

CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DEVIDO A SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Jaime Arturo Ramírez
Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Antônio Carlos, 6627
31270-010 – Belo Horizonte, MG

INTRODUÇÃO

A associação entre a exposição à campos eletromagnéticos de baixa frequência 60Hz devido a sistemas de energia elétrica – linhas de transmissão (LTs) e distribuição (LDs) de energia elétrica e equipamentos eletrodomésticos em geral – e possíveis riscos à saúde humana, é um assunto que tem recebido grande atenção dos pesquisadores nos últimos 20 anos. O assunto é polêmico, tem gerado controvérsia na comunidade científica e preocupação junto ao público em geral.

Um dos primeiros trabalhos nesta área, o estudo epidemiológico conduzido por Nancy Wertheimer e Ed Leeper, publicado em 1979 [Wer,79], indicou uma relação entre a incidência de câncer em crianças (leucemia) e a proximidade de suas casas a linhas de transmissão de energia elétrica (LTs). Entretanto, depois deste estudo inicial, mais de 100 outros estudos epidemiológicos foram realizados, por diversos autores de vários países, sem contudo alcançar os mesmos resultados. Inúmeros estudos laboratoriais *in vivo* e *in vitro* também foram desenvolvidos nos últimos 20 anos com o intuito de comprovar os resultados dos estudos epidemiológicos. Entretanto, os resultados obtidos não indicam uma associação entre a exposição de mamíferos à campos magnéticos de 60Hz e o desenvolvimento de câncer.

Dois grandes projetos internacionais relacionados com este assunto específico merecem destaque. O primeiro refere-se ao EMF-Rapid e foi desenvolvido entre 1993-1998 por um grupo de especialistas dos Estados Unidos a pedido do governo daquele país. O EMF-Rapid consumiu recursos da ordem de U\$30 milhões e chegou a conclusão que não há evidências científicas de que campos magnéticos 60Hz causam diretamente câncer em animais. O segundo refere-se ao EMF-Project e está em desenvolvimento sob coordenação da Organização Mundial da Saúde. O EMF-Project consome recursos da ordem de U\$1 milhão por ano e está previsto para ser concluído em 2005.

Este trabalho está estruturado em duas grandes seções. Na primeira parte é feita a revisão bibliográfica onde é apresentado o estado-da-arte do assunto específico contemplando os seguintes aspectos: (i) caracterização da exposição; (ii) resultados de estudos epidemiológicos; (iii) resultados de estudos laboratoriais *in vivo* e *in vitro*. Na segunda parte são apresentados resultados obtidos pela equipe do autor referentes ao cálculo e medição do campo magnético de linhas de transmissão de Minas Gerais; e de um estudo laboratorial *in vivo* que simulou a exposição do campo de uma LT em 200 cobaias por 12 semanas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTADO DA ARTE

Esta parte do artigo tem o objetivo de apresentar as principais conclusões de trabalhos desenvolvidos nos últimos 20 anos e está subdividida em três subseções: (i) caracterização da exposição; (ii) resultados de estudos epidemiológicos e (iii) resultados de estudos laboratoriais.

Caracterização da Exposição:

O objetivo da caracterização da exposição é a determinação da magnitude dos campos elétrico e magnético a qual membros da população em geral estão expostos.

O ambiente eletromagnético em sistemas de energia consiste basicamente de dois componentes, um campo elétrico e um magnético. Em geral, para campos variantes no tempo, esses dois campos são acoplados. Entretanto, para a frequência de operação de linhas de transmissão (LTs) e distribuição (LDs), e equipamentos eletrodomésticos – 60Hz – os campos elétrico e magnético podem ser considerados independentes e desacoplados.

Um campo elétrico é uma grandeza vetorial (função da posição e do tempo) designada por $E(r,t)$ que é descrita por sua intensidade. Normalmente campos elétricos são medidos em volts por metro (V/m). Um campo magnético é uma grandeza vetorial (função da posição e do tempo) designada por $H(r,t)$ que também é descrita por sua intensidade. Normalmente campos magnéticos são medidos em ampère por metro (A/m).

Campos elétricos e magnéticos de sistemas de energia são campos de baixa frequência conforme ilustra a Fig.1 a seguir:

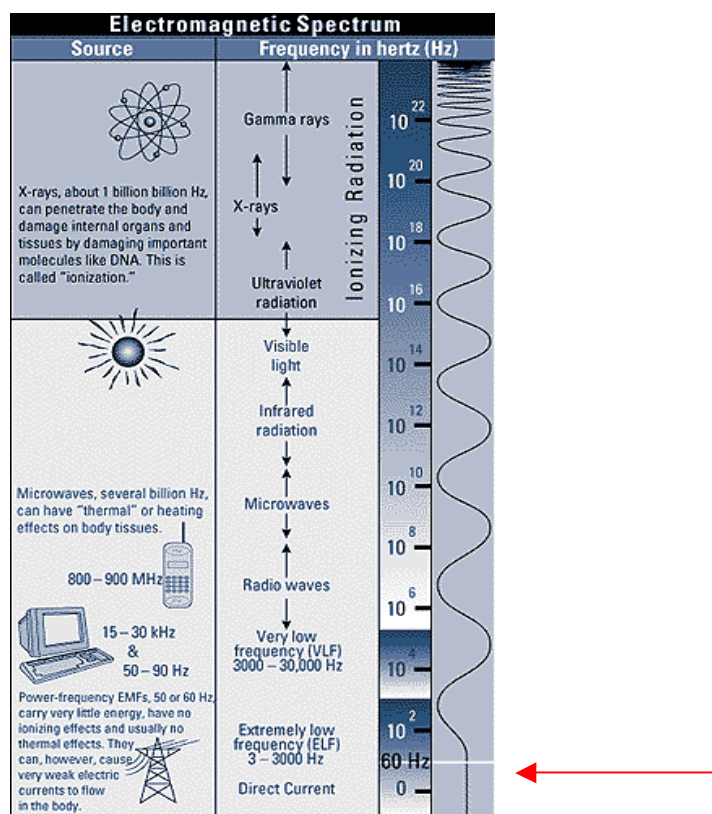


Figura 1 – Espectro de Frequência de Campos Eletromagnéticos

A seguir apresentamos as principais conclusões deste item que se baseiam nas contribuições de [Ans,87], [Epr,93], [Cai,99], [Ret,99], [Nrc,97]:

