



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS PARA CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICO E
MAGNÉTICO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

**João Henrique Magalhães Almeida (*)
CEMIG D/ENPROL**

**Edino Barbosa Giudice Filho
CEMIG D**

**Rodrigo Otávio Carneiro Moreira
CEMIG D**

**Sandro de Castro Assis
CEMIG D**

**Yasmine David Jorge Fonseca
CEFET MG**

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia utilizada pela CEMIG Distribuição (CEMIG D) para realização dos cálculos e medições de campos elétricos e campos magnéticos das linhas de transmissão aéreas e subterrâneas de 138 kV contemplando as situações críticas e complexas de paralelismo que o extenso sistema da CEMIG D possui. Também é apresentada a estratégia utilizada para determinação dos níveis de campos elétricos e magnéticos nas subestações da CEMIG D, em atendimento à Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de maio de 2010.

PALAVRAS-CHAVE

Campos elétricos e magnéticos, Corredores de linhas de transmissão, Linhas subterrâneas, Estratégia para cálculo, Resolução normativa nº 398 de maio de 2010.

1.0 - INTRODUÇÃO

Devido ao grande número de linhas de transmissão e subestações do sistema CEMIG D e o curto prazo estabelecido para cumprimento da Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de maio de 2010, foi necessária a elaboração de estratégias para atacar o problema em toda sua extensão, contemplando a coordenação e execução dos trabalhos de mensuração dos níveis de campos elétricos e campos magnéticos.

Na elaboração da estratégia foi necessário identificar diversas situações existentes no sistema que aumentaram a complexidade da análise do mesmo, apresentando casos que exigiram realizar uma modelagem eficaz para execução dos cálculos e ao mesmo tempo uma logística para realização das medições.

Para o auxílio das estratégias desenvolvidas, houve a necessidade da elaboração de ferramentas dedicadas para o tratamento da grande massa de dados e informações em tempo hábil, necessárias para a modelagem dos cálculos, para programação das medições e tratamento dos resultados obtidos.

Inicialmente, este trabalho consiste na descrição da estratégia utilizada para linhas de transmissão, seguindo as metodologias utilizadas para cálculos e medição, bem como um estudo de caso que compara ambos resultados, tanto em linhas aéreas quanto em linhas subterrâneas.

Posteriormente é relatada a estratégia utilizada no amplo programa de coordenação entre as medições e modelagens das subestações para os cálculos realizados.

(*) Avenida Barbacena, nº 1200 – Andar 11 - Bloco A1 – CEP 30.190-131 Belo Horizonte, MG, – Brasil
Tel: (+55 31) 3506-2163 – Fax: (+55 31) 3506-2948 – Email: joaohenriquema@gmail.com.br

2.0 - LINHAS TRANSMISSÃO

A mensuração dos campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão deve levar em consideração as diversas situações que essas podem apresentar ao longo de toda sua extensão, portanto, o cálculo dos campos deve levar em conta as características dos trechos da linha que determinam as condições mais críticas. Tais condições podem ser geradas por linhas individuais, situações de paralelismo em corredores de linhas de transmissão, cruzamentos entre diferentes linhas de transmissão, além de locais onde existem linhas de transmissão subterrâneas. Em virtude das linhas de transmissão serem instalações de grande extensão, os níveis dos campos elétricos e magnéticos variam significativamente ao longo do comprimento da mesma, sendo necessária uma análise crítica na determinação dos mesmos.

2.1 Linhas de transmissão aéreas

O cálculo dos campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão aéreas tem como base a metodologia de simulação de cargas e a Lei de Biot-Savart, respectivamente, usando o princípio da superposição em um plano bidimensional, apresentado em [1]. Tal metodologia foi aplicada e comparada com [2].

O campo elétrico nas proximidades das linhas de transmissão de corrente alternada é calculado supondo que não existam cargas livres no espaço. A terra é tida como um condutor perfeito, já que o tempo para redistribuição de cargas na superfície da terra sob a ação da variação do campo elétrico é extremamente pequena, se comparado à frequência dos sistemas de potência. O campo magnético em linhas de transmissão é calculado usando uma análise em duas dimensões supondo que as linhas sejam paralelas sobre um solo plano.

