



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

BR/GLT/31  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT**

**METODOLOGIA GENERALIZADA DE CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA  
FREQUÊNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Silvio Segura Salas (\*)      Rinaldo Solera**  
**LACTEC                              ENERGISA**

**RESUMO**

As emissões de campos eletromagnéticos (CEM) produzidos por linhas de transmissão (LT) estão levantando muita polêmica na sociedade brasileira e no mundo. Nesse contexto, novos procedimentos podem requerer quantificar as emissões de CEM ao longo do percurso de uma linha e não apenas no ponto de menor distância ao solo, com abrangência além do limite definida pela faixa de segurança. Com o objetivo de proporcionar subsídios técnicos às concessionárias e à sociedade, neste trabalho relatam-se as melhorias nas técnicas de cálculo de CEMs com aumento na precisão via modelagem acurada e quantificação da indução eletromagnética em LTs.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linhas aéreas de transmissão, Campos elétrico, Campo magnético, Mitigação de Campos eletromagnéticos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A incerteza sobre os efeitos da exposição a longo prazo a CEMs produzidos por linhas de transmissão de energia elétrica de baixa frequência e de telecomunicações, na vizinhança de áreas habitadas tem ajudado a levantar muita polêmica no Brasil e no mundo inteiro. No Brasil, o caso mais recente é a ordenança do STF de reduzir as emissões de campo magnético de uma LT na região oeste da capital paulista (1). Limites de exposição humana, chamados de Restrições Básicas foram definidos pela International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2). É importante ressaltar que para baixa frequência esses limites estão baseados nos valores de corrente induzida no corpo humano e seus efeitos no sistema nervoso, e que na data, são os únicos efeitos comprovados dos CEMs de baixa frequência sobre o corpo humano (2). Níveis de referência de campos eletromagnéticos foram determinados mediante modelos matemáticos procurando garantir o atendimento às Restrições Básicas considerando as piores condições de acoplamento dos CEMs e o corpo humano. Muitos países adotaram seus próprios níveis de referência, tendo como objetivo a previsão dos efeitos dos CEMs, comprovados e possíveis, e outros por pressões públicas (3). O caso mais ressaltante é a Suíça cuja lei limita os campos magnéticos dentro de residências a 1 uT (1% do nível de referência). No Brasil esses limites são definidos na Resolução Normativa N° 398/2010 (4) e para o público em geral é de 83,33uT.

Face às pressões da sociedade por ter-se maiores detalhes técnicos do problema, visualiza-se um futuro em que seja necessário quantificar as emissões de CEMs ao longo do percurso de uma linha e não apenas no ponto de menor distância ao solo, com abrangência além do limite definido pela faixa de segurança. Atualmente, esse tipo de cálculo resultaria útil no caso de resolução de conflitos sociais. O atendimento a esses procedimentos mediante medições 'in loco' pode chegar a ser demorado e até custoso, portanto, justifica-se o investimento na melhoria de técnicas de cálculo de CEMs para apoio no projeto de novas LTs e adequações de existentes.

(\*)RUA RUBYN HEIN, 19– sala X 00 - – CEP 81560-000 Cidade Curitiba, Sigla Estado, – Paraná  
Tel: (+55 41) 3361-6904– Celular (+55 41) 8725-3980– Email: SILVIO.SALAS@LACTEC.ORG.BR

Com o objetivo de resolver parte dos problemas citados acima neste trabalho relatam-se as melhorias nas técnicas de cálculo de CEM com aumento na precisão dos resultados via modelagem mais realista das linhas e quantificação da indução eletromagnética entre condutores das LTs. Este trabalho é o resultado parcial de um projeto de P&D em parceria entre a ENERGISA e o LACTEC.

A metodologia proposta, de forma geral, considera vãos entre suportes de diferente disposição de condutores. Consequentemente, a altura das torres entre vãos pode resultar ser diferente, deslocando os pontos de mínima distância ao solo, e as distâncias de separação entre fases.

Fórmulas analíticas de CEM tem a desvantagem de consideram muitas suposições com impacto na precisão dos resultados. Nesta proposta formula-se as emissões de campo magnético a partir da integral de Biot-Savart (3D). O maior problema desse tipo de abordagem está na determinação das correntes em condutores de fases (no caso de vários condutores por fase), nos cabos de guarda e caso existir cabos de mitigação de CEMs. Para contornar esse problema foi utilizada e adaptada a proposta da referência (5), que consiste em calcular a matriz impedância de linha, e mediante simples restrições elétricas e manipulações da álgebra vetorial, encontradas as correntes induzidas em todos os condutores. A formulação do campo elétrico (3D) parte da Lei de Coulomb e do potencial elétrico da função espacial de Green, (6). Por simplicidade considera-se uma distribuição uniforme e contínua de carga nos condutores.

A precisão dos resultados foi verificada através de campanhas de medição em LTs de várias classes de tensão, configuração de torres, e adicionalmente, em vãos consecutivos.

## 2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA DE CÁLCULO DE CEM

### 2.1 Modelagem de linha

Segundo o mostrado na Figura 1 o vão de uma linha pode ser modelado considerando-se o efeito do peso do condutor por unidade de comprimento, o esforço horizontal nos seus suportes e o seu comprimento. Mediante esses parâmetros determina-se a flecha no ponto de mínima distância ao solo. De posse da flecha pode-se determinar as coordenadas de cada ponto do condutor. A equação que representa estas coordenadas é conhecida como catenária da linha:

$$y(z) = h_{\min} + (H_1 - h_{\min}) \cdot \left[ 2 \cdot \frac{z}{L + d_{1e}} - 1 \right]^2$$

As variáveis envolvidas na equação acima estão definidas na Figura 1.  $d_{1e}$  é determinado em função das alturas dos condutores nos suportes.

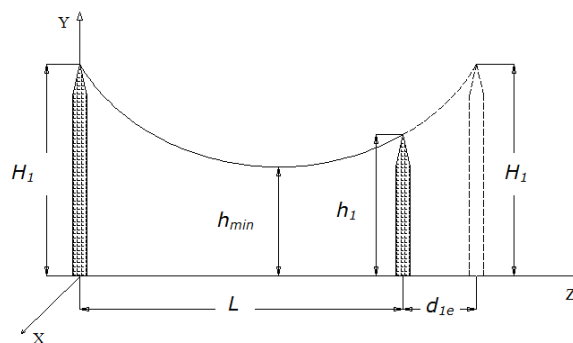


FIGURA 1 – Catenária de uma linha

Observe-se que o modelo da Figura 1 pode representar melhor uma grande diversidade de linhas, incluso no perímetro das subestações.

### 2.2 Metodologia generalizada de cálculo de campo magnético

Uma vez definida a equação da catenária, no cálculo dos campos magnéticos, a aplicação da integral de Biot-Savart está condicionada ao conhecimento das correntes instantâneas nos condutores. No caso de uma linha trifásica com apenas um condutor por fase, sem cabos de guarda, sua aplicação é direta. Entretanto, no caso geral, em que uma linha de transmissão com mais de um condutor por fase, cabos de guarda e, no pior dos casos, cabos formando uma malha de mitigação, a aplicação da Lei de Biot-Savart precisa de uma etapa de determinação das

correntes nos condutores que formam a linha. No caso de vários subcondutores por fase, o cálculo do raio médio equivalente pode ser utilizada como uma aproximação, mas tem a desvantagem de impactar no cálculo dos CEMs nas regiões mais próximas aos condutores.

O cálculo das correntes nos subcondutores da linha utiliza o conceito de acoplamentos magnéticos mútuos. Esses acoplamentos, em regime permanente, dependem das características elétricas e físicas dos condutores assim como de suas disposições no espaço. Quantitativamente a matriz impedância série da linha considera todas essas características e é determinada mediante a seguinte equação, (6):

$$\mathbf{Z} = \int_{z=0}^{z=L} \mathbf{Z}'(\omega, z) dz$$

Em que  $\mathbf{Z}'$  é a matriz impedância em função da frequência e da geometria da linha ao longo do eixo Z (Figura 1).

Adicionalmente, são consideradas as condições de contorno para os condutores, por exemplo as variações de tensão em segmentos finitos de subcondutores pertencentes a fases diferentes são iguais, isto é, a diferença de potencial elétrico em subcondutores que compoem uma mesma fase é zero. No caso dos cabos de guarda assume-se que estes encontram-se solidamente aterrados. Numericamente estas considerações são dadas por:

$$\mathbf{V}(0) - \mathbf{V}(L) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{Z}$$

Uma vez aplicado o conceito de acoplamento entre fases e as condições de contorno das tensões no início e final do vão ( $\mathbf{V}(0)$  e  $\mathbf{V}(L)$ , respectivamente) determinam-se as correntes em subcondutores de fases e cabos de guarda, representada pelo vetor  $\mathbf{I}$ . Nesse modelo são considerados as contribuições do solo e o efeito pelicular da frequência fundamental sobre a distribuição superficial das correntes.