- A exposição de seres humanos e animais a campos elétricos e magnéticos 60Hz induz correntes elétricas internas.
A densidade da corrente induzida é não uniforme em todo o corpo. A distribuição da corrente induzida por campos magnéticos é diferente daquela induzida por campos elétricos. Campos elétricos E são geralmente medidos em volts por metro (V/m) e campos magnéticos em microtesla (μT).
- Os níveis ambientes de campos magnéticos 60Hz em residências, e na maioria dos locais de trabalho, é de: $0.01 - 0.3\mu T$.
Níveis mais elevados são encontrados diretamente abaixo de LTs de alta tensão e em alguns locais de trabalho. Alguns eletrodomésticos produzem campos magnéticos que superam $100\mu T$. Para comparação, cabe citar que o campo magnético estático da terra é de aproximadamente $50\mu T$. Campos magnéticos da magnitude dos encontrados em residências induzem correntes no corpo humano que são muito menores do que as correntes naturalmente induzidas com o funcionamento de nervos e músculos. Entretanto, a exposição ao campo de alguns eletrodomésticos pode produzir campos elétricos em pequenas regiões localizadas do corpo humano que são comparáveis (ou mesmo maiores) do que o campo interno natural do corpo. Cabe ressaltar que a magnitude do maior campo elétrico induzido no corpo humano não é determinado com precisão.
- A exposição humana a campos magnéticos 60Hz e $0.1\mu T$ resulta em uma densidade de corrente induzida máxima de aproximadamente $1\mu A/m^2$.
A densidade de corrente endógena na superfície do corpo humano associada com a atividade elétrica de células nervosas é da ordem de $1mA/m^2$. As frequências associadas com essas correntes endógenas no cérebro variam de menos de 1Hz a aproximadamente 40Hz, sendo que o componente mais preponderante é de 10Hz. Portanto, os valores típicos de correntes induzidas por campos magnéticos externos são 1000 vezes menores do que as correntes que naturalmente ocorrem no corpo humano.
- Não há dados experimentais ou teóricos sobre a densidade de corrente induzida nos tecidos e células que leva em consideração as variações locais das propriedades elétricas do meio (condutividade e permissividade).
- Os níveis de exposição de campos elétricos e outras características de campos magnéticos (harmônicos, transitórios, variações espaciais e temporais) tem recebido pouca atenção.
Há muito pouca informação disponível a respeito dos níveis de exposição a campos elétricos que não seja o valor médio quadrático (rms) da intensidade de campo. Os valores rms para o campo elétrico variam de 5 a 10 V/m em áreas residenciais a 10kV/m para áreas situadas diretamente abaixo de LTs. Similarmente, os campos magnéticos são caracterizados apenas em termos do valor rms da intensidade de campo (sem considerar harmônicos, transitórios, variações espaciais e temporais). Os níveis de exposição de

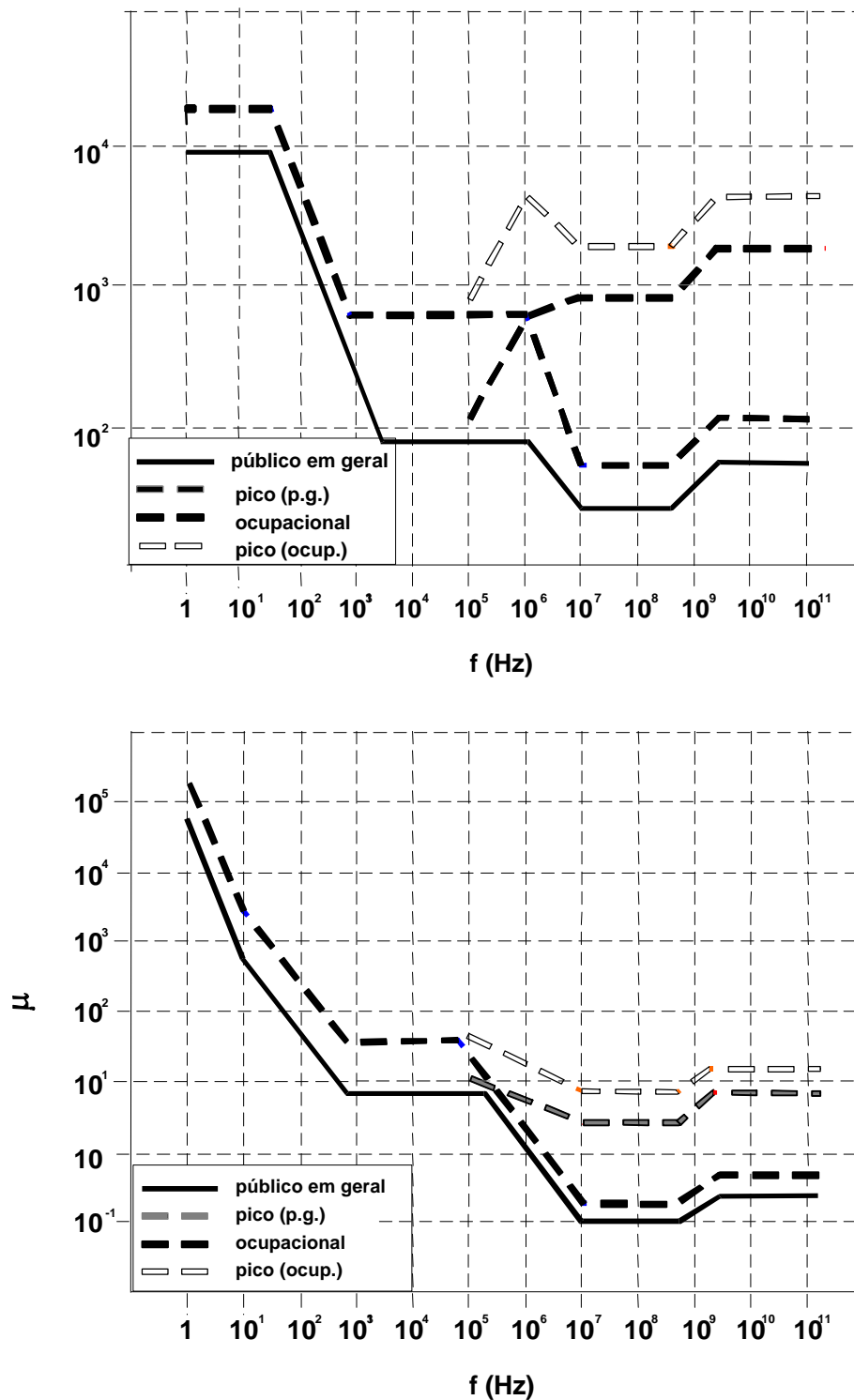
campos elétricos e magnéticos de LTs – 60Hz – em residências são da ordem de poucos μT .

- Os níveis medidos de campos magnéticos de equipamentos eletrodomésticos e equipamentos de escritório em geral, para distâncias de 15 a 30cm da fonte, variam de 0.1 a 150 μT conforme ilustrado na Tabela I a seguir:

Tabela I – Níveis de Campos Magnéticos de Eletrodomésticos em Geral

Fonte	Campo Magnético (μT) a 15cm da fonte	Campo Magnético (μT) a 30cm da fonte
Cozinha		
Misturadores	3 – 10	0.5 – 2
Abridores de lata	50 – 150	4 – 30
Cafeteiras	0.4 – 1	Bkg – 0.1
Máquina de lavar prato	1 – 10	0.6 – 3
Forno de microondas	10 – 30	0.1 – 20
Forno elétrico	0.4 – 2	0.1 – 0.5
Geladeiras	Bkg – 4	Bkg – 2
Torradeiras	0.5 – 2	Bkg – 0.7
Lavanderia e Limpeza		
Máquina de secar roupa	0.2 – 1	Bkg – 0.3
Máquina de lavar roupa	0.4 – 10	0.1 – 3
Ferro de passar roupa	0.6 – 2	0.1 – 0.3
Aspirador de pó	10 – 70	2 – 20
Aquecedor elétrico	0.5 – 15	0.1 – 4
Banheiro		
Secador de cabelo	0.1 – 70	Bkg – 7
Barbeador	0.4 – 60	Bkg – 10
Escritório		
Máquina xerox	0.4 – 20	0.2 – 4
Máquina fax	0.4 – 0.9	Bkg – 0.2
Lâmpada fluorescente	2 – 10	Bkg – 3
Monitor de PCs	0.7 – 2	0.2 – 0.6

- Os gráficos a seguir fornecem os valores máximos de exposição aos campos elétricos E e magnéticos H para o público em geral e para trabalhadores, segundo a ICNIRP [Nrc,97].



Estudos Epidemiológicos:

Estudos epidemiológicos são desenvolvidos com o objetivo de determinar uma relação entre a ocorrência de padrões de doenças na população e as suas causas; e possivelmente métodos de prevenção.

As conclusões a seguir se baseiam nas contribuições de [Wer,79], [Ver,93], [Tyn,97], [Tyn,94], [Sav,88], [Sav,95], [Mil,96], [Nrc,97], [Lee,97], [Fey,93] e [Ols,93].

- Há evidências estatisticamente significativas – estudos epidemiológicos que utilizaram o “código de cabos” (será detalhado a seguir) – de que crianças que residem próximas a LTs tem uma probabilidade 1.5 vezes maior de desenvolverem leucemia.
Embora os dados disponíveis na literatura não são inteiramente consistentes, os resultados de estudos epidemiológicos que utilizaram o “código de cabos” e outras maneiras de avaliar a exposição, tais como proximidade à LT e o cálculo da campo magnético da LT, indicam que uma associação positiva está presente.
- Não há evidências de associação entre a média do valor (rms) dos campos magnéticos medidos nas residências de crianças que vivem próximas a LTs e um excesso de leucemia infantil ou outros tipos de câncer.
Esta afirmação é exatamente contrária a feita no item anterior. Em outras palavras, há evidências de associação entre **valores estimados** de campos magnéticos em residências próximas a LTs e desenvolvimento de leucemia infantil. Entretanto, não há evidências de associação entre **valores medidos** de campos magnéticos em residências próximas a LTs e desenvolvimento de leucemia infantil ou qualquer outro tipo de câncer.
- Os fatores que explicam a associação entre o “código de cabos” e leucemia infantil ainda não foram identificados.
- Não há evidências epidemiológicas científicas de associação entre exposição à campos magnéticos 60Hz e o desenvolvimento de outros tipos de câncer em crianças, desenvolvimento de câncer em adultos, problemas com a gravidez (gestação) e desordens neuro-comportamentais.

O "código de cabos" é uma padronização (classificação) de valores de campos magnéticos associados aos cabos utilizados por linhas de transmissão (LTs) e suas respectivas distâncias das residências. Os valores são estimados de B são estimados. Este código é comumente utilizado por estudos epidemiológicos [Nrc,97].

Estudos Laboratoriais *in vivo* e *in vitro*:

Estudos laboratoriais *in vivo* e *in vitro* são desenvolvidos com o objetivo de determinar uma relação causa(dose) – efeito entre a exposição de animais (ou culturas de células) a agentes tóxicos. Normalmente, os resultados de estudos laboratoriais confirmam os resultados de estudos epidemiológicos positivos.

As conclusões apresentadas a seguir se baseiam nas contribuições de [Zec,98], [Vil,99], [Rep,98], [Ran,94], [Ran,93a], [Ran,93b], [Ran,90], [Mev,93], [Leu,88], [Los,93], [Gol,96], [Fra,90], [Ben,91], [Bau,95], [Nrc,97] e [Ram,00].

Estudos in vivo:

- Não há evidências científicas convincentes de que a exposição a campos elétricos e magnéticos – 60Hz – causa câncer em animais.

Um número razoável de estudos laboratoriais já foram realizados com o objetivo de determinar se existe alguma relação entre a exposição a campos elétricos e magnéticos – 60Hz – e o câncer. Nestes estudos já realizados, os resultados indicam que os efeitos da exposição no desenvolvimento de vários tipos de câncer não são evidentes e também não são consistentes (resultados que indicam uma associação positiva são dificilmente reproduzíveis por outros grupos). Entretanto, há evidências laboratoriais de que animais tratados com drogas cancerígenas desenvolvem câncer de mama devido a exposição à campos magnéticos 60Hz. Em outras palavras, há evidências de que o campo magnético pode agir como co-promotor de câncer em animais.

- Não há evidências científicas de quaisquer efeitos adversos na reprodução ou desenvolvimento em animais, particularmente mamíferos, advindos da exposição à campos elétricos e magnéticos 60Hz.
- Há evidências científicas de respostas comportamentais a campos elétricos e magnéticos (consideravelmente maiores do que aqueles encontrados em ambientes residenciais). Entretanto, efeitos neuro-comportamentais adversos devido a campos extremamente elevados não foram comprovados. Evidências laboratoriais mostram claramente que animais são capazes de detectar e responder a campos elétricos externos da ordem de 5 kV/m rms. Para campos magnéticos de até 3 μ T, a evidência da resposta comportamental de animais é muito menos pronunciada. Em ambos os casos, não há evidências comprovadas de efeitos comportamentais adversos.
- Há evidências científicas de variações neuro-endócrinas associadas à exposição a campos magnéticos 60Hz. Entretanto, alterações na função neuro-endócrina devido a exposição à campos magnéticos 60Hz não demonstraram causar efeitos adversos a saúde. A maioria das investigações do efeito do campo magnético na função da glândula pineal indicam que campos magnéticos podem inibir a concentração de melatonina na glândula pineal e no sangue durante a noite. Nesses estudos a intensidade do campo magnético variou de 10 μ T a 5.2mT. Os dados experimentais não indicam efeitos de supressão na produção de melatonina devido a exposição à campos elétricos. Nos artigos estudados, não há evidências de efeitos da exposição em outras funções neuro-endócrinas ou endócrinas. Apesar das evidências da redução da concentração de melatonina em alguns animais devido a exposição à campos magnéticos 60Hz, estudos em humanos não fornecem evidências conclusivas de que a concentração de melatonina responde de maneira similar.
- Há evidências científicas de que campos magnéticos de 60Hz maiores do que 5 μ T estão associados a tratamentos em animais (cicatrização de ossos).

Estudos in vitro:

- Exposições a campos magnéticos 60Hz de intensidade 0.01 - 1 μ T (típicos de ambientes residenciais) não produzem qualquer efeito significativo *in vitro*. Embora alguns efeitos *in vitro* a esse tipo de exposição já tenham sido observados, os mesmos não foram reproduzidos por grupos independentes.
- Há evidências científicas de alterações na transdução de sinais intracelulares para exposições a campos magnéticos 60Hz de intensidade 10 μ T (ou maiores).
O sistema de transdução de sinais são usados pelas células para perceber e responder a características do seu ambiente; por exemplo, o sistema de transdução de sinais pode ser ativado pela presença de vários produtos químicos, hormônios e fatores de crescimento. Variações no sistema de transdução de sinais são muito comuns em experimentos *in vitro* e não são um indicativo per se de qualquer efeito adverso. Cabe destacar aqui a ausência de outros tipos de efeitos (por exemplo, danificação do material genético das células) em experimentos com campos magnéticos de alta intensidade (maiores do que 1mT).
- Há evidências científicas de variações na concentração intracelular de cálcio para experimentos com campos magnéticos 60Hz de intensidade maior do que 50 μ T.
Entretanto, cabe destacar que não há evidências científicas de alteração ou danificação do material genético das células.
- A conclusão geral, que se baseia nos artigos científicos estudados, é que a exposição a campos elétricos e magnéticos 60Hz induzem alterações em culturas de células *in vitro* apenas em situações que a intensidade do campo excede os níveis típicos de campos em ambientes residenciais por um fator da ordem de 1.000 a 100.000 vezes.

RESULTADOS

Esta seção está dividida em duas partes distintas que se baseiam na experiência do grupo do autor. A primeira parte refere-se ao cálculo e medição do campo magnético para LDs e LTs típicas do Estado de Minas Gerais [Cai,99], [Ret,99], [Ram,00]. A segunda parte refere-se a um estudo laboratorial que foi desenvolvido como intuito de investigar os possíveis efeitos biológicos de campos magnéticos de LDs ou LTs [Vil,99] e [Ram,00].

Cálculo e Medição de Campos Magnéticos de LDs e LTs:

A partir das equações de Maxwell, o cálculo do campo magnético gerado por LD's e LT's foi realizado utilizando a Lei de Biot-Savart. A Lei de Biot-Savart possibilita calcular **B** de forma direta em função da corrente que o gera e da distância entre a fonte do campo e o ponto de interesse, segundo (1) [Cai,99]. Além disso, a geometria do problema facilita a sua aplicação, Fig. 2.

$$d\mathbf{H}_{j,i} = \frac{I_i d\mathbf{L}_i \times \mathbf{a}_{Rij}}{4\pi R_{ij}^2} \quad (1)$$

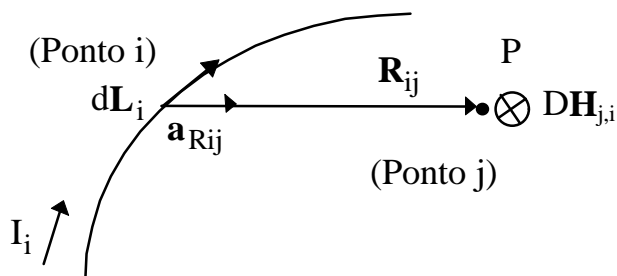


Figura 2. Geometria para descrição da Lei de Biot-Savart.

Nesta análise, foi considerado o modelo de linha longa, onde o campo é orientado em um plano perpendicular à linha. Neste modelo foram observadas as seguintes restrições:

- a altura dos condutores sobre o plano da terra e a separação entre eles são constantes;
- as correntes são grandezas complexas e equilibradas (linhas trifásicas), sempre perpendiculares ao plano Oxy ;
- a contribuição da corrente de retorno para terra é desprezível.

A medição foi realizada utilizando o instrumento *Holaday Industries* modelo HI-3604, que possui sensor de um eixo com diâmetro de 0.165 m. Este instrumento mede valores eficazes unidirecionais (detetor rms verdadeiro) na faixa de 0.1 mG a 2.0 G. As linhas de fluxo do campo magnético devem estar perpendiculares ao disco do equipamento para se realizar a medição de forma adequada.

Neste caso, em que a análise é bidimensional, a distância lateral à torre foi percorrida com o instrumento orientado de modo a medir os componentes horizontal (H_x) e vertical (H_y) do vetor intensidade de campo magnético. A partir destes componentes é possível calcular o valor resultante de $H = \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2}$ e posteriormente de $B = \mu_0 H$.

LD de 13.8kV:

A LD trifásica em 13.8 kV, escolhida para a realização da medição, está situada no Campus da PUC.Minas e possui a configuração da Fig. 3.a. O valor de corrente foi estimado, a partir da demanda contratada pela instituição, em 30 A por fase. Apesar da altura da estrutura ser de 7.8 m, foi considerado para o cálculo o valor de 7.3 m verificado no local da medição. Os resultados obtidos do cálculo e da medição estão representados no gráfico da Fig. 3.b, para uma distância lateral ao centro da configuração de 0 a 30 m.

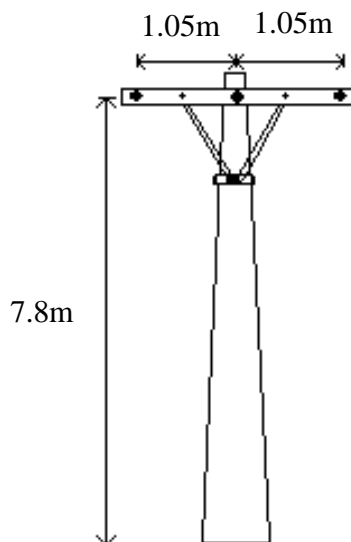


Figura 3.a – Configuração típica da LD - 13.8 kV.

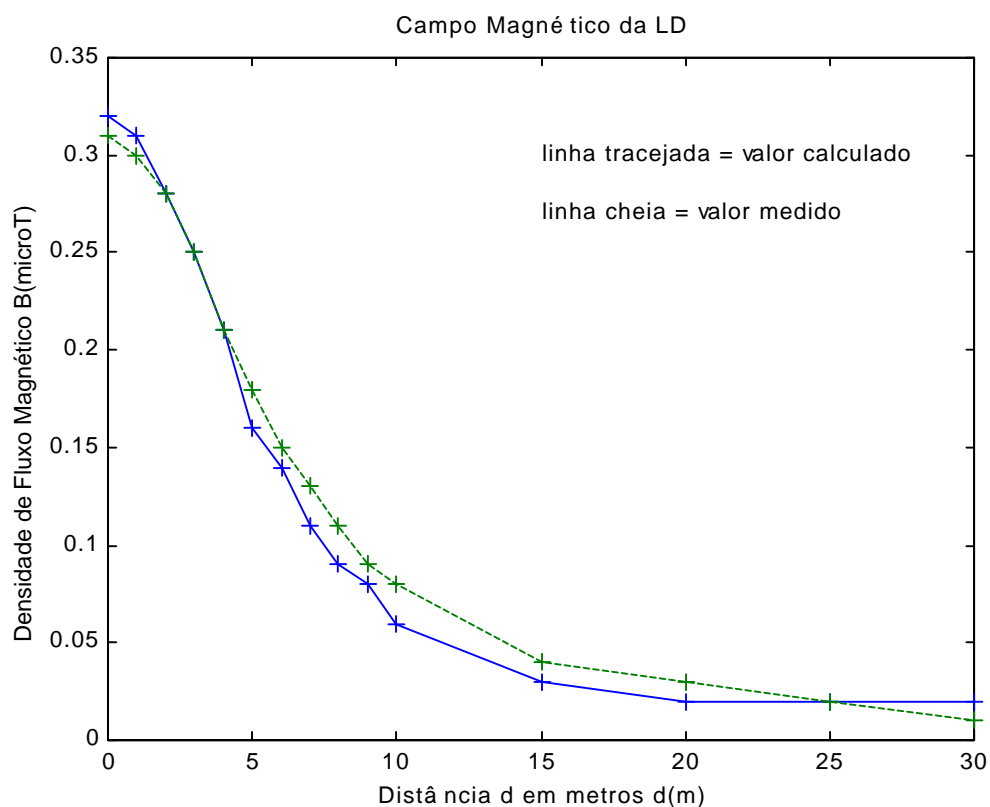


Figura 3.b – Resultados de Campo Magnético LD 13.8kV

LTs de 138kV, 230kV, 345kV e 500kV:

As LT's, onde foram realizadas as medições, são configurações típicas encontradas no estado de Minas Gerais para os níveis de tensão de 138, 230, 345 e 500 kV. Nestas configurações será considerada para o cálculo a altura cabo-solo encontrada no local da medição, que na maioria das vezes não corresponde ao dado estrutural da altura do condutor na torre. Os valores máximos da distância lateral à torre são diferentes para algumas configurações, dada a dificuldade de percorrer grandes distâncias em certas situações de terreno. As curvas do campo

magnético serão apresentadas para cada configuração típica, baseadas nos valores medidos e calculados a partir da corrente da linha fornecida pela leitura nas subestações (SE's) da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

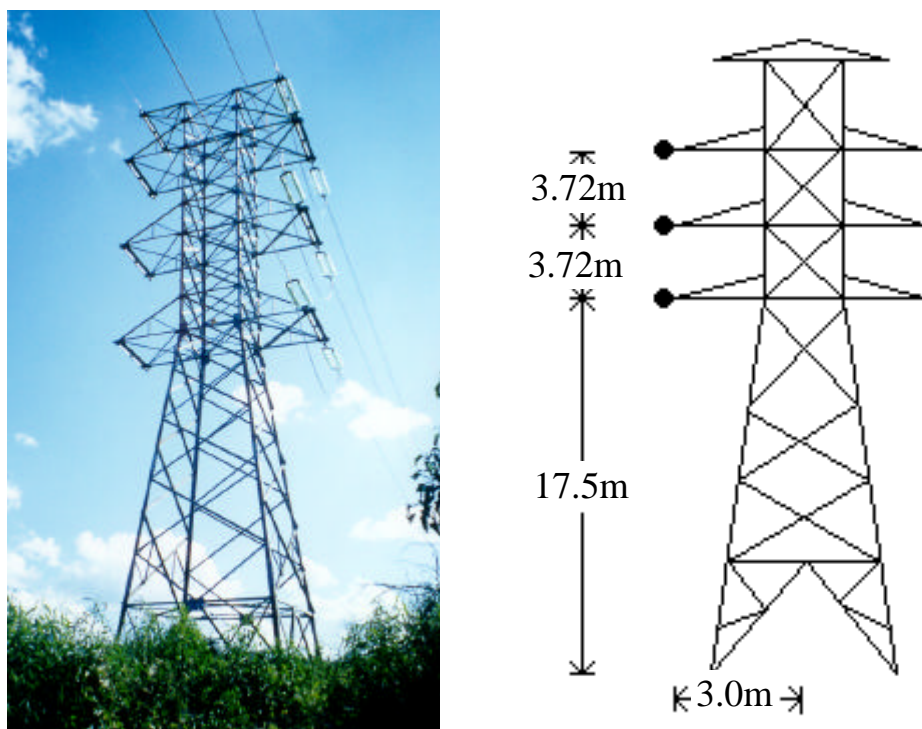


Figura 4.a – Configuração Típica da LT 138kV

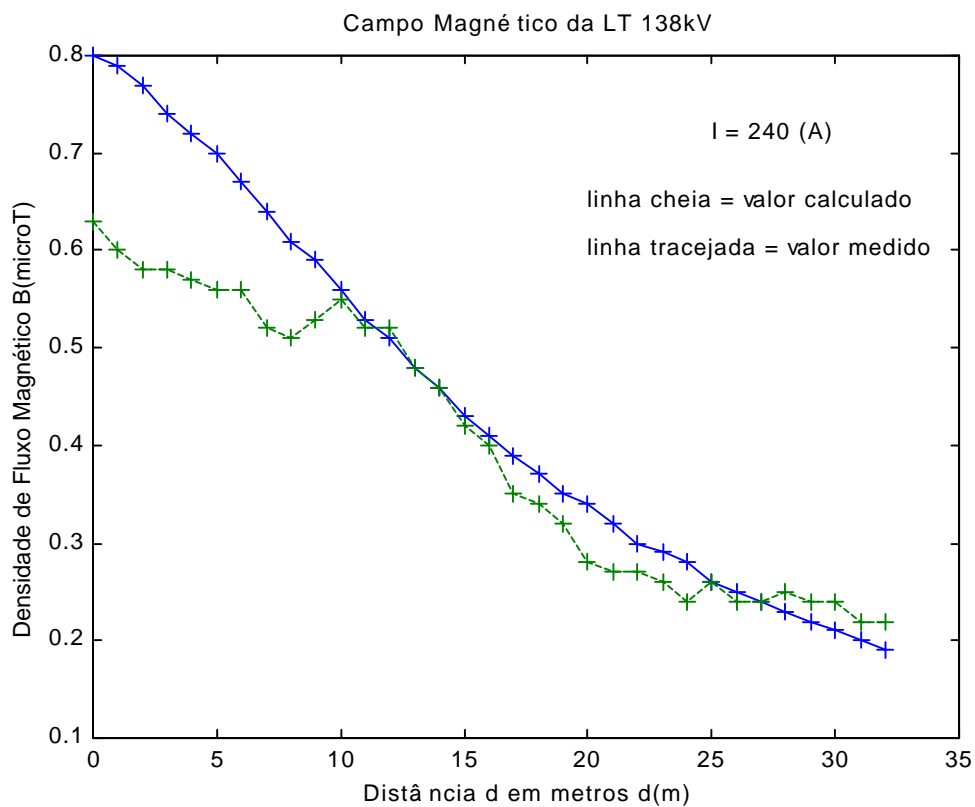


Figura 4.b – Resultados do Campo Magnético da LT 138kV

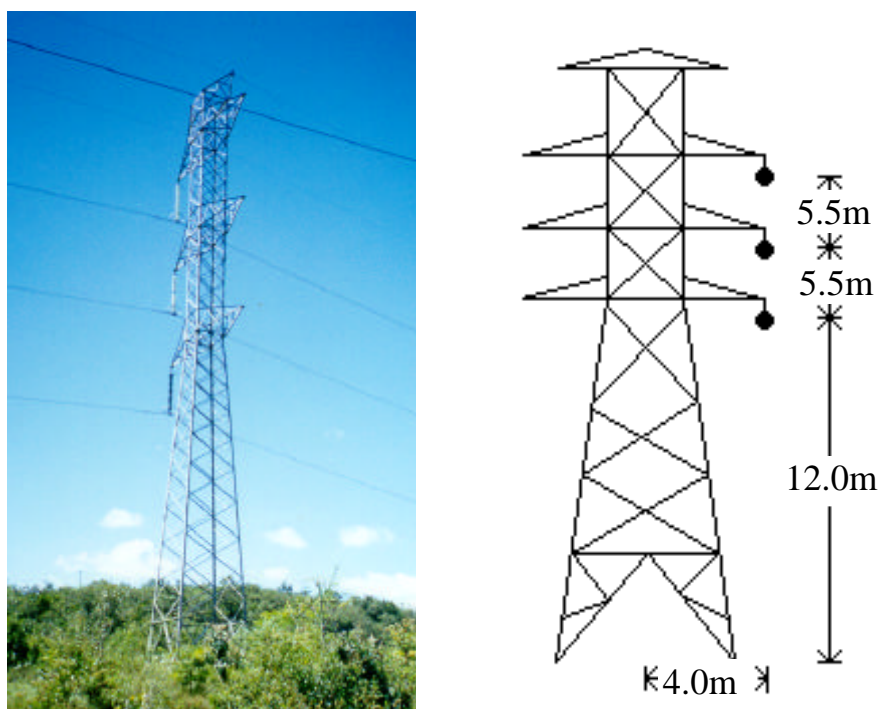


Figura 5.a – Configuração Típica da LT 230kV

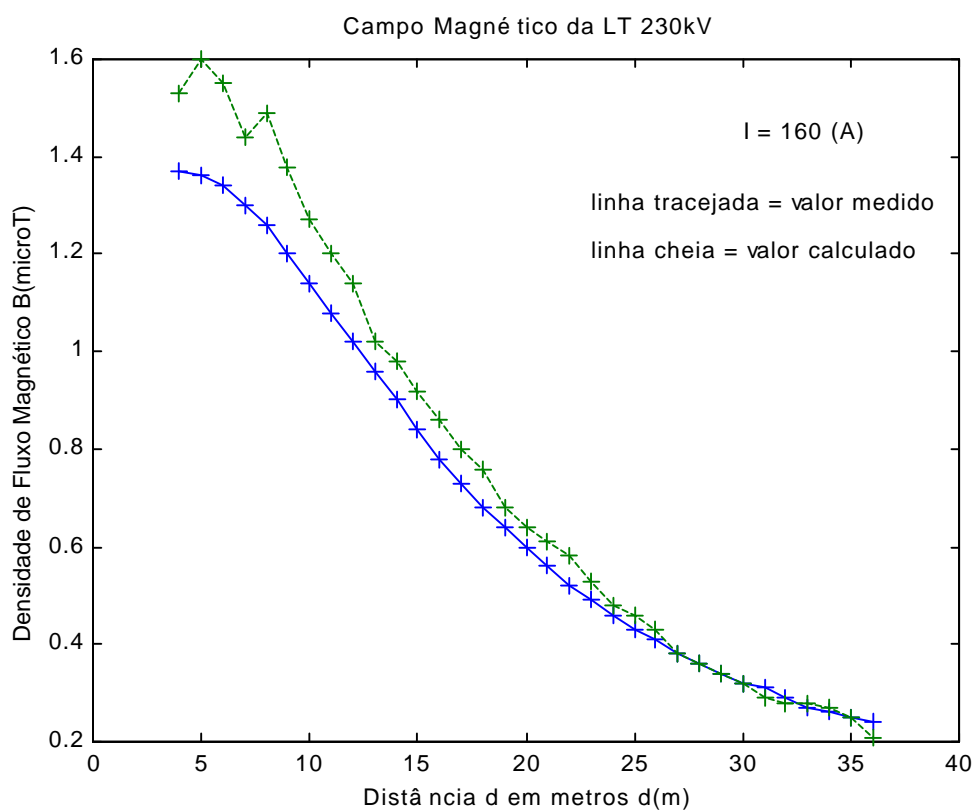


Figura 5.b – Resultados do Campo Magnético da LT 230kV

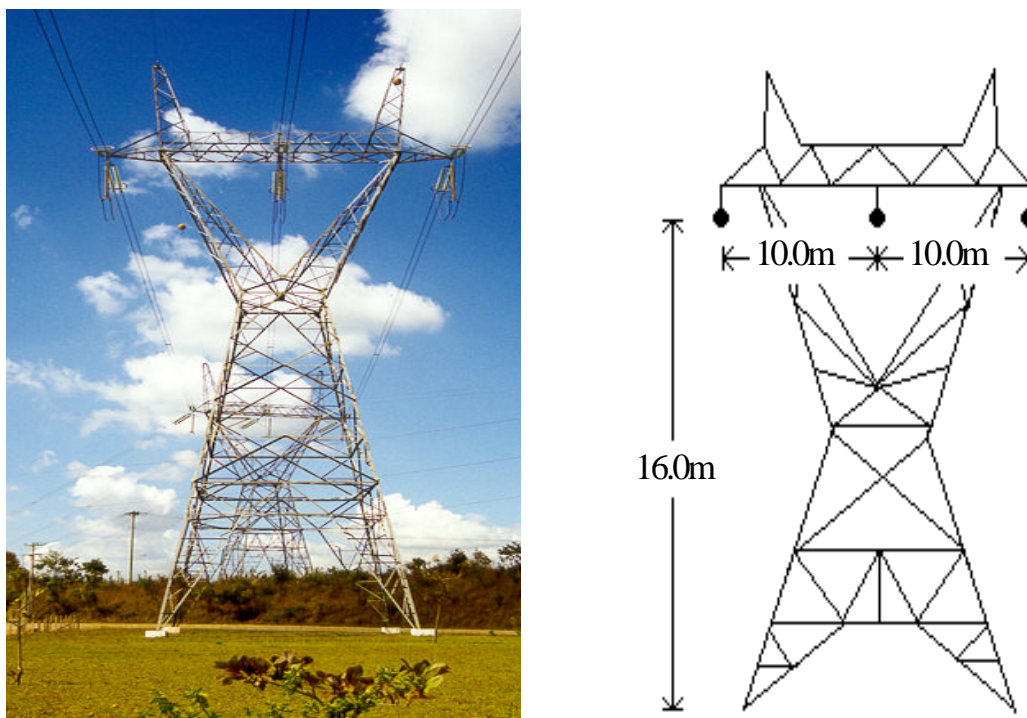