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

Rotinas computacionais foram implementadas no ambiente oferecido pela *Microsoft®* em apoio ao pacote *Office, Visual Basic For Application®*, para construção dos procedimentos que permitissem uma maior eficiência da modelagem do problema para realização dos cálculos. Tal trabalho foi realizado após a identificação da necessidade de se desenvolver uma ferramenta dedicada que pudesse realizar análises envolvendo um elevado número de linhas de transmissão e situações de paralelismos diversos, requerendo a implantação de um processo rápido e confiável. Além disso, tal ferramenta permite o gerenciamento das informações processadas com grande agilidade, facilitando verificações posteriores aos cálculos realizados.

Para gerenciamento dos casos executados para realização dos cálculos das linhas de transmissão, foi criada uma lista das subestações do sistema CEMIG, as mesmas são ordenadas de forma a orientar os possíveis paralelismos existentes, de acordo com a quantidade de linhas existentes nas subestações. A Figura 1 apresenta a interface do programa utilizado para execução dos cálculos.

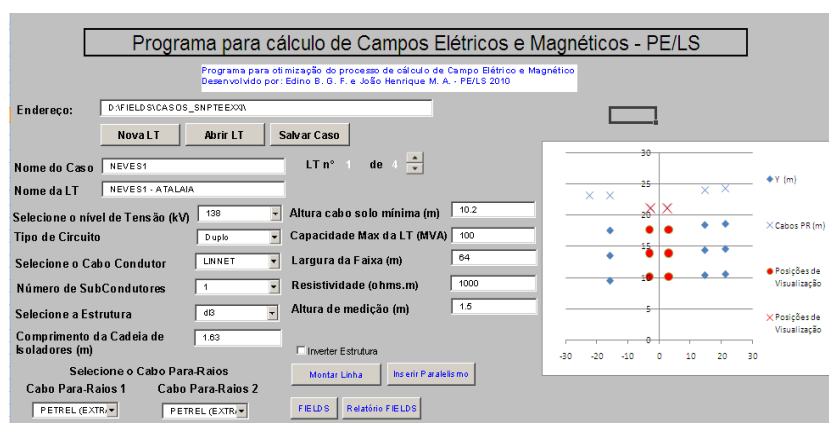


Figura 1 – Interface da aplicação criada para realização dos cálculos.

Para validação das rotinas implementadas foi realizado um programa de medições em corredores de linhas de transmissão aéreas, visando identificar os pontos que apresentassem os maiores níveis de campos elétricos e magnéticos. Buscaram-se pontos de grandes concentrações de linhas de transmissão. Tais situações ocorrem com maior frequência nas proximidades das subestações. Grandes corredores de linhas de 138 kV em condição de paralelismo ocorrem nas regiões metropolitanas. Portanto, com o objetivo de avaliar as situações mais críticas de campos elétricos e magnéticos produzidas por linhas do sistema CEMIG D, foram realizadas modelagens visando tais regiões. A seguir é apresentada uma análise de um caso tomado como exemplo para representar a metodologia desenvolvida.



Figura 2 – Local em que foram realizadas medições de campo elétrico e magnético. O vão em questão possui um paralelismo de 5 linhas de 138 kV nas proximidades da SE Neves 1.

As medições foram realizadas em um vão do corredor de linhas nas proximidades da subestação Neves1, onde se encontram as linhas de transmissão Neves1–Cinco, Neves 1–Atalaia LT1, Neves1–Atalaia LT2, Neves 1- Adelaide LT1, Neves1-Adelaide LT2. A Figura 2 é mostra este vão.

Após a realização das medições e comparação com os cálculos realizados, mostrados nas figuras 3, 4 e 5, foi definido que a mensuração dos campos elétricos e magnéticos para as linhas de transmissão aéreas e subterrâneas seriam realizadas através das metodologias de cálculo implementadas.

2.1.1 Medição e simulação de campo elétrico em linhas aéreas

A Figura 3 (a) apresenta o perfil do campo elétrico no corredor de linhas mostrado na Figura 2. Conforme pode ser observado, os cálculos e as medições apresentam uma forte correlação. A Figura 3 (b) apresenta em um mesmo gráfico, as curvas de campo elétrico individualmente de cada linha de transmissão (sem considerar a influência das outras linhas) e o campo resultante. Este resultado ressalta a importância de se avaliar as condições de paralelismo, ao comparar os valores dos campos elétricos considerando o acoplamento entre as linhas, com as mesmas tendo os cálculos realizados individualmente.