Assumindo que para a frequência de estudo os efeitos de propagação de onda são desprezíveis e, portanto, a corrente  $\mathbf{I}$  permanece constante ao longo de um vão, então a integral de Biot-Savart pode ser escrita como:

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{I} \frac{\mu_o}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l} \times \bar{\mathbf{r}}_o(l)}{|\bar{\mathbf{r}}_o(l)|^3}$$

Em que,  $\mu_o$  é a permeabilidade do ar e é igual a  $4\pi 10^{-7}$  e  $\bar{\mathbf{r}}_o(l)$  é o vetor que representa a distância entre o ponto de cálculo de campo magnético e o centro do condutor.

A quantificação do efeito do solo sobre o campo magnético é modelada mediante o método empírico de Dubanton. Desta forma, a localização do plano espelho, na qual se reflete um condutor, é função inversa da frequência e direta da resistividade do solo. Portanto, o vetor  $\bar{\mathbf{r}}_o(l)$  refere-se a distância entre o ponto de cálculo de campo magnético e a coordenada do centro do condutor abaixo do solo. Finalmente, a aplicação do princípio de superposição do campo magnético emitido por todos os condutores da linha permite determinar o campo magnético resultante no ponto de interesse.

### 2.3 Metodologia generalizada de cálculo de campo elétrico

No método de simulação de cargas assume-se que as cargas estão concentradas no centro dos condutores segundo mostra-se na Figura 2 - (a). Para se encontrar o valor das cargas é necessário determinar-se a matriz de potencia elétrico  $\mathbf{P}$ . A função de Green é geralmente utilizada para avaliar o potencial elétrico produzido por cargas em espaço livre mediante:

$$\mathbf{V}(i) = \frac{q(i')}{4\pi\epsilon_o} \left[ \underbrace{\int \frac{d\mathbf{l}'_1}{G1}}_{C_1(i)} - \underbrace{\int \frac{d\mathbf{l}'_2}{G2}}_{C_2(i)} \right]$$

A primeira integral,  $A_{ij}$ , refere-se ao potencial devido as cargas nos condutores e depende, principalmente da geometria do condutor. A segunda integral,  $B_{ij}$ , é a contribuição das cargas no condutor imagem. Os valores de  $G1$  e  $G2$  são definidos por:

$$G1 = |\mathbf{F1}|; \quad \mathbf{F1} = (x - x') \cdot \bar{\mathbf{a}}_x + (y - y') \cdot \bar{\mathbf{a}}_y + (z - z') \cdot \bar{\mathbf{a}}_z$$

$$G2=|\mathbf{F2}|; \quad \mathbf{F2}=(x-x')\cdot\bar{a}_x+(y+y')\cdot\bar{a}_y+(z-z')\cdot\bar{a}_z$$

Desta forma, a matriz de potencial **P** a seguir é calculada mediante os termos  $A_{ij}$  e  $B_{ij}$  definidas anteriormente:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} A_{1,1} - B_{1,1} & A_{1,2} - B_{1,2} & \dots & A_{1,n} - B_{1,n} \\ A_{2,1} - B_{2,1} & A_{2,2} - B_{2,2} & \dots & A_{2,n} - B_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} - B_{n,1} & A_{n,2} - B_{n,2} & \dots & A_{n,n} - B_{n,n} \end{bmatrix}$$

Em que  $n$  representa o número de condutores na linha.

Finalmente, os valores das cargas nos condutores são encontrados assumindo-se conhecido o vetor de potencial nos condutores das fases e nos cabos de guarda mediante:

$$[Q] = 4\pi\epsilon_0[P]^{-1} \cdot \mathbf{V}$$

A função campo elétrico,  $\mathbf{E}(r)$ , é encontrada mediante a derivada da função potencia elétrico  $\mathbf{V}(r)$  e é conhecida como a lei de Coulomb:

$$\mathbf{E}(r) = \frac{q(r')}{4\pi\epsilon_o} \left[ \int_{C_1(r)} \frac{\mathbf{F}_1 \cdot d\mathbf{l}'_1}{G_1^3} - \int_{C_2(r)} \frac{\mathbf{F}_2 \cdot d\mathbf{l}'_2}{G_2^3} \right]$$

O vetor  $G1$  representa o vetor  $dist\_P1$ , mostrado na Figura 2 - (b). Consequentemente,  $G2$  representa a distância do ponto de cálculo  $P1$  às coordenadas  $(x', y', z')$  do condutor imagem.

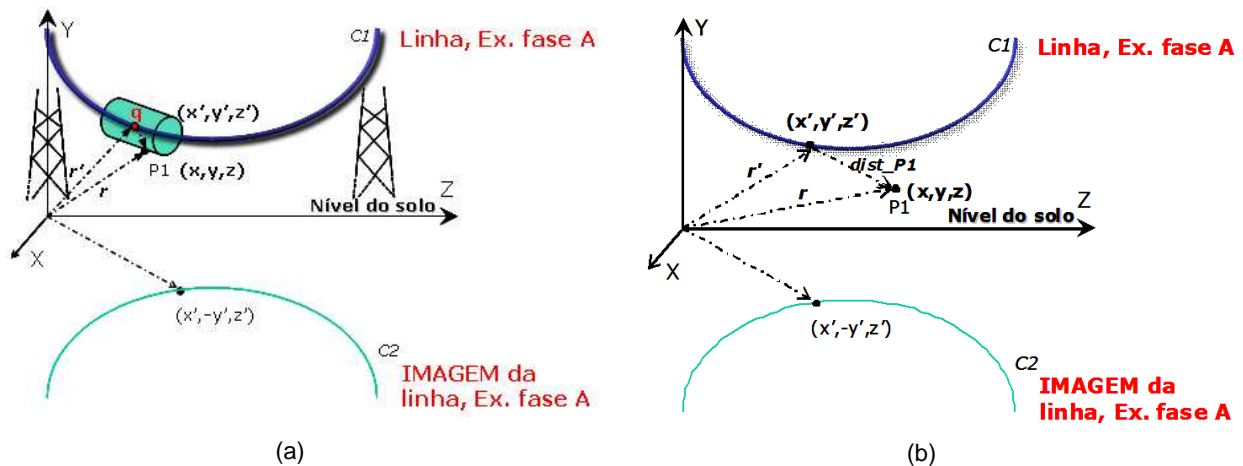


FIGURA 2 – (a) Método de simulação de cargas em linhas. (b) Vetores envolvidos na integral de campo elétrico

### 2.3 Translação e rotação de coordenadas

As metodologias de cálculo de campo elétrico e magnético propostas aqui modelam as emissões de um vão específico de uma linha. Esta representação, dependendo das características do vão em estudo, pode apresentar erros consideráveis devido a não considerar os efeitos de vãos adjacentes. Este pode ser mais bem observado no suporte comum entre dois vãos (ponto P2) tal como o mostrado na Figura 3.

Para quantificar adequadamente o problema foi implementada uma função de rotação e translação dos pontos de cálculo, desde as coordenadas globais para as coordenadas locais. Por exemplo, na Figura 3 calcula-se o campo elétrico no ponto  $P(x,z)$  devido ao vão L2 em coordenadas XYZ. Depois é feita a rotação e translação do ponto  $P(x,z)$  até o ponto  $P''(x'',z'')$  e, na sequência, calcula-se o campo elétrico e magnético em coordenadas locais  $X''Y''Z''$ . Finalmente, aplica-se a superposição dos valores para encontrar-se o CEM final.

Deve-se lembrar que a estrutura das linhas distorce o campo elétrico no seu entorno, entretanto este cálculo pode ser mais confiável e útil a distâncias mais afastadas dos suportes, permitindo ter uma idéia clara das níveis de CEM nessas proximidades.

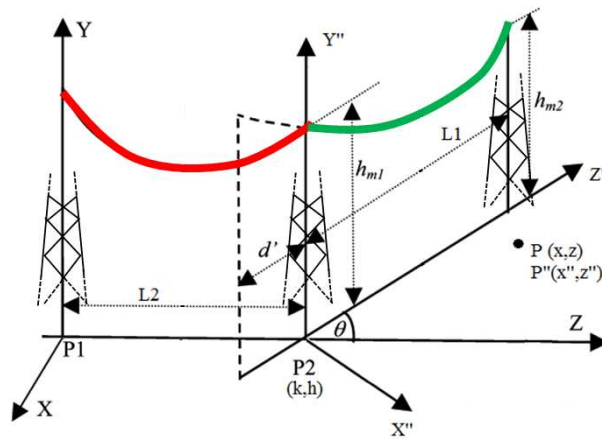


FIGURA 3 – Transferência e rotação de coordenadas dos pontos de cálculo do campo elétrico e magnético

### 3.0 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

#### 3.1 Simulação do aumento do comprimento do vão

A Figura 4 mostra a sensibilidade da razão entre os campos elétricos calculados num ponto cerca do suporte e os calculados no ponto de mínima distância ao solo, frente às variações de comprimento e flecha. Para o estudo foi utilizada uma linha de 69 kV de 62 metros de vão. A Figura 4 também mostra o mesmo estudo para o campo magnético. Nos estudos foi assumido que o peso do condutor e o esforço horizontal sobre este são ambos constantes, desta forma a flecha é proporcional ao quadrado do comprimento do vão.

Os cálculos são realizados nas coordenadas  $y = 1,5$  m;  $x = 1$  m. Para CEMs no centro do condutor  $z =$  centro do vão e, para CEMs no suporte,  $z =$  ponto do suporte, em que  $x$  e  $z$  estão representados na Figura 1.

A Figura 4 - (a) refere-se às simulações considerando três vãos adjacentes de igual comprimento e flecha, sendo o vão de interesse o vão central. Na Figura 5 o comprimento de vão pode ser encontrado multiplicando-se o valor de base do comprimento (62 metros) pela relação Flecha/Comprimento de vão em por unidade. Assim, o valor mínimo é de 24,8 metros (0,4 pu).

Na Figura 4 - (a) observa-se que em vãos curtos (com flechas reduzidas) os CEMs nas proximidades dos suportes tenderam a superar os valores calculados nos pontos de mínima distância ao solo. Por exemplo, para um vão de 24,8 m esta diferença chegou a 1% e 3% para os campos elétricos e magnéticos, respectivamente. O efeito de superposição de campos em vãos adjacentes quase horizontais e curtos pode explicar este fenômeno. Obviamente este resultado é pouco comum em linhas de grande capacidade de transmissão. Adicionalmente, observa-se que esta razão cai quase linearmente com o aumento do comprimento das linhas evidenciando o maior impacto da flecha sobre os CEMs nos pontos de mínima distância ao solo.

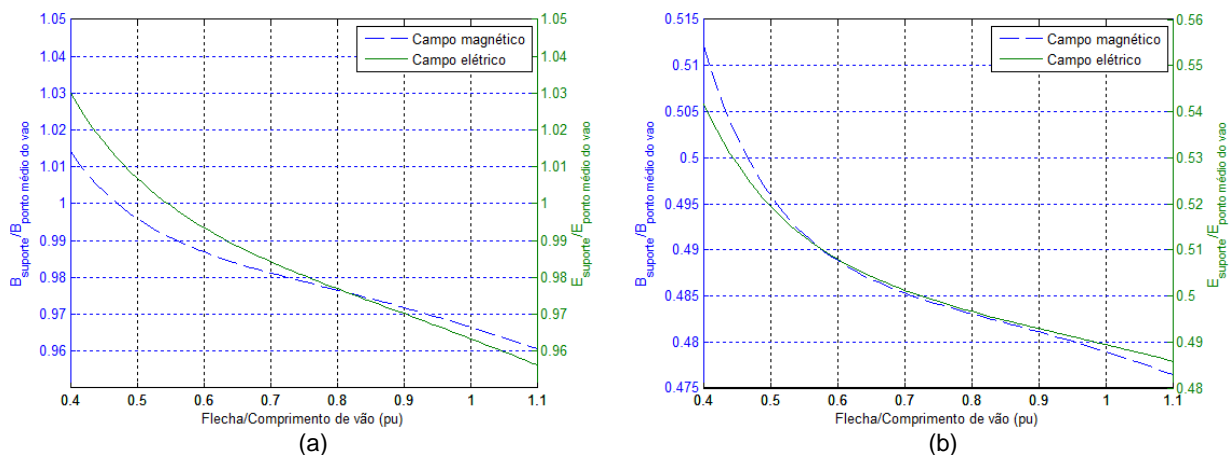


FIGURA 4 – Sensibilidade de campo elétrico e magnético às variações de comprimento e flecha em linha de 69 kV. (a) Simulação considerando vão adjacente. (b) Único vão.

Por outro lado, a Figura 4 - (b) mostra as mesmas simulações considerando um único vão (aproximação utilizada para estimar o campo no ponto de mínima distância ao solo). Dos resultados pode ser verificado o erro ao não se considerar vãos adjacentes quando se simulam CEMs na proximidade dos suportes e até no ponto de mínima distância ao solo.

Os resultados mostram que a metodologia pode ser muito útil para elucidar os CEMs em toda a extensão das linhas cobrindo amplas áreas. De outra forma, seria necessário realizar campanhas de medição, em que os custos podem ser altos dependendo do nível de detalhe requerido.

### 3.2 Simulações computacionais versus medições em campo

A continuação apresentam-se os resultados da comparação entre os valores de CEMs medidos e calculados. Por restrições de espaço apresentam-se aqui apenas dois casos. A primeira uma linha em disposição vertical e a segunda um circuito duplo vertical, ambas da classe 69 kV.

O procedimento de medição e as metodologias propostas consideraram vários pontos a 1,5 m acima do solo, espaçados em 1 m. Os conjuntos de pontos estão localizados em eixos ou linhas de medição na base do poste, a 1/4 de comprimento do vão e no ponto de mínima distância ao solo. O equipamento de medição utilizado atende os requisitos especificados pela Norma NBR 15415 de 2006.

Deve-se ressaltar que o objetivo destas medições e cálculos é verificar a precisão da metodologia proposta em relação às medições e, portanto, não se mostram os CEMs para condições de carga pesada segundo o especificado pela RN N° 398 de 2010, embora estas condições foram verificadas e são plenamente atendidas.

#### 3.2.1 Linha Jardins/Contorno em posição vertical de 69 kV

As atividades de medição, assim como a região do vão medido, são mostrados na Figura 5. A corrente registrada no CDI da ENERGISA para esta linha, no intervalo de medição de CEMs foi em média de 164 A. Por simplicidade, a tensão instantânea foi considerada constante em 69 kV.



FIGURA 5 – (a) Medição de campo elétrico e magnético em linha Jardins/Contorno - ENERGISA. (a) No ponto de mínima distância ao solo. (b) Próximo do suporte

Nos três eixos de medição detalhado na Figura 6 (a), a análise do campo magnético mostram que os valores calculados e medidos tem forma similar. Na Figura 6 (b) - (d) observam-se também que os erros vão diminuindo segundo as quantificações aproximam-se do ponto de mínima distância ao solo. Os erros na proximidade do poste podem resultar elevados em função dos valores registrados serem baixos. Assim, mesmo para estas condições o erro em grande parte dos cálculos é menor a 10%.

Em relação ao campo elétrico, os resultados mostram que estes foram fortemente distorcido pela presença de vegetação nas suas proximidades. Resulta interessante observar que a distorção é maior no ponto de mínima distância ao solo. Os valores calculados fornecem os valores que deveriam ter-se sem a presença destes objetos.



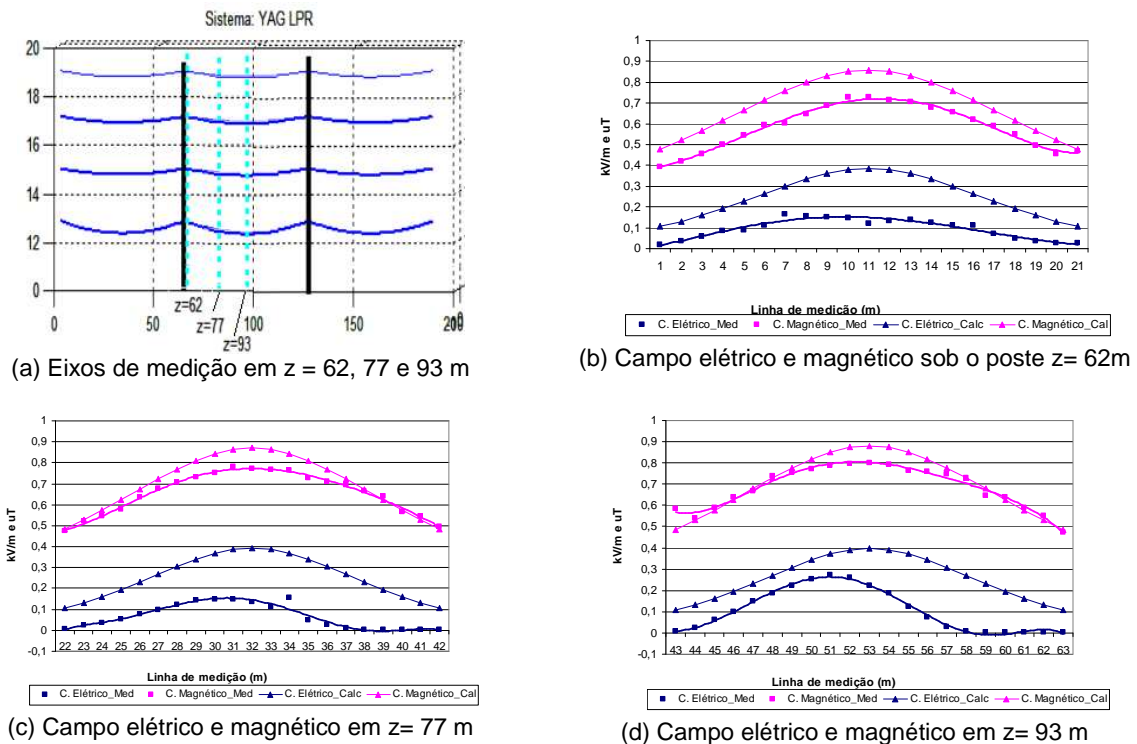


FIGURA 6 – Campos elétrico e magnético em três eixos de medição - linha Jardins/Contorno - ENERGISA

### 3.2.2 Linha dupla Aracaju/Urubu - Jardins/Urubu em posição vertical de 69 kV

Nesta linha os valores de corrente por fase são na média 64 A e 233 A, sendo que a sequência de fases foi de RST e RTS. O vão medido atravessa uma região urbana da cidade de Aracaju segundo mostra-se na Figura 7. A tensão utilizada foi a nominal.

Os resultados de campos elétricos medidos e calculados mostram semelhança de forma, segundo mostram-se na Figura 8 (b) - (d). O erro médio encontrado foi menor a 10%, com os valores menores nas proximidades dos pontos de mínima distância ao solo.



FIGURA 7 – Medição de campo elétrico e magnético em linha Aracaju/Urubu - Jardins/Urubu - ENERGISA. (a) No ponto de mínima distância ao solo. (b) Próximo do suporte

Os campos magnéticos medidos são distorcidos em dos lados do vão, provavelmente devido à proximidade de uma linha de 13,8 kV, segundo se mostra na Figura 7 (a). Esse efeito é mais claro no campo magnético medido no eixo de medição próximo do suporte de vão, segundo observa-se na Figura 8 (b). Deve-se ressaltar que mesmo nestas condições, (linhas de 69 e 13,8 kV no mesmo caminho) o campo magnético nesta linha permanece com valores muito abaixo em relação aos valores de referência da RN N° 398/2010.

## 4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia generalizada para o cálculo dos campos elétrico e magnético em linhas de transmissão e distribuição, com entrada detalhada de dados de condutores.

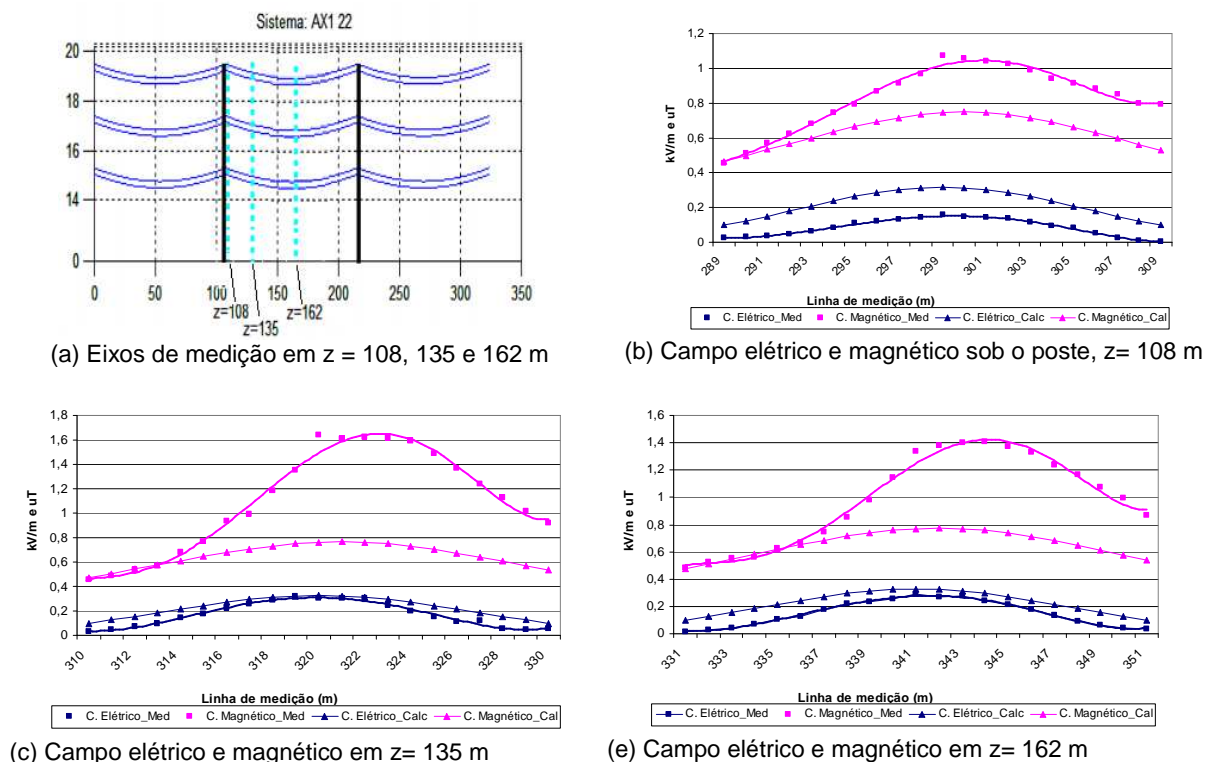


FIGURA 8 – Campos elétrico e magnético em três eixos de medição - linha Aracaju/Urubu - Jardins/Urubu - ENERGISA

Foi verificado que os modelos de linhas implementados nas metodologias são mais úteis em distâncias mais afastadas transversalmente do centro da LT. Nas proximidades dos suportes observaram-se os maiores erros, devido principalmente a interferência dos suportes. Entretanto, esses erros diminuem segundo os pontos de cálculo ficam mais distantes do eixo longitudinal da linha (ver resultado do campo magnético para a linha Jardins - Contorno e campo elétrico para a linha Aracaju/Urubu - Jardins/Urubu).

A comparação dos resultados calculados e medidos mostrou que as metodologias de cálculo são precisas e robustas. Portanto, essas características permitem suprir as concessionárias de distribuição e transmissão de energia elétrica de sólidos subsídios técnicos para o projeto ou adequação de linhas de transmissão existentes às normas específicas do setor elétrico.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Recurso Extraordinário 627189. Disponível em: <http://www.stf.jus.br>
- (2) ICNIRP Guidelines For Limiting Exposure to Time - Varying Electric and Magnetic fields (1Hz – 100 kHz), Health Physics 99(6), pp. 818 - 836, 2010
- (3) Rianne Stam, Laboratory for Radiation Research, National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands, Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields), pp. 1 -13.
- (4) ANEEL, Resolução normativa Nº 398/2010 de 23 de março de 2010
- (5) Faria, J.A.B.; Almeida, M.E.; , "Accurate Calculation of Magnetic-Field Intensity Due to Overhead Power Lines With or Without Mitigation Loops With or Without Capacitor Compensation," IEEE Transactions on Power Delivery, (22), (2), pp. 951-959, 2007
- (6) Rothwell, E. J.; Cloud M. J.; Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton 2001.
- (7) El Dein, A.Z., "Mitigation of magnetic field under Egyptian 500KV overhead transmission line," Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International , vol., no., pp.215, 220, 23-24 June 2010



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Crescencio Silvio Segura Salas. Nascido em 1976 no Peru. Engenheiro Mecânico Eletricista pela Universidade Nacional de Ingeniería (UNI) - Lima em 2001, mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) em 2007 e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2010. É pesquisador sênior do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC.

Rinaldo Solera. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins (1983). Atualmente é responsável pelo departamento de Engenharia e Construção da Transmissão na ENERGISA Sergipe.