Figura 6.a – Configuração Típica da LT 345kV Taquaril/Neves - MG

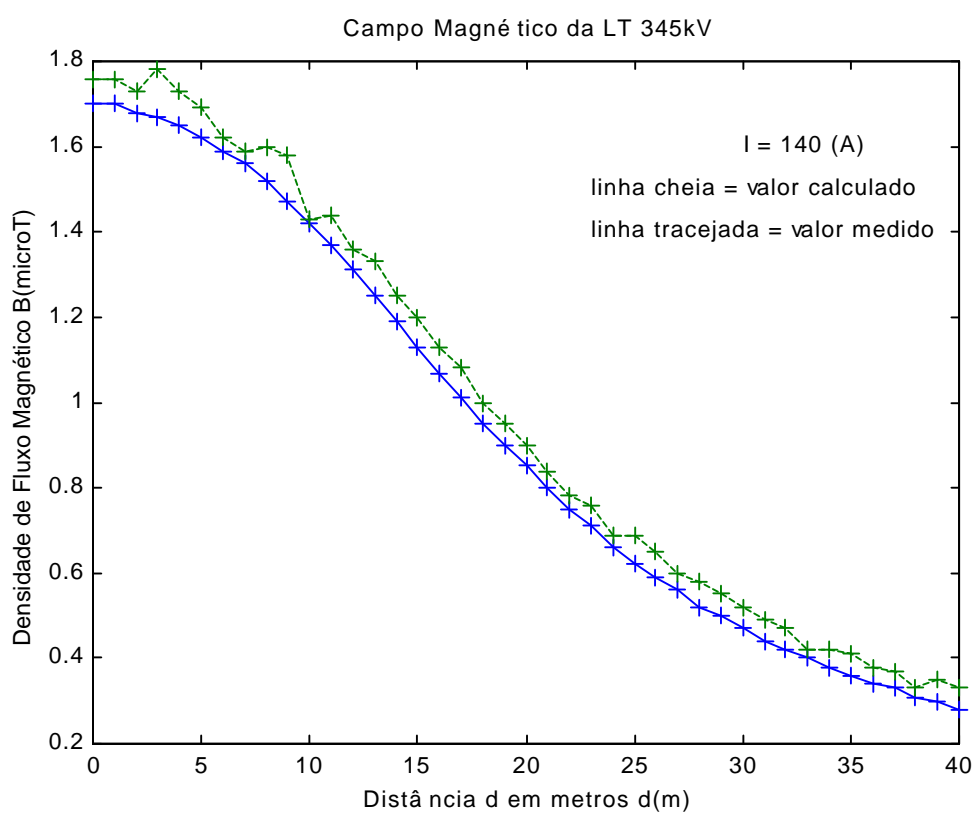


Figura 6.b – Resultados do Campo Magnético da LT 345kV

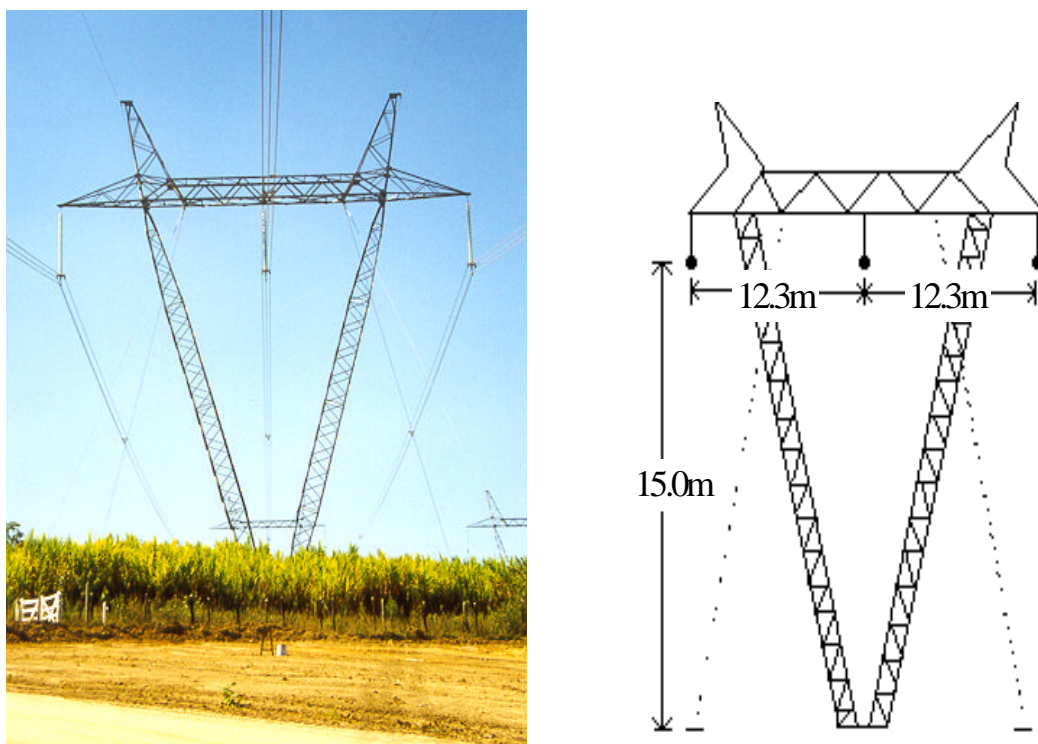


Figura 7.a – Configuração Típica da LT 500kV São Gotardo II/Neves – MG

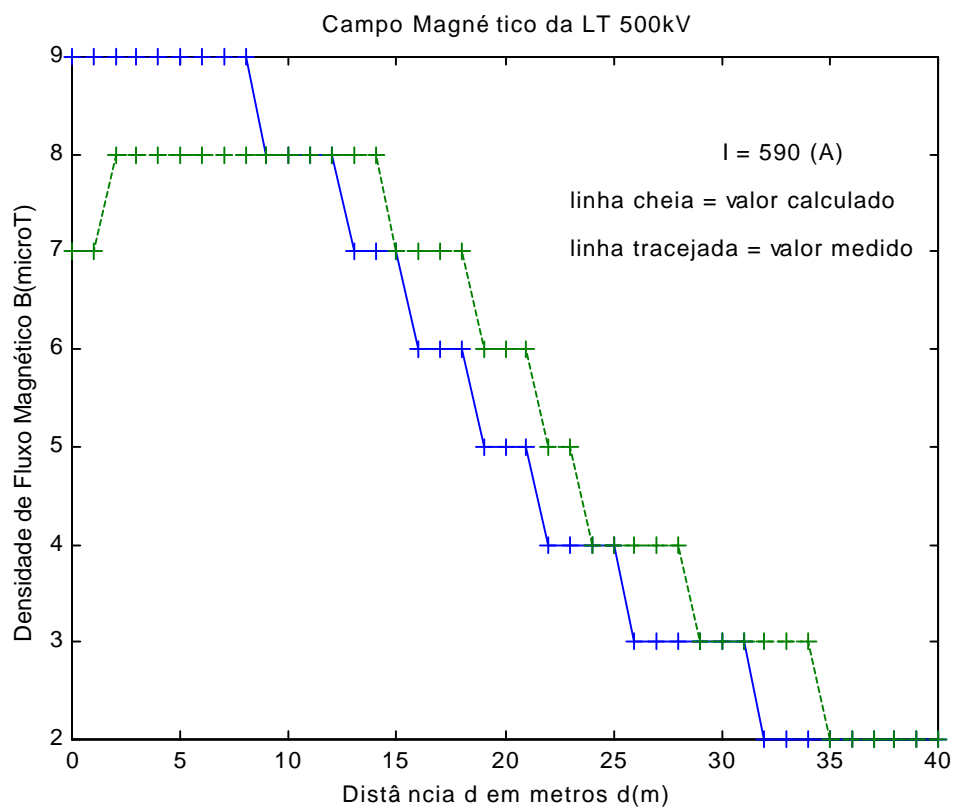
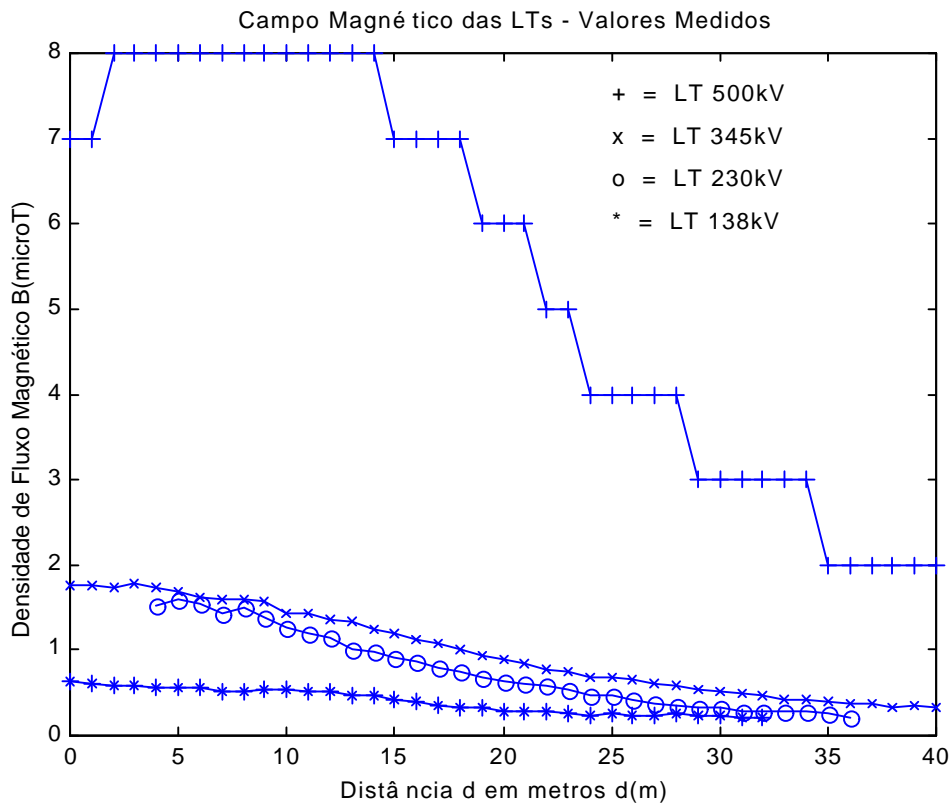


Figura 7.b – Resultados do Campo Magnético da LT 500kV

- A Figura 8 a seguir ilustra em um mesmo gráfico os valores medidos de campo magnético para as diferentes LTs estudadas. Observa-se claramente que os maiores valores de campo magnético (densidade de fluxo magnético) não superam $10\mu\text{T}$.



Estudo Laboratorial *in vivo*:

A seguir apresentamos os resultados do estudo laboratorial *in vivo* desenvolvido que se baseiam na contribuição de [Vil,99].