Para realização das simulações foram medidas as alturas cabo solo no momento da medição dos campos, posteriormente foram coletados os dados de tensão no momento em que as medições de campo elétrico ocorreram.

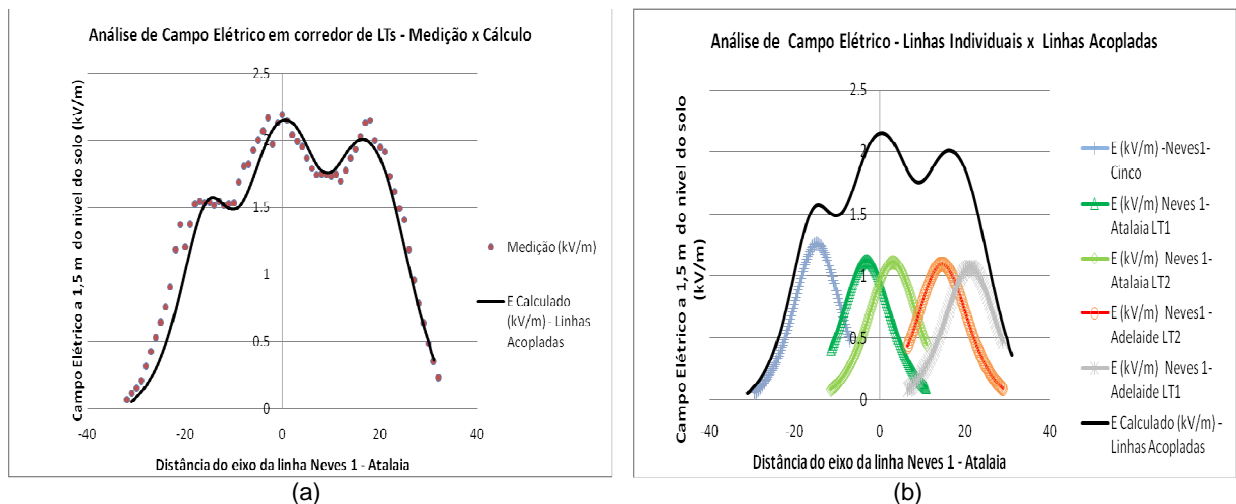


Figura 3 – Análise do campo elétrico no corredor de linhas próximas a SE Neves1. Na figura (a) os pontos representam as medições realizadas em um eixo perpendicular à faixa de servidão, a curva cheia em azul é resultado do calculo realizado. A figura (b) apresenta, nas curvas com marcadores, o perfil do campo elétrico para cada linha, sem consideração do paralelismo. A linha sem marcador é o perfil do campo considerando o acoplamento das linhas no corredor em questão.

Pode-se observar através da Figura 2 que a vegetação local apresenta variações ao longo do eixo da medição, ora bastante altas, ora rasteira, sendo este um importante fator para apresentar as discrepâncias em determinados pontos, entre a simulação e a medição, como podem ser observadas na Figura 3 (a). Pode-se ver que os valores de campos elétricos medidos e calculados estão inferiores ao valor de 4,17 kV/m, a 1,5 metros do nível do solo, estabelecido para o público geral pela Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de Maio de 2010. Ressalta-se ainda que o valor máximo permitido pela resolução dentro da faixa de servidão é de 8,33 kV/m.

2.1.2 Medição e simulação de campo magnético em linhas aéreas

Da mesma forma como foi realizada a análise para o campo elétrico, a Figura 4 (a) apresenta o perfil do campo magnético do corredor de linhas em questão, pode-se comparar os resultados das medições com os cálculos realizados. A Figura 4 (b), compara os valores dos campos magnéticos quando se leva em conta o acoplamento entre as linhas e quando as mesmas têm cálculo realizado individualmente.

Para realização das simulações foram utilizados, além das informações comuns à análise do campo elétrico, dados dos carregamentos das 5 linhas em questão. Através dessas informações obteve-se os valores e o sentido das correntes.

Ao observa a Figura 4 (b), nota-se a relevância da consideração do paralelismo da linhas de transmissão na determinação do valores máximos do campo magnético ao longo da faixa de servidão, devido à superposição das componentes de cada linha. É importante frisar que os valores de campo magnético medidos e calculados estão muito aquém do valor máximo de 83 μT , a 1,5 metro do nível do solo, estabelecidos pela Resolução Normativa nº 398 de Maio de 2010. Ressalta-se ainda que o valor máximo permitido pela resolução, dentro da faixa de servidão é de 416,67 μT .

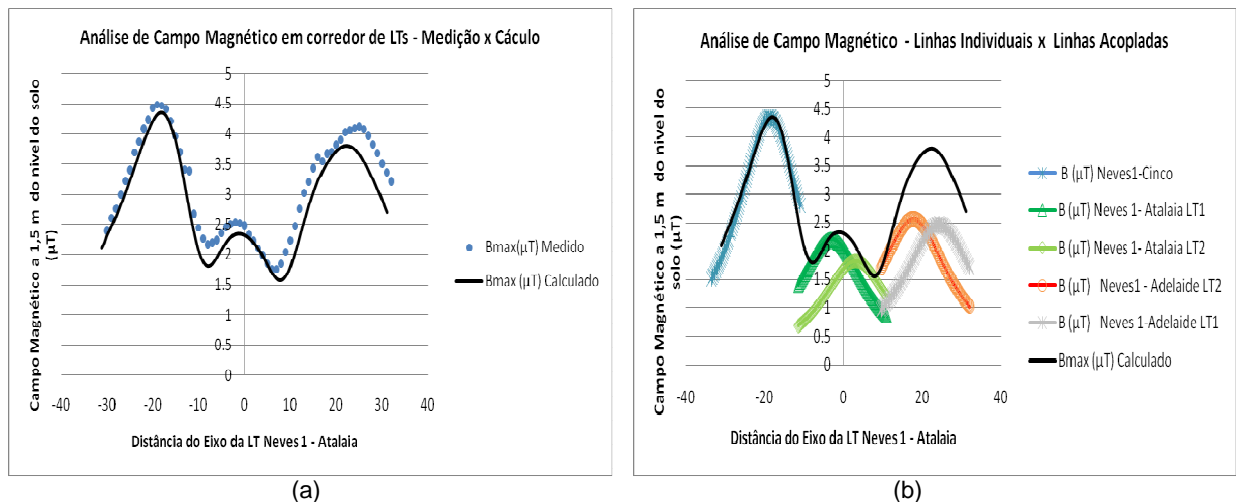


Figura 4 - Análise do campo magnético no corredor de linhas próximas a SE Neves 1. Na figura (a) os pontos representam as medições realizadas em um eixo perpendicular à faixa de servidão. As curvas representam o resultado das simulações realizadas, sendo que a curva em vermelho considera o acoplamento entre as linhas de 138 kV. A figura (b) apresenta, nas curvas com marcadores, o perfil do campo magnético para cada linha, sem consideração do paralelismo. A linha sem marcador é o perfil do campo considerando o acoplamento das linhas no corredor em questão.

2.2 Linhas de transmissão subterrâneas

Para as linhas subterrâneas foram tratados apenas os campos magnéticos, dada sua construção, que confina os campos elétricos. Foi utilizada uma ferramenta computacional semelhante à adotada para as linhas de transmissão aéreas, baseada em [3] e comparada com [4].

Nos casos avaliados, não há no sistema CEMIG D situações em que se encontre linhas subterrâneas em corredores de linhas de alta tensão ou mesmo em situação de proximidade suficiente para que haja influência nos valores medidos ou calculados.

No desenvolvimento do trabalho, as diferenças apuradas entre os valores medidos e calculados, são decorrentes de fatores como o 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, presença de materiais ferromagnéticos enterrados no eixo das medições, como redes de abastecimento de água e tubulações de ramais subterrâneos de energia elétrica, correntes circulantes na blindagem dos cabos, já que os lances de *cross bonding* apresentam trechos com pequenas

diferenças de comprimento e cujas correntes não foram medidas, a influência dos campos das redes de baixa e média tensões de distribuição localizadas no limite das calçadas. Estas imprecisões tornam-se relevantes face às reduzidas distâncias existentes entre a fonte de campo (linha subterrânea) e os pontos de medição, ao nível do solo e a 1,5 metros de altura, para a profundidade adotada de 1,5 metros, conforme documentação de projeto da instalação.

Para o caso em questão, foi medido o campo magnético de uma linha de transmissão subterrânea em cabos OF, formação plana horizontal e sistema de aterramento *cross bonding*, com dados de corrente de carga fornecidos pelo centro de operação a intervalos de 15 minutos. Na figura Figura 5 são apresentados os resultados.

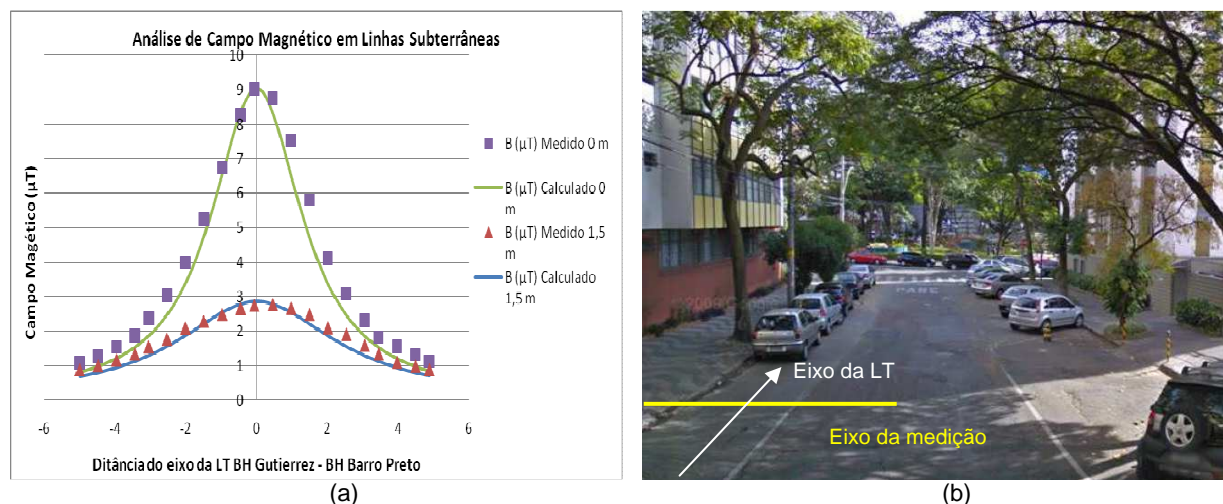


Figura 5 – Análise dos campos magnéticos de uma linha subterrânea. A figura (a) mostra os resultados das medições e cálculos realizados, sendo que as curvas sólidas representam o perfil calculado a 0 m e a 1,5 metros acima do nível do solo, os triângulos e quadrados os pontos medidos a 0 m e a 1,5 metros acima do nível do solo, respectivamente. A figura (b) é uma fotografia do local onde as medições foram realizadas.

3.0 - SUBESTAÇÕES

As subestações são consideradas áreas de risco, devido aos equipamentos que trabalham energizados com alta tensão e carregamento nos vários elementos. Os equipamentos dentro de uma subestação estão confinados dentro de uma área limitada, fazendo com que os vários elementos como barramentos, disjuntores, transformadores, chaves, suportes, etc., fiquem próximos uns aos outros. Tal característica torna os níveis de acoplamento entre os diversos componentes, relevantes.

Observando tais detalhes, verifica-se que a mensuração dos campos elétricos e magnéticos dentro e nos arredores de uma subestação é uma tarefa que exige modelagem bastante complexa. Para atender às exigências estabelecidas pela Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de Maio de 2010 a CEMIG D adotou procedimentos que procuraram aliar um programa de medições paralelamente às modelagens para realização de cálculos. Utilizar as duas alternativas foi necessário devido ao grande número de subestações a serem analisadas em um curto espaço de tempo.

O processo de medição requer equipamentos específicos, calibrados e aferidos por entidades reconhecidas além de equipe capacitada, o que torna a disponibilidade dos mesmos limitada. Considerando a quantidade de instalações localizadas em diversos pontos dispersos em todo estado de Minas Gerais, como pode ser visto na Figura 6, e as restrições de medidores e equipe, as medições de campos elétricos e magnéticos para todas as subestações tornou-se inviável. Para viabilizar o processo de mensuração dos campos no tempo requerido, foram definidos critérios que classificaram as instalações a serem medidas e as instalações a serem modeladas para a realização dos cálculos.

As subestações situadas na região metropolitana e no triângulo mineiro foram previamente classificadas como instalações que deveriam ter a mensuração dos campos medidas. Isso devido à maior complexidade que a maioria delas apresenta, possuindo pátios grandes com várias linhas chegando e saindo de seus barramentos. Outro fator que favoreceu a realização das medições em tais regiões é a alta concentração de subestações em uma área relativamente pequena, simplificando a logística.

Subestações menores, com poucas linhas de transmissão, situadas normalmente na periferia do sistema CEMIG, foram classificadas para modelagem e cálculos. Esta estratégia permitiu um avanço no quantitativo das SEs

calculadas e a elaboração gradual de um banco de dados dos arranjos padronizados das subestações para cálculos. Além disso, por serem subestações situadas na periferia do estado de Minas Gerais, estas apresentam uma maior dificuldade de logística para o programa de medições.

Para a realização dos cálculos foi utilizado o software SEFields [5], que permite a modelagem tridimensional, adequada ao problema. Para o programa de medições foi utilizado o instrumento analisador de campos elétrico e magnético EFA-300, fabricado pela Narda Safety Test Solutions GmbH, calibrado e aferido pela mesma em 2010.

Após esta etapa foi elaborada uma lista das subestações, ordenadas por complexidade/tamanho. As subestações menores estão sendo modeladas enquanto as maiores sendo medidas.



Figura 6 – A imagem mostra as subestações do sistema CEMIG no estado de Minas Gerais.

4.0 - CONCLUSÃO

Foi possível verificar através deste trabalho que os modelos utilizados para os cálculos dos campos elétricos e magnéticos nos corredores de linhas de transmissão aéreas foram bastante fiéis às medições realizadas. Além disso, os níveis de campos elétricos e magnéticos estão muito aquém dos estabelecido pela Resolução Normativa nº 398, principalmente nas áreas fora da faixa de servidão.

Na análise dos campos das linhas subterrâneas, observa-se uma forte correlação dos pontos medidos e os cálculos realizados. É constatado ainda que as linhas de transmissão subterrâneas de 138 kV do sistema CEMIG D possuem campos magnéticos muito inferiores ao máximo estabelecido pela Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de maio de 2010.

De uma forma geral, o desenvolvimento das aplicações para cálculos e gerenciamento das linhas de transmissão de 138 kV do sistema CEMIG D se mostrou eficiente e confiável, o que permitiu que a mensuração dos campos elétricos e magnéticos fosse realizada pelas modelagens e cálculos, além do conhecimento mais detalhado dos perfis de campos dos diversos corredores existentes deste sistema.

Para as subestações decidiu-se por promover um programa de cálculo e outro de medições. Nas medições buscou-se as subestações de maior porte e complexidade, em regiões com grande concentração de carga, enquanto que nos cálculos foram priorizadas as subestações menores, permitindo uma evolução no quantitativo da mensuração dos campos elétricos e magnéticos das subestações.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, EPRI – Electric Power Research Institute, Second Edition, 1975
- [2] GUIMARAES, G. Medições e Cálculos de Campos Elétricos e Magnéticos de uma Linha de Transmissão de 500 kV - Dissertação de Mestrado nº44, UFMG, maio de 2005

- [3] Lai, G., Yang C., Huang H., Su C. - 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, JULY 2008.
- [4] Oliveira F., Estudo de Instalações de Linhas Subterrâneas de Alta Tensão com relação a Campos Magnéticos – Dissertação de Mestrado, PUC São Paulo, agosto de 2010
- [5] Assis, S. Coutinho, R., Ribeiro E., Souza L. – Cálculo de campos elétricos e magnéticos em SEs E LTs – SNPTE XXI, 2011.
- [6] Resolução Normativa nº 398 da ANEEL de 23 maio de 2010.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



João Henrique Magalhães Almeida. Nascido em 1985 em Alvinópolis, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2009. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações a serviço da CEMIG Distribuição pela da ENPROL Engenharia e Projeto LTDA.



Edino Barbosa Giudice Filho. Mestrado em Engenharia Elétrica (UFMG) e Doutorando em Eng. Elétrica (UFMG) Atualmente trabalha como engenheiro de projetos de sistemas elétricos (CEMIG) com as atividades de estudos elétricos aplicados a linhas e subestações e em pesquisa e desenvolvimento nestas áreas.



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



Sandro de Castro Assis. Nascido em 1980 em Coronel Fabriciano, MG. Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2004 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2006. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da Cemig Distribuição.



Yasmine David Jorge Fonseca. Nascida 1988 em Belo Horizonte. Estudante de engenharia elétrica pelo CEFET MG. Estagiou na CEMIG Distribuição na área de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações.