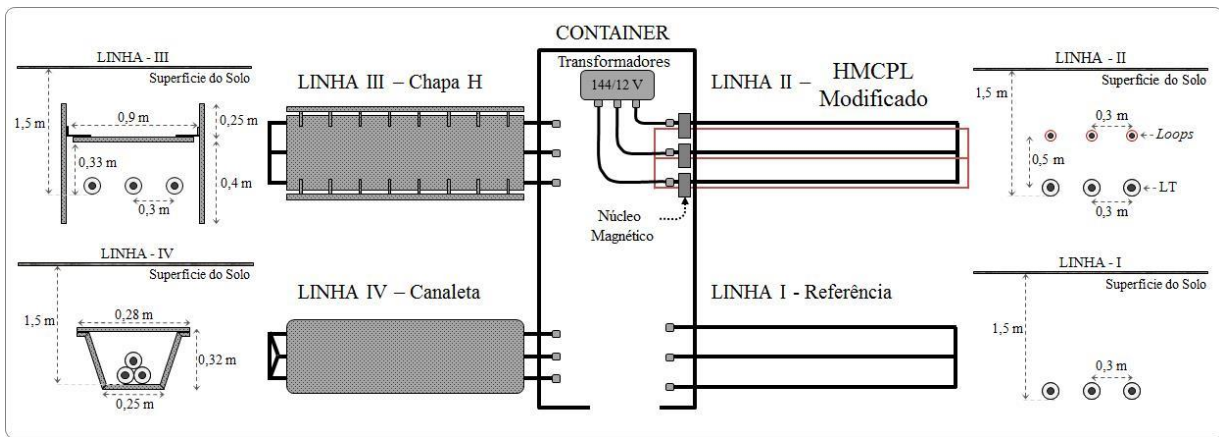


FIGURA 2 – Disposição dos 4 circuitos investigados no arranjo experimental com os respectivos cortes transversais e geometrias.

### 3.1 Estudo Magnético

As medições foram realizadas a 1,50 metros de distância do solo, ou seja, a 3,0 metros de distância dos condutores da linha, em pontos espaçados de 0,5 metro entre si, perfazendo uma região de 3 metros, em um eixo transversal ao eixo dos cabos subterrâneos. A partir das medições foi calculado um parâmetro comparativo da eficácia da blindagem, denominado Fator de Redução (FR). Esse parâmetro é calculado pela razão do campo máximo na ausência ( $B_0$ ) e na presença ( $B_m$ ) de blindagem, como mostra a equação (1).

$$FR = \frac{\max(B_0)}{\max(B_m)} \quad (1)$$

Para as configurações das linhas II e III, *loops* e chapa em “H”, a medição do campo magnético realizada no circuito de referência (linha I) foi utilizada no cálculo dos respectivos fatores de redução. No entanto, devido a inexistência de um circuito de referência com arranjo triangular, foi necessária a determinação do campo magnético gerado por esse arranjo sem a presença de blindagem. Para isso, foi simulado o circuito em trifólio com o auxílio da metodologia de cálculo apresentada em (8) e, assim, determinado o fator de redução da blindagem da linha IV, canaleta. A Figura 3 apresenta os fatores de redução medidos para as técnicas de mitigação implementadas no arranjo experimental.

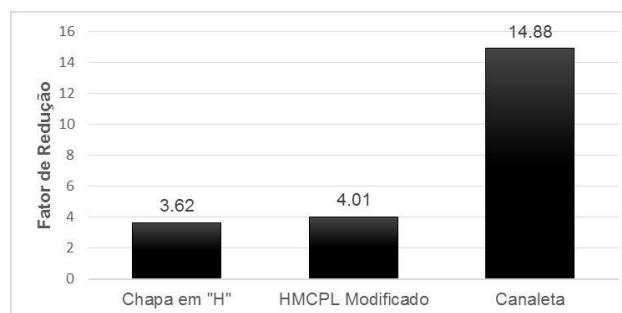


FIGURA 3 – Fatores de redução medidos para as seguintes alternativas de redução do campo: chapa em “H”, HMCPL modificado de alto acoplamento e canaleta.

Dentre as alternativas estudadas no campo de testes, a canaleta de aço fechada apresentou os maiores níveis de atenuação de campo, resultando assim, em um FR medido de 14,88. Essa maior eficiência se deve ao fato de que, devido ao confinamento das linhas de campo, as configurações fechadas proporcionam maiores níveis de atenuação do que as configurações abertas condutivas, como pode ser observado na configuração de blindagem com chapa em “H” (3,62). A blindagem por *loops* passivos de alto acoplamento (HMCPL modificado) também apresentou um elevado FR, próximo de 4,01. Esse desempenho pode ser atribuído ao fato do acoplamento magnético dos *loops* com as fases ter sido de aproximadamente 80%, resultando em correntes de compensação nos *loops* de aproximadamente 650 A. Além disso, se for comparada a atenuação do campo medido no arranjo da canaleta (linha IV) com a referência (linha I), o FR obtido foi de aproximadamente de 45. Isso se deve a combinação de duas técnicas, o rearranjo de cabos e a blindagem metálica fechada.

### 3.2 Estudo Térmico

Para o estudo da elevação de temperatura das linhas, o arranjo experimental foi instrumentalizado com termopares em diferentes pontos de sua estrutura. Foram instalados termopares no núcleo dos condutores, na blindagem

metálica do cabo (*sheath*), na capa externa dos cabos subterrâneos e no solo, permitindo uma avaliação detalhada da distribuição térmica ao longo da estrutura do cabo e no seu entorno (9).

Uma vez analisada a capacidade de atenuação de cada tipo de blindagem, avaliou-se o impacto térmico no sistema de transmissão de energia decorrente da presença desses dispositivos. Para tanto, a evolução da temperatura ao longo de 10 horas, para cada um dos 4 circuitos analisados, foi medida em diferentes pontos. A Figura 4 mostra a temperatura medida nos quatro trechos do arranjo experimental. Vale ressaltar que as curvas apresentam as médias das temperaturas dos condutores dos três cabos e dos diversos pontos de medição no solo.

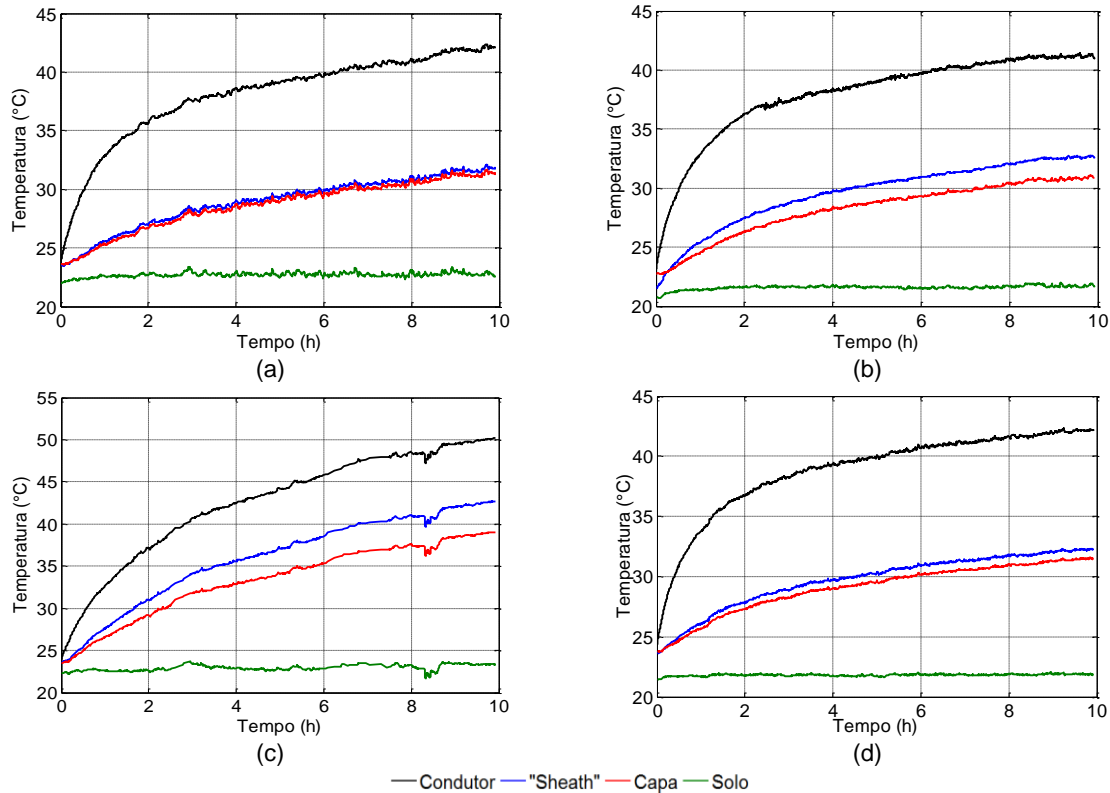


FIGURA 4 – Gráficos das medições de temperaturas no núcleo do condutor, na blindagem metálica (“sheat”), na capa e no solo para os seguintes circuitos: (a) chapa em “H”; (b) HMCPL modificado; (c) canaleta; (d) referência.

A evolução da temperatura nos pontos medidos apresentou comportamento similar nos quatro circuitos avaliados. Vale destacar que a temperatura do solo não é a mesma para todas as situações, o que pode ser explicado pelo fato das medições para cada circuito terem sido realizadas em dias diferentes. Outro aspecto importante que deve ser ressaltado diz respeito ao fato do circuito térmico não ter alcançado o regime permanente ao final das 10 horas de ensaio. Contudo, para efeito de comparação dos resultados apresentados, foi adotado um mesmo intervalo de tempo para todos os ensaios analisados. Dessa forma, para se conseguir quantificar o impacto térmico da utilização de uma técnica de mitigação, foram comparadas as curvas de elevações de temperatura no condutor, apresentadas na Figura 5.

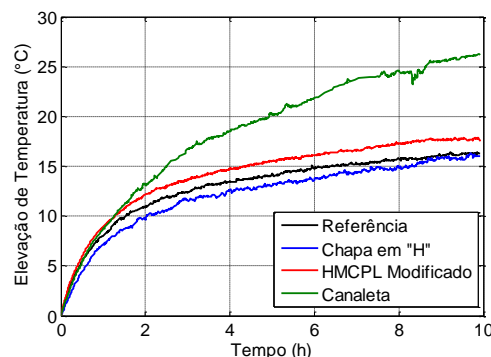


FIGURA 5 – Gráfico da medição da elevação da temperatura no núcleo do condutor para os circuitos avaliados.

Como esperado, a canaleta fechada apresentou a maior elevação de temperatura do sistema, havendo, neste caso, um aumento de 9,9 °C em relação ao valor observado no circuito de referência. Isso deixa claro que, embora essa técnica promova elevada atenuação do campo, atendendo a requisitos mais severos quanto a valores de

campo permissíveis, a mesma poderá ocasionar impactos térmicos elevados na linha, podendo resultar numa alteração da potência máxima transmissível. Os *loops* passivos produziram um sobreaquecimento significativamente menor, levando a linha a aproximadamente 1,4 °C acima da referência. Em relação à configuração em “H”, a mesma mostrou não alterar sensivelmente a temperatura do sistema para o intervalo de tempo da medição. Na realidade, o efeito da mesma foi causar um resfriamento da linha, reduzindo a temperatura do núcleo do cabo em 0,4 °C, no intervalo de tempo analisado.

### 3.3 Resultados Computacionais

A partir das metodologias apresentadas em (6-8), foram simuladas as configurações de blindagem construídas no arranjo experimental. Todavia, como discutido anteriormente, o ensaio de 10 horas não alcançou o regime permanente, impossibilitando, assim, comparações entre os valores medidos e simulados no estudo térmico. Dessa forma, foi realizada apenas a comparação dos fatores de redução obtidos, como apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – Comparação dos fatores de redução medidos e simulados dos trechos do arranjo experimental.

<i>Técnica de Mitigação</i>	<i>FR Medido</i>	<i>FR Simulado</i>
Chapa em “H”	3,6	3,5
HMCPL Modificado	4,0	4,6
Canaleta	14,9	26,9

Observando os resultados da Tabela 1, percebe-se que, com exceção do circuito com a canaleta, os valores dos fatores de redução medidos e simulados apresentaram coerência. A diferença encontrada no estudo da canaleta pode ser creditada à dificuldade na determinação precisa do valor da permeabilidade magnética do aço utilizado, tornando necessária a realização de estimativas para a determinação desse parâmetro, como discutido em (5).

### 4.0 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

Diante de todo o estudo experimental realizado no Projeto de P&D D318, foi possível a elaboração de uma tabela comparativa das técnicas de mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Essa tabela resume os principais aspectos que influenciam na escolha da blindagem, sendo eles: o fator de redução do campo; o impacto térmico na linha e o custo financeiro para a implementação de cada solução. Os valores apresentados são referentes a uma linha na configuração planar (Figura 2 – Linha I), com cabos de 138 kV, 800 mm<sup>2</sup>, ou seja, mesma configuração dos trechos construídos no arranjo experimental. Dessa forma, buscou-se comparar todas as técnicas de mitigação estudadas em trabalhos anteriores (4-9), como listado na Tabela 2.

TABELA 2 - Técnicas de mitigação de campo magnético analisadas no Projeto de P&D D318.

<i>Técnicas de Mitigação</i>	<i>Configurações</i>
(i) Rearranjo dos cabos	▪ Trifólio
(ii) Blindagens metálicas abertas	▪ Chapa plana ▪ Chapa em “U” invertido ▪ Configuração em “H”
(iii) Blindagem metálica fechada	▪ Canaleta
(iv) <i>Loops</i> passivos de compensação	▪ Arranjo com 1 volta ▪ Arranjo com 8 voltas ▪ HMCPL Original (11) ▪ HMCPL Modificado

A Figura 6 apresenta os detalhes das geometrias das outras configurações de blindagens metálicas abertas que não foram construídas no arranjo experimental, sendo elas: chapa plana e em “U” invertido. O material considerado no estudo dessas chapas foi o mesmo aço utilizado na configuração em “H”.



FIGURA 6 – Geometria e dimensões das chapas metálicas: (a) plana; (b) “U” invertido.

Na Figura 7 são mostradas as geometrias das configurações de *loops* de baixo acoplamento que também foram analisadas nesse estudo. Foi avaliada a variação do número de voltas dos *loops* e o seu efeito na eficiência da blindagem. Dessa forma, foram simulados os arranjos com 1 e 8 voltas, com os condutores dos *loops* (240 mm<sup>2</sup> – Cu) dispostos a 35 centímetros das fases.

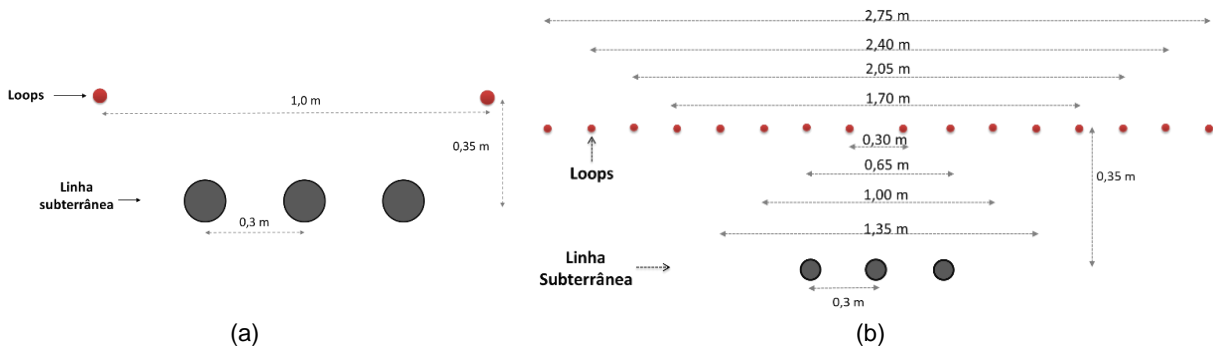


FIGURA 7 – Disposição dos arranjos de *loops* passivos de baixo acoplamento: (a) 1 volta; (b) 8 voltas.

Para completar o estudo dos *loops* de compensação, foi analisada a configuração do HMCPL proposta por (11). Nessa técnica, foram dispostos quatro condutores dos *loops* no entorno de cada uma das fases, como mostrado na Fig. 8 (a). Os *loops* foram acoplados magneticamente às fases através de núcleos magnéticos, sendo considerado um acoplamento de 95% entre os circuitos. A Figura 8(b) apresenta uma fotografia da montagem dessa configuração. Contudo, para efeito de comparação entre as técnicas, os valores do FR e do impacto na ampacidade foram apenas simulados, considerando-se o arranjo da linha subterrânea energizada com 830 A.

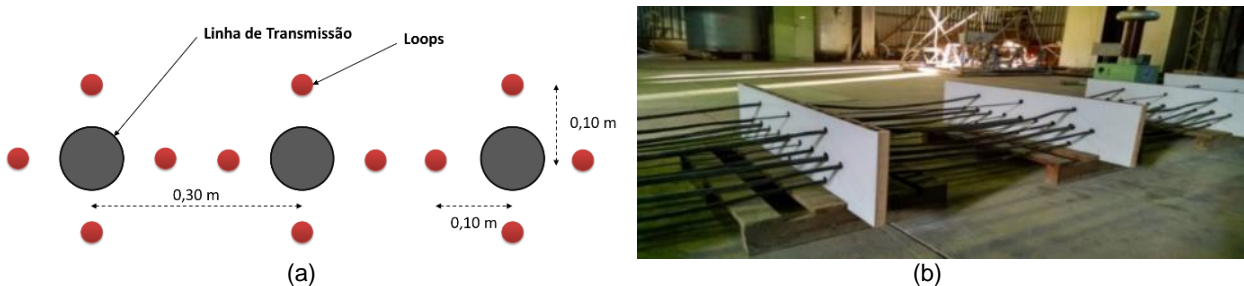


FIGURA 8 – Arranjo HMCPL: (a) dimensões da configuração; (b) fotografia do arranjo montado no LEAT.

A análise das configurações apresentadas levou os autores a desenvolver um guia de projeto de blindagens de campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Esse guia é sintetizado na Tabela 3, na qual são descritos os valores simulados dos fatores de redução e da perda na capacidade nominal em regime permanente de condução de corrente da linha. Além disso, a tabela exibe uma análise qualitativa dos custos. Para essa análise, foram considerados os gastos com materiais e instalação. Vale destacar que o custo é representado através de um índice (\$) e pode ser compreendido como uma comparação de proporcionalidade de preço estimado.

TABELA 3 – Comparação dos resultados obtidos para as principais técnicas de mitigação.

Técnicas de Mitigação	Fator de Redução	Perda na Ampacidade (%)	Custo Financeiro
Trifólio	1,4	9,7	NA
Chapa Plana	1,2	1,7	\$
Chapa em "U" invertido	2,9	5,8	\$\$
Chapa em "H"	3,5	4,6	\$\$
Loop passivo (1 volta)	1,4	0,3	\$
Loop passivo (8 voltas)	2,5	0,6	\$\$
HMCPL Modificado	4,6	8,1	\$
HMCPL Original	20,0	9,6	\$\$
Canaleta	26,9	4,0	\$\$\$

As configurações do HMCPL original e da canaleta apresentaram os maiores fatores de redução e também foram atribuídos a elas os maiores custos. Isso é devido ao fato dessas blindagens apresentarem maior complexidade na sua instalação e maior uso de materiais metálicos, sendo assim, indicadas para situações nas quais elevadas atenuações do campo devem ser alcançadas. Dentre as blindagens por chapas metálicas, percebe-se que as configurações em "U" invertido e em "H" são mais eficazes que a configuração plana, pois, neste caso, essas blindagens confinam melhor o campo devido às suas geometrias e a maior quantidade de material, justificando, portanto, o maior custo em relação a chapa plana. Com relação a técnica de compensação por *loops*, nota-se que a inclusão do núcleo magnético proporciona níveis maiores do FR na comparação com o arranjo com maior número de voltas; 4,6 e 2,5, respectivamente. Dessa maneira, o custo adicional da presença do núcleo pode ser viabilizado pela utilização de comprimentos menores dos *loops*.

Além disso, os resultados obtidos mostraram que todas as configurações com maiores FR foram as que causaram maior perda na capacidade de condução de corrente. Apesar da canaleta ter apresentado apenas 4% de perda na

ampacidade, o impacto térmico do arranjo trifólio deve ser associado a esta, uma vez que, para viabilizar o uso da técnica, os cabos são dispostos nesse formato. É importante destacar, também, que o impacto térmico do *loop* com alto acoplamento pode ser atenuado afastando os cabos do *loop* dos condutores da linha. Isso é possível, pois, todo o acoplamento é realizado com a inserção de um núcleo magnético, ou seja, a posição do *loop* não interfere na corrente induzida.

Em relação a configuração em “H”, foi observado um comportamento inesperado. Os resultados do arranjo experimental indicaram que essa geometria funcionou como um dissipador térmico, não impactando na ampacidade. Contudo, nas simulações obteve-se aproximadamente 4,6% de redução na corrente admissível do sistema. Apesar do conflito, a informação de medição ainda não é conclusiva, visto que, mesmo com a medição de 10 horas de duração, o transitório térmico não foi plenamente superado. É possível observar, na Figura 5, que no período final da medição, os valores de temperatura da configuração em “H” apresentaram tendência de elevação maior que o circuito de referência, dando indício de que a técnica irá impactar na ampacidade. Novos ensaios com maior duração serão realizados, objetivando alcançar o regime permanente da temperatura e sanar as dúvidas ainda existentes.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo experimental detalhado acerca da eficácia de diferentes métodos de blindagem do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Para isso, foram utilizados quatro trechos de linhas com cabos de 138 kV, 830 A, onde foi possível caracterizar a capacidade de mitigação e o impacto térmico correspondente de três métodos de blindagem: placas metálicas na configuração “H”, HMCPL modificado e canaletas fechadas de material ferromagnético. Além disso, este artigo reuniu informações de um longo estudo sobre técnicas de blindagem, fornecendo um sólido material para orientação de projetos de linhas subterrâneas que necessitem de atenuação do campo magnético.

Os resultados experimentais mostraram que a canaleta fechada é a que proporciona os maiores níveis de atenuação do campo, atingindo um fator de redução de aproximadamente 15 vezes. No entanto, essa configuração foi também aquela que promoveu o maior sobreaquecimento na linha, levando o condutor central a uma temperatura 9,9 °C superior àquela do circuito de referência. Dessa maneira, embora essa solução possa reduzir drasticamente o campo magnético da linha, atendendo a aplicações críticas, deve-se estar consciente do ônus térmico associado. Os *loops* passivos apresentaram, aproximadamente, um FR de 4. Por outro lado, a técnica dos *loops* sobreaqueceu menos a linha, elevando sua temperatura em apenas 1,4 °C acima daquela medida no circuito de referência. Por fim, a blindagem utilizando as chapas em “H”, que, apesar de produzir a menor atenuação do campo magnético (dentro os métodos aqui avaliados experimentalmente), representa a técnica que menos impactou termicamente o sistema para o tempo analisado. Esses resultados foram confrontados com valores calculados e observou-se significativa concordância entre eles.

Dessa forma, a mesma metodologia de cálculo foi aplicada para as condições nominais de operação da linha em análise, na intenção de comparar todas as técnicas de blindagem estudadas até o presente trabalho. A Tabela 3 apresentou os resultados desse estudo avaliando: o fator de redução, a perda na ampacidade e o custo. Essa tabela poderá ser utilizada como ferramenta de apoio a novos projetos, onde a escolha da solução a ser aplicada dependerá das necessidades específicas e da relação de compromisso entre os fatores listados.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Disponível em: <http://www.icnirp.de/documents/LFgdl.pdf>, 2010. [Online].
- (2) CIGRÉ Working Group C4.204, "Guidelines for mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems, TB 373," 2009.
- (3) R. O. C. Moreira, I. J. S. Lopes, H. de Paula, M. T. A. Êvo, D. S. C. Souza, "Avaliação teórico-experimental de campos magnéticos nas proximidades de linhas de transmissão subterrâneas," *XV ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré*, Foz do Iguaçu, Maio de 2013.
- (4) D. S. C. Souza, M. T. A. Êvo, G. E. Vieira, C. E. F. Caetano, A. S. Miranda, J. O. S. Paulino, H. de Paula, I. J. S. Lopes, "Estudo Experimental de técnicas de blindagem de campo magnético produzidas por linhas de distribuição subterrâneas de 138 Kv," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2014*, Foz do Iguaçu, Abril de 2014.
- (5) D. S. C. Souza, M. T. A. Êvo, C. E. F. Caetano, H. DE Paula, I. J. S. Lopes, R. O. C. Moreira, "Avaliação teórico-experimental de sistemas de blindagem de campos magnéticos nas proximidades de linhas subterrâneas," *XVI ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré*, Puerto Iguazu, Maio de 2015.
- (6) M. T. A. Êvo, D. S. C. Souza, H. de Paula, I. J. S. Lopes, R. C. Mesquita, R. O. C. Moreira, "Avaliação computacional da eficiência de blindagem do campo magnético gerado por linhas de transmissão subterrânea," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2014*, Foz do Iguaçu, Abril de 2014.
- (7) D. S. C. Souza, H. de Paula, I. J. S. Lopes, M. T. A. Êvo, "Modelagem e análise de loops para a mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas," *MOMAG 2016 – 12º CBMag: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Porto Alegre, Julho de 2016.



- (8) M. T. A. Êvo, H. de Paula, I. J. S. Lopes e D. S. C. Souza, "A thermomagnetic approach to evaluate the effectiveness of magnetic field shielding of underground lines," *Paper presented at the 19th International Symposium on High Voltage Engineering ISH*, Pilsen, Czech Republic, 2015.
- (9) R. O. C. Moreira, D. S. C. Souza, H. de Paula, V. C. da Costa, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, J. O. S. Paulino, G. C. Miranda, "Avaliação experimental do impacto térmico de técnicas de blindagem de campo magnético na ampacidade de linhas subterrâneas," *XXIII SNTTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz de Iguaçu, Outubro de 2015.
- (10) M. L. Murta, "Blindagem Ativa para Campos Magnéticos de Baixa Frequência", Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- (11) A. Canova e L. Giaccone, "A Novel Technology for Magnetic-Field Mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp 1625 – 1633, Julho 2011.
- (12) P. C. Cruz, C. Izquierdo, M. Burgos, L. Ferrer, F. Soto, C. Llanos, "Magnetic field mitigation in power lines with passive and active loops," Session 36-107, Paris: Cigré , 2002.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Rodrigo Otávio Carneiro Moreira.** Nascido em 1960 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro Eletricista pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Especialização em Gestão Estratégica (2000) e em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência (2005), e Mestrado (2011) todos pela UFMG. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos da Cemig Distribuição.



**Marco Túlio Alves Êvo** - Nasceu em Patos de Minas (MG) em 13/11/1987. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais, em 2011, onde obteve, também, o título de Mestre em 2014. Desde 2014 é Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del Rei. Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Compatibilidade Eletromagnética e Eletromagnetismo aplicado.



**Diogo Sampaio Cesar Souza** nasceu em Belo Horizonte, MG, em 17/05/1990. Possui graduação (2012), mestrado (2015), e atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É pesquisador associado dos laboratórios de Compatibilidade Eletromagnética (LCE/UFMG) e Extra Alta Tensão (LEAT/UFMG). Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Alta Tensão e Compatibilidade Eletromagnética.



**Carlos Ermídio Ferreira Caetano** nasceu em Piumhi – MG, em 1988. Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação (2015) e atualmente é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ambos na UFMG. É pesquisador associado dos laboratórios de Compatibilidade Eletromagnética (LCE/UFMG) e Extra Alta Tensão (LEAT/UFMG). Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Compatibilidade Eletromagnética, Instrumentação, Descargas Atmosféricas e Proteção.



**Hélder de Paula** nasceu em Uberlândia – MG, em 1975. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1998, pela Universidade Federal de Uberlândia. Obteve os títulos de Mestrado e Doutor em 2001 e 2005, respectivamente, nesta mesma instituição. Desde 2006 integra o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, tendo como áreas de atuação: Compatibilidade Eletromagnética, Modelagem de equipamentos para fenômenos transitórios/alta frequência e Acionamentos Industriais.



**Ivan José da Silva Lopes** nasceu em Santa Bárbara - MG, em 19/03/1965. Graduou-se em Engenharia Elétrica e recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em 1987 e 1990, respectivamente. Em 2001, recebeu o título de Ph.D. em Engenharia Elétrica e de Computação pela University of Waterloo, Canadá. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, desde 1992. Sua área de atuação inclui a engenharia de alta tensão e suas aplicações, materiais dielétricos e isolamento elétrico, e compatibilidade eletromagnética.



**José Osvaldo Saldanha Paulino.** Nasceu em Belo Horizonte, MG, em 09/03/1957. Possui graduação em Engenharia Elétrica (1979) e mestrado em Engenharia Elétrica (1985), ambos pela UFMG, e doutorado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP (1994). É professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais. Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Alta Tensão, Compatibilidade Eletromagnética, Descargas Atmosféricas e Proteção. É bolsista de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora nível 2 do CNPq.



**Wallace do Couto Boaventura** nasceu no Brasil em 14/07/1965 em Carmo do Paranaíba - MG. Possui graduação (1988) e mestrado (1990) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas (UNICAMP), em 2002. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1992. Suas áreas de pesquisa incluem compatibilidade eletromagnética e processamento de sinais aplicados aos sistemas elétricos de potência.