Obtenção dos Animais:

Os animais (ratos) necessários para o desenvolvimento do estudo foram obtidos a partir de acasalamentos poligâmicos (3 fêmeas + 1 macho), realizados no Biotério do ICBS PUC-Minas, local onde também se deu todo o desenvolvimento do experimento.

Montagem dos Grupos:

Após a obtenção dos 200 ratos fêmeas da raça Wistar, esperou-se que os mesmos atingissem a fase adulta (9 a 11 semanas). Estes animais foram então divididos em 4 grupos, iniciando o experimento. Os grupos foram montados da seguinte forma, ver Fig. 9. O grupo 01 foi composto por 60 ratos (5 ratos/gaiola), os quais foram submetidos a uma rotina de exposição a campos magnéticos de 60Hz com densidade de fluxo média $B=0.5\text{ mT}$. Os animais deste grupo não sofreram o

tratamento químico com o 7,12-dimethylbez(a)anthracene (DMBA). Apenas uma dose de 0,4 ml/rato do solvente éter de petróleo (benzina branca), utilizado para diluir a droga, foi ministrada aos mesmos. Logo após a aplicação do solvente iniciou-se a rotina de exposição ao campo deste grupo. A exposição ao campo foi de 24h/dia durante 7 dias/semana, exceto nos horários reservados para apalpar e pesar as cobaias e para executar a limpeza das gaiolas.

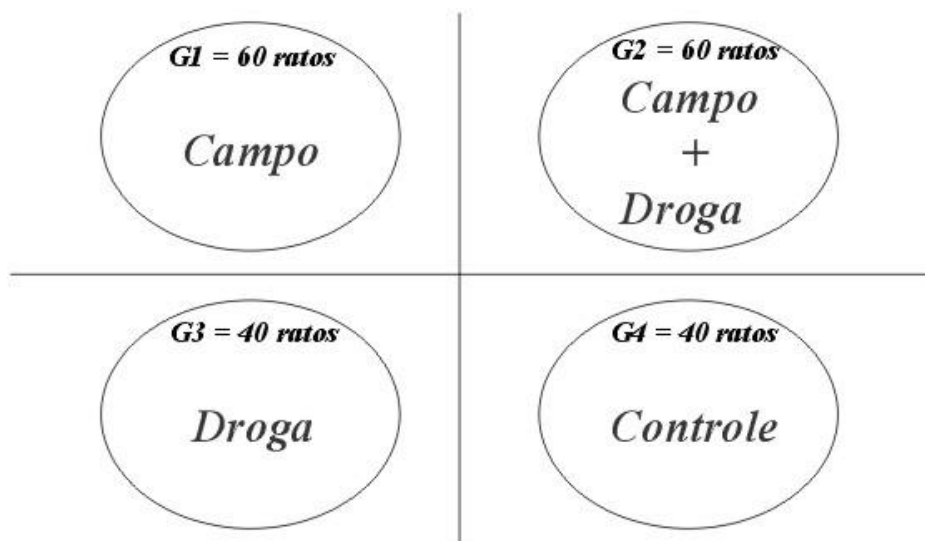


Figura 9 – Especificação dos 4 Grupos de Estudo

O grupo 02 foi composto por 60 ratos (5 ratos/gaiola) que foram previamente tratados com DMBA diluído em 0,4ml/rato de benzina branca, sendo ministrado em dose de 5mg/rato. A aplicação inicial da droga foi feita antes do início da exposição. O tratamento com DMBA nestes ratos se repetiu em intervalos semanais, compondo um total de quatro aplicações por animal, o que correspondeu a uma dose de 20mg/rato de DMBA. A rotina de exposição para este grupo foi a mesma descrita para o grupo 1.

O grupo 03 foi composto por 40 (5 ratos/gaiola), os quais não foram submetidos a rotina de exposição ao campo magnético. Os animais deste grupo sofreram apenas a influência do tratamento químico com DMBA, que como no grupo 02 foi concluído após quatro aplicações semanais por animal, totalizando uma dose de 20mg/rato.

O grupo 04 foi montado com 40 animais (5 ratos/gaiola). Este grupo não se submeteu ao tratamento inicial com DMBA e os ratos não sofreram a rotina de exposição ao campo, apenas receberam uma aplicação de 0,4ml/ratos de solvente. O papel deste grupo foi o de atuar como controle. Com a finalidade de isolar a possibilidade da influência do solvente na incidência de tumores nos ratos, todos os quatro grupos receberão a aplicação do solvente (0,4 ml/rato de benzina branca).

Acomodações:

Duas salas distintas pertencentes ao Biotério do ICBS da PUC-Minas, foram usadas na acomodação dos grupos de animais. Estas foram equipadas de forma que as condições necessárias ao desenvolvimento do projeto fossem alcançadas. Os grupos 01 e 02 foram acomodados na sala 1, possuindo as seguintes dimensões

(4,10 x 2,30 x 1,90) metros. O equipamento de exposição foi montado nesta sala. Uma estante de madeira com dimensões (3,10 x 1,65 x 0,41) metros contendo 2 prateleiras espaçadas por 0,40 metros foi montada no interior desta sala. A estante foi usada para a acomodação dos animais (grupo 01 e grupo 02), os quais foram dispostos em gaiolas distribuídas ao longo de suas prateleiras internas e também para permitir a sustentação das espiras do enrolamento do equipamento de exposições. Os animais do grupo 03 e 04 foram colocados em uma sala 2, totalmente isolada da sala 1. A sala 2 possuía (3,5 x 2,30 x 2,15) metros de dimensões e nela uma estante de madeira com (3,10 x 1,65 x 0,41) metros contendo 2 prateleiras espaçadas por 0,40 m, que também foi construída para a acomodação dos animais destes grupos. Os animais de cada grupo foram divididos em números de 5/gaiola, sendo as dimensões das gaiolas (0,32 x 0,19 x 0,40) metros. Desta forma, a estante de madeira da sala 1 que acomodava os grupos 01 e 02, sustentava ao longo de suas prateleiras 12 gaiolas de animais pertencentes ao grupo 01 e 12 gaiolas pertencentes ao grupo 02, totalizando 24 gaiolas de animais. Da mesma maneira na sala 2 os grupos 3 e 4 ocuparam 8 gaiolas cada. Um total de 16 gaiolas foram distribuídas no interior da estante pertencente a esta sala. Um projeto especial feito em acrílico foi usado na fabricação das tampas das gaiolas ocupadas pelos grupos 01 e 02, tendo a finalidade de evitar as distorções das linhas de campo magnético gerados a partir do equipamento de exposição.

Identificação dos Animais:

Os animais no interior de cada gaiola foram identificados através de marcações ao longo de suas caldas. De acordo com a posição das marcas, feitas com azul de metileno, os animais eram identificados como rato 1, 2, 3, 4, 5. Novas remarcações eram feitas sempre que necessário, em geral 1 vez por semana.

Observação, Apalpação e Pesagem:

Iniciada a rotina de exposição ao campo e já com o tratamento químico em andamento nos grupos específicos de animais, esforços foram concentrados no sentido de se executar o rastreamento de possíveis alterações no estado dos animais no decorrer do experimento. Dois observadores realizaram o acompanhamento do estado físico dos animais. Todas as alterações macroscópicas manifestas em cada um dos animais foram devidamente anotadas no decorrer do experimento. Dados sobre a pelagem dos animais, cor dos olhos, mobilidade, sangramento anormal, o aparecimento de nódulos e suas dimensões, alterações das fezes e estresse foram colhidos diