



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ - 07  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII  
INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA - GCQ**

**CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 KV  
– CÁLCULOS E MEDIÇÕES**

**Gernan E. Guimarães\*   Marisa Lages Murta   José Osvaldo S. Paulino   Gustavo Henriques R. Silva  
Ana Claudia Silva de Souza**

**CEMIG**

**UFMG**

**RESUMO**

Este informe técnico apresenta os resultados parciais de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que tem o objetivo de caracterizar os níveis de campos elétricos e magnéticos de linhas aéreas de transmissão (LT) de diferentes características e níveis de tensão através de medições e cálculos. Nesta etapa, foram realizadas medições em um vão de uma LT de 500 kV com a presença de obstáculos (cercas, árvores, linha de distribuição, vegetação, etc.), com a finalidade de determinar as dificuldades na realização das medições e a influência dessas variáveis no cálculo dos valores de campo.

**PALAVRAS-CHAVE**

Campo Elétrico, Campo Magnético, Medição, Cálculo, Linhas Aéreas de Transmissão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, o debate em torno das emissões eletromagnéticas geradas pelos sistemas de energia vem ganhando destaque. Alguns organismos internacionais, com o objetivo de limitar a emissão de campos eletromagnéticos das mais diversas fontes, dentre elas as linhas de transmissão de energia, estabeleceram recomendações para valores máximos de exposição a campos elétricos e magnéticos (CEM). Nesse contexto, a determinação dos valores dos campos elétricos e magnéticos nas vizinhanças de linhas aéreas de transmissão (LT) torna-se de grande importância.

Está em desenvolvimento um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) da ANEEL, que tem como um de seus objetivos caracterizar os níveis de campos elétricos e magnéticos gerados por linhas aéreas de transmissão de diferentes características e níveis de tensão da CEMIG. Nesta etapa inicial, foram realizadas medições em um vão de uma LT de 500 kV com a presença de obstáculos (cercas, árvores, linha de distribuição, vegetação e mata fechada), com a finalidade de determinar as dificuldades na realização das medições e a influência dessas variáveis no cálculo dos valores de campo.

Este informe técnico apresenta os resultados de medições e simulações computacionais dos campos elétricos e magnéticos existentes em um vão de uma LT de 500 kV.

## 2.0 - CARACTERÍSTICAS DO VÃO DE LT ANALISADO

Para escolha do vão de LT, foram observados aspectos que poderiam influenciar na determinação dos campos elétricos e magnéticos, tais como: variação da topografia do vão e presença de árvores, vegetação de pequeno porte, cercas e redes de distribuição. Foi escolhido o vão entre as estruturas 51 e 52 da LT Neves 1 – Vespasiano 2, de 500kV da CEMIG, localizado no município de Vespasiano, Minas Gerais. Ele possui todas as características que possibilitaram uma análise mais detalhada dos valores de campo medidos e calculados.

### 2.1 Levantamento topográfico do vão da LT 500 kV

As características do vão escolhido foram determinadas através de um levantamento de campo detalhado, com utilização de equipamentos de precisão (teodolito), onde foram obtidas todas as distâncias consideradas relevantes e que poderiam influenciar na determinação das intensidades dos campos elétricos e magnéticos. As demais características da LT em estudo foram obtidas dos dados de projeto.

A área do vão escolhido é compreendida pelos limites da faixa de servidão (35 metros do eixo) e pelas estruturas 51 e 52 acrescidas de 10 metros para os vãos adjacentes, totalizando 305 metros. O levantamento topográfico dessa área foi realizado através da obtenção de 62 seções de perfil topográfico transversais ao sentido longitudinal da LT, espaçadas de 5 metros. Para cada seção transversal, os pontos foram determinados para distâncias de 1 metro.

Também foram levantadas as alturas cabo-solo das três fases em cada perfil, distâncias entre fases, posição e altura das árvores, cercas e rede de distribuição presentes no vão. Durante as medições das alturas cabo-solo, foram levantadas as correntes e a temperatura ambiente. Essas grandezas não apresentaram variações consideráveis durante as medições de campo elétrico e magnético.

A Figura 1 mostra esquematicamente a área do vão avaliada, bem como os obstáculos existentes. A Figura 2 apresenta os pontos levantados do perfil topográfico e a localização dos cabos da LT, determinados a partir da medição das alturas cabo-solo.

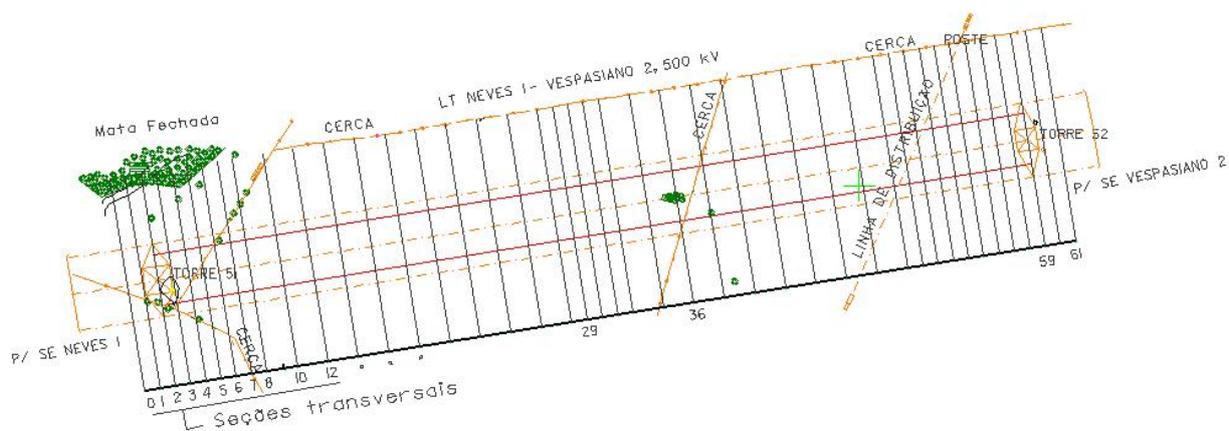


FIGURA 1 – Características do vão escolhido para caracterização do ambiente eletromagnético.

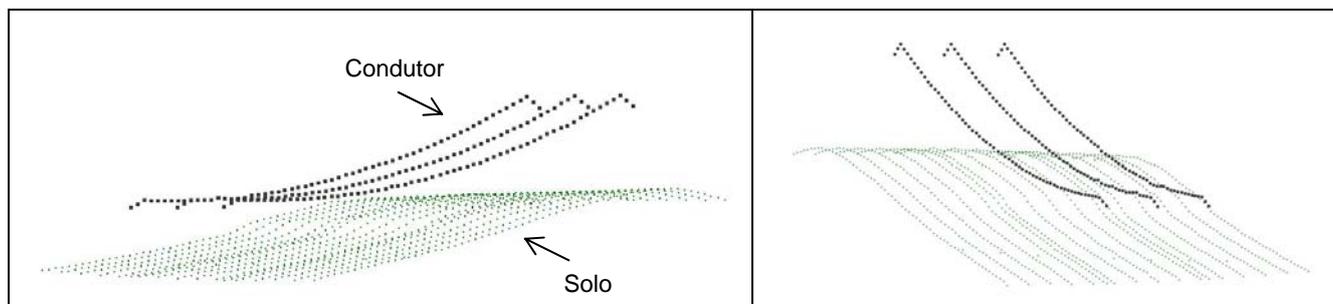
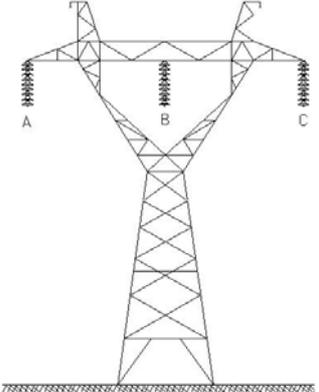


FIGURA 2 – Perfil topográfico do vão escolhido.

## 2.2 Características da LT 500 kV

As principais características do vão em estudo são apresentadas no quadro abaixo.

LT Neves 1 – Vespasiano 2, 500kV		
	Tensão de operação média (kV):	545 (dados medição)*
	Corrente de operação média (A):	650 (dados medição)*
	Vão:	T51 – T52
	Comprimento vão (m):	285
	Configuração:	Horizontal
	Altura cabo-solo mínima:	10,86
	Altura cabo-solo máxima:	25,26
	Nº Circuitos:	1
	Nº Fases:	3
	Distância entre fases (m):	12
	Nº Condutores/Fase:	3
	Espaçamento entre condutores (m)	0,457
	Largura da faixa servidão (m):	70
	Condutor:	Ruddy (900 MCM)
Diâmetro do condutor	0,02874	

\* média dos valores medidos na SE Vespasiano 2 no período das medições de campo elétrico e magnético.

Um fator importante observado foi o carregamento da LT, uma vez que os campos magnéticos gerados são diretamente dependentes da corrente. Devido à grande variação da carga (corrente) ao longo do dia, foram observadas curvas de carga da LT em estudo para a determinação de um período de medição onde essa variação fosse minimizada. A Figura 3 apresenta uma curva de carga típica para a LT e a curva de carga no horário das medições. O período de menor variação encontrado foi no período das 09:00 às 16:00 h. As medições de campo magnético foram realizadas nesse período.

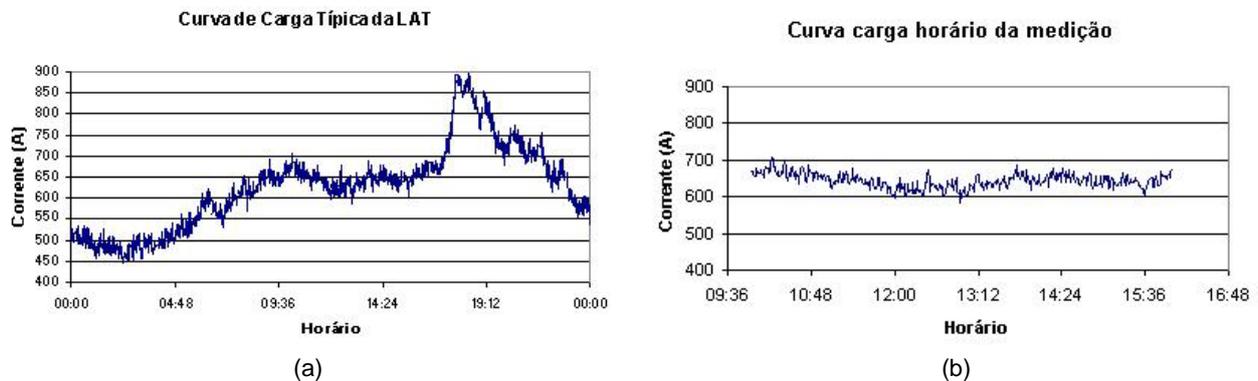


FIGURA 3 – (a) Curva de carga típica da LT; (b) Curva de carga no horário da medição.

Diferentemente da corrente, a variação de tensão da LT ao longo do dia é muito pequena conforme observado na Figura 4, que apresenta a curva de tensão característica da LT. Como o campo elétrico depende diretamente do valor da tensão, o período das medições não foi uma preocupação para determinação do campo elétrico no vão.

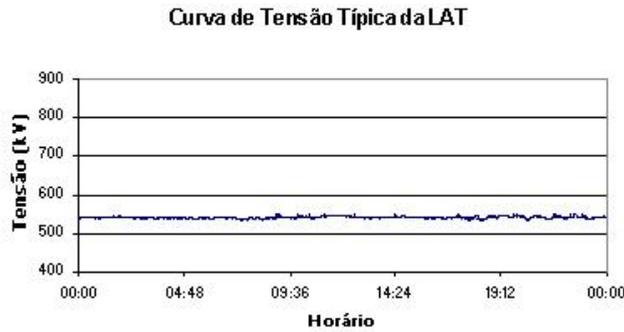


FIGURA 4 – Curva de tensão típica da LAT

### 3.0 - CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO

A determinação dos campos elétricos e magnéticos no vão escolhido foi feita através de medições e cálculos.

#### 3.1 Medições

Para a realização das medições dos campos elétrico e magnético, após o levantamento dos dados da LT e com o conhecimento das características geométricas do vão, foram escolhidas 40 seções transversais ao sentido longitudinal da LT. Na escolha das seções para as medições dos CEM foram observados os parâmetros que poderiam provocar grandes influências nos valores obtidos, como: grande variação da topografia, presença das estruturas, cercas, árvores, maior e menor altura cabo-solo. Em cada seção as medições foram realizadas em pontos espaçados de 1 metro, totalizando 71 pontos de medição por seção.

O equipamento utilizado foi um sistema analisador de campo, composto por uma unidade básica para configuração e armazenamento dos dados e sensores de campo elétrico e magnético [1]. Para medição de campo magnético, foi utilizado um sensor com 3 bobinas organizadas ortogonalmente. O campo magnético é caracterizado pela densidade de fluxo magnético,  $B$ , em  $\mu\text{T}$  (microTesla). Para medição de campo elétrico, foi utilizado um sensor formado por um cubo, constituído por três pares de placas paralelas também arranjadas ortogonalmente, permitindo assim a medição do campo nas três direções do espaço (medição isotrópica). Os valores de campo elétrico foram medidos em  $\text{kV/m}$ . O equipamento utilizado e os sensores são mostrados na Figura 5.

O instrumento possui 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 60Hz.

O procedimento utilizado para as medições dos campos elétrico e magnético seguiu o recomendado pelo IEEE [2]. Segundo essa recomendação os CEM devem ser medidos a 1 metro do solo e devem ser feitas ao longo da linha (perfil longitudinal) e também em um perfil perpendicular ao eixo da linha, denominado nesse trabalho de perfil ou seção transversal. Para a medição do campo elétrico, o operador deve ficar no mínimo a 2,5 metros de distância, uma vez que a sua presença altera os valores de campo. Essa condição foi satisfeita com a utilização de um *link ótico*, composto por uma fibra ótica e conversores eletro-óticos, ligando o sensor à unidade básica do sistema analisador de campo.

#### 3.2 Cálculos

As geometrias das linhas aéreas de transmissão de energia podem ser consideradas simplificadas quando a intenção é o cálculo de campos elétricos e magnéticos ao nível do solo.

Para as simulações do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético, foram implementados em um programa computacional procedimentos de cálculo [3] em duas dimensões que consideram os condutores paralelos ao solo. Para o cálculo do campo elétrico, o solo é considerado como condutor perfeito e o condutor substituído por uma única linha de carga. A densidade de fluxo magnético é determinada de forma direta, em função da corrente nos condutores e da distância até o ponto de interesse. Os procedimentos de cálculo são demonstrados em [3] e não serão discutidos neste informe técnico.

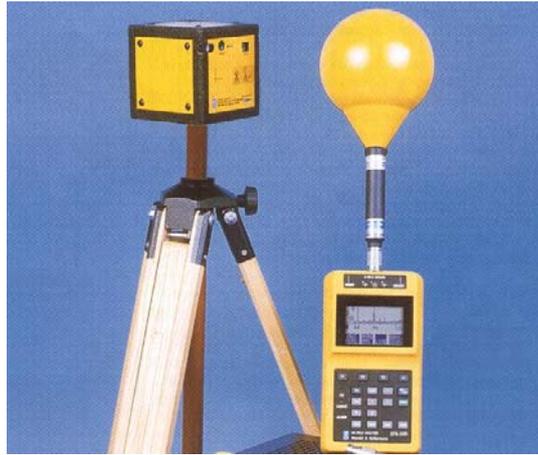


FIGURA 5 – Sistema analisador de campo

#### 4.0 - RESULTADOS

Os resultados das medições e simulações são apresentados através de gráficos, onde são mostradas as principais características dos campos elétricos e magnéticos no vão em estudo. As medições de campo elétrico e magnético foram feitas em 40 perfis de 71 pontos cada um, espaçados de 1 metro, totalizando 2840 pontos de medição para cada grandeza.

Os valores de campo elétrico e magnético medidos no vão em estudo são apresentados nas Figuras 6(a) e (b). As curvas mostram a grande variação dos valores de campo para todo o vão. Alguns aspectos contribuem para essa variação e são discutidos com a apresentação dos perfis de campo nas seções longitudinais e transversais.

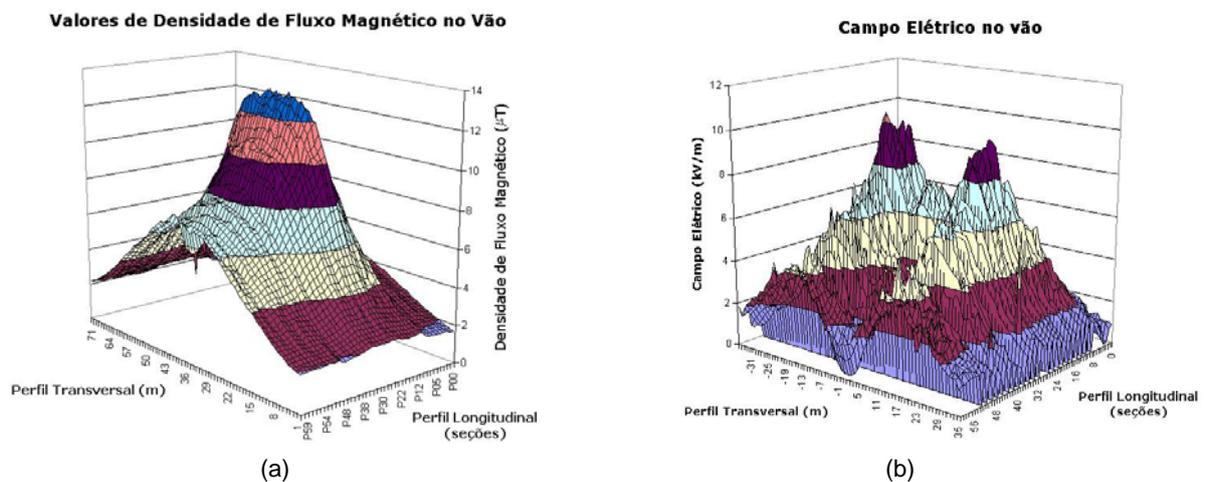


FIGURA 6 – Valores medidos para o vão em estudo: (a) densidade de fluxo magnético; (b) campo elétrico.

#### 4.1 Seções Longitudinais

As figuras 7 (a) e (b) apresentam os perfis longitudinais da densidade de fluxo magnético e do campo elétrico no eixo e nos limites da faixa de servidão da LT.

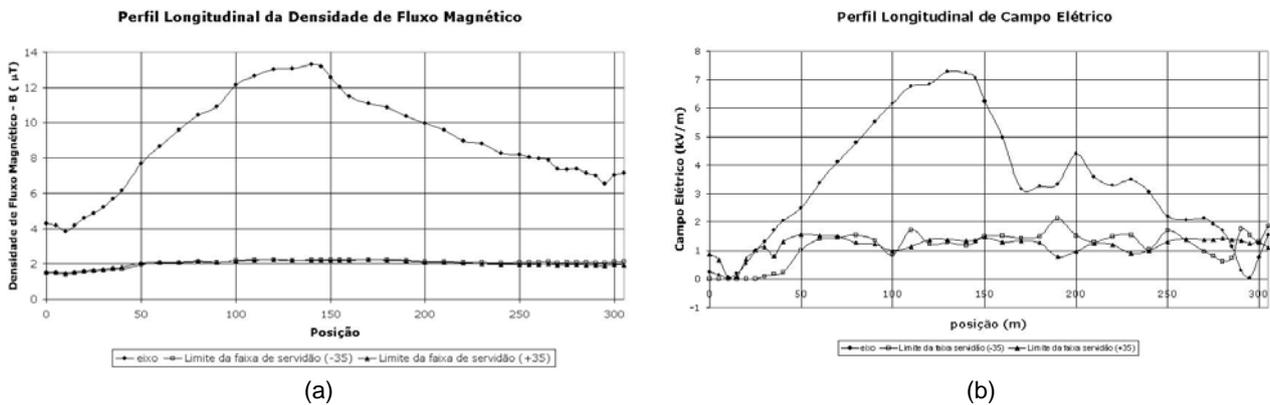


FIGURA 7 – Perfil longitudinal nos limites da faixa e eixo da LT: (a) densidade de fluxo magnético; (b) campo elétrico.

Os valores de campo elétrico e magnético variam significativamente ao longo do eixo da LT, devido à variação da altura cabo-solo dos condutores, conforme indicado na Figura 2.

No entanto, a variação dos campos elétrico e magnético no limite da faixa de servidão da LT não sofrem grande influência das alturas cabo-solo, tendendo a valores constantes. Os perfis de campo elétrico nos limites da faixa apresentam variações irregulares que podem ser atribuídas à presença de vegetação de pequeno porte existente nos pontos de medição. A vegetação, além de outros obstáculos como cercas, árvores, estruturas da LT e rede de distribuição afetam significativamente a medição do campo elétrico, mas não têm influência nos valores de campo magnético.

Nos limites da faixa de servidão da LT, a densidade de fluxo magnético permaneceu praticamente constante com valores de aproximadamente  $2 \mu\text{T}$  e o valor do campo elétrico variou em torno de  $1,4 \text{ kV/m}$ .

#### 4.2 Seções Transversais

Para uma análise mais detalhada, são apresentados os valores de campo elétrico e de densidade de fluxo magnético medidos e calculados para as seguintes seções transversais:

- (a) seção transversal n° 29 – menor altura cabo-solo;
- (b) seção transversal n° 59 – eixo da estrutura n°52 (presença de estrutura da LT e vegetação de pequeno porte);
- (c) seção transversal n° 02 – eixo da estrutura n°51 (presença de estrutura da LT, vegetação de pequeno porte, cercas e mata fechada).

Os resultados são apresentados nas Figuras 8, 9 e 10.

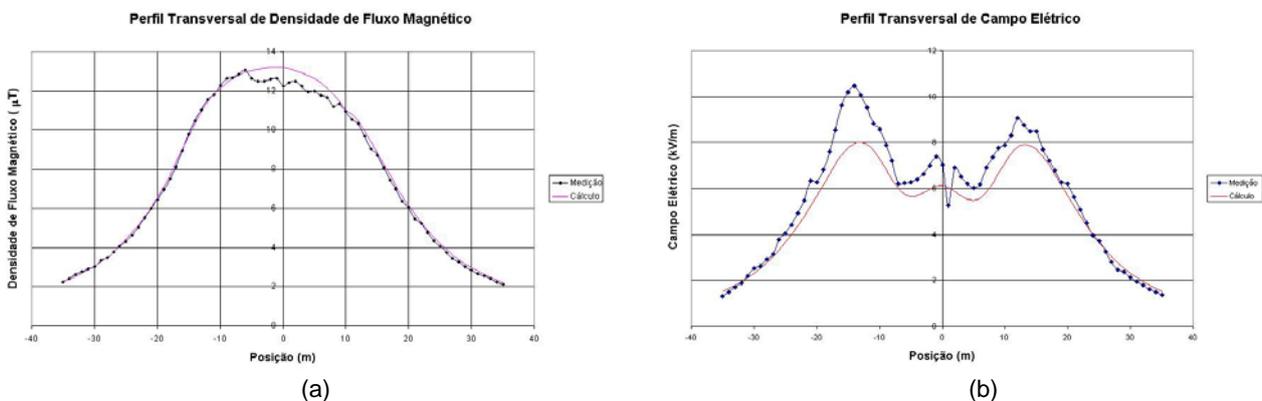


FIGURA 8 - Perfil Transversal n° 29 (menor altura cabo-solo) - valores medidos e calculados: (a) densidade de fluxo magnético; (b) campo elétrico.

Conforme Figura 8 (a), observa-se uma grande concordância entre os valores medidos e calculados da densidade de fluxo magnético, com uma diferença máxima de 7,9% na região sob os condutores. Para os outros pontos de medição, a diferença entre o cálculo e a medição é desprezível.

No caso do campo elétrico, também se observa uma boa concordância entre os valores medidos e calculados, sendo a diferença máxima de 11,1 %. Nesta seção, a presença de vegetação de pequeno porte pode ter influenciado os valores medidos em alguns pontos.

Nesta seção, foram medidos os maiores valores de campo em todo o vão, sendo a densidade de fluxo magnético igual a  $13,30 \mu\text{T}$  e o campo elétrico igual a  $10,48 \text{ kV/m}$ .

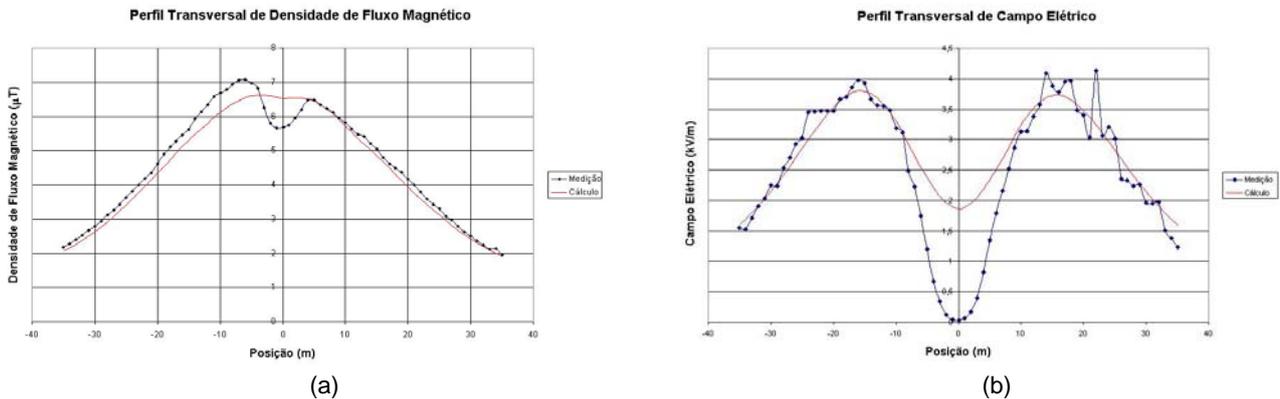


FIGURA 9 – Perfil Transversal n° 59 (eixo da estrutura n° 52) - valores medidos e calculados de (a) densidade de fluxo magnético; (b) campo elétrico

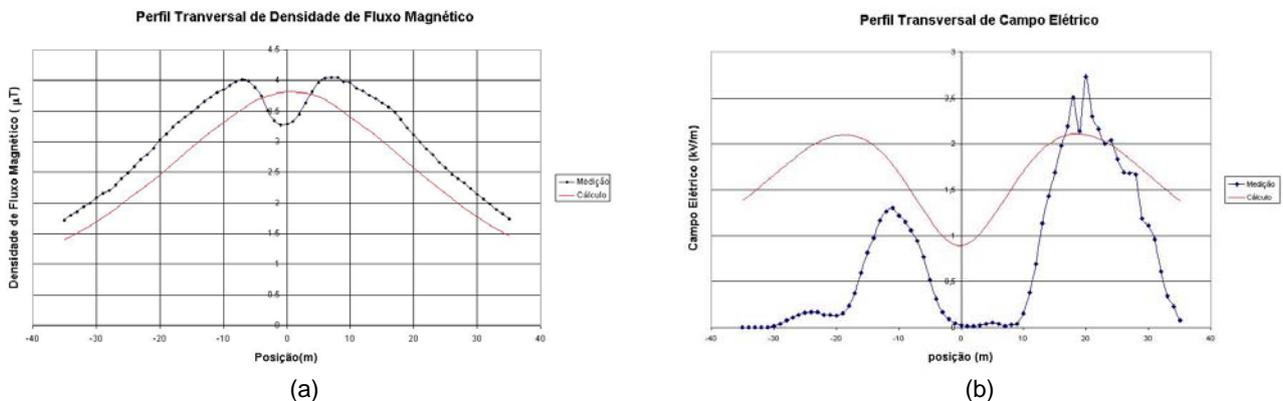


FIGURA 10 – Perfil Transversal n° 02 (eixo da estrutura n° 51) - valores medidos e calculados de (a) densidade de fluxo magnético; (b) campo elétrico

Tanto para a seção transversal n°02 quanto para a seção n°59, Figuras 9 e 10 respectivamente, observa-se uma pequena variação entre valores medidos e calculados para a densidade de fluxo magnético. A maior divergência entre os valores é observada nos pontos de medição no interior das estruturas, que estão localizadas entre os pontos  $-5\text{m}$  e  $5\text{m}$  nos dois perfis. Os valores medidos de campo magnético não sofreram alterações devido à presença de obstáculos existentes no vão como cercas, vegetação, mata, etc.

No caso do campo elétrico, observa-se a grande influência dos obstáculos nos valores medidos. A seção n°59 é caracterizada pela presença da estrutura n°52 da LT e vegetação de pequeno porte. Nesta seção, o campo elétrico sofre uma grande redução entre os pontos  $-5\text{m}$  e  $5\text{m}$ , localizados no interior das estruturas. Para pontos exteriores à estrutura, no entanto, o perfil permanece simétrico, com pequenas variações decorrentes da presença da vegetação.

A seção n°02 é caracterizada pela presença da estrutura n°51 da LT, vegetação de pequeno porte, cercas e uma mata fechada localizada à esquerda da estrutura, a partir do ponto  $-25\text{m}$ . As características deste perfil com a

presença desses obstáculos podem ser observadas na Figura 2. Novamente, observa-se uma drástica redução do campo elétrico no interior da estrutura. A estrutura da LT praticamente anula o campo elétrico em seu interior, já que a estrutura metálica comporta-se como uma blindagem para os campos elétricos. Uma grande redução de campo elétrico é também observada do lado esquerdo deste perfil com a presença da mata. Esse comportamento não é observado no perfil nº59, onde não há existência da mata. Neste caso, o procedimento de cálculo do campo elétrico, sem a consideração de obstáculos, não se mostrou eficiente para a determinação dos reais valores existentes no vão em análise, uma vez que esses exercem grande influência na medição de campo elétrico.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados parciais do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) apresentados neste trabalho mostram a avaliação dos procedimentos de cálculo e medição da densidade de fluxo magnético e do campo elétrico gerados por uma LT de 500 kV.

Os resultados indicam que o procedimento para cálculo da densidade de fluxo magnético é eficiente para a determinação dentro da faixa de servidão e limites, apresentando discordâncias pouco significativas com relação às medições.

Os valores de campo elétrico calculados também apresentaram uma boa concordância com os valores medidos, nas regiões sem a presença de obstáculos. As maiores diferenças são decorrentes da presença dos obstáculos (cercas, estruturas, árvores e vegetação de pequeno porte) existentes sob a LT que não foram considerados nos procedimentos de cálculo utilizados. Modelos mais elaborados e programas computacionais que possibilitem a representação desses obstáculos serão avaliados nas etapas seguintes desse projeto.

As medições do campo elétrico apresentaram dificuldades para realização devido aos procedimentos necessários e adotados para evitar a perturbação do campo pelo operador. Já as medições da densidade de fluxo magnético não apresentam essas dificuldades.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EFA-200/300 Analisador de Campo Eletromagnético, Manual de Operação. Narda Safety Test Solutions.
- (2) IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines. IEEE Std 644-1994. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. Approved December 13, 1994. IEEE Standards Board. ISBN 1-55937-499-3.
- (3) EPRI – Electric Power Research Institute, Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above. Second Edition (1975), Palo Alto.
- (4) Magnetic fields from electric power lines – Theory and comparisons to measurements. A report of the IEEE magnetic fields task force of the AC fields working group of the corona and field effects subcommittee of the transmission and distribution committee. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, No 4, October 1988.
- (5) Transmission Line Fields, D. W. Deno. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-95, nº 5, September/October 1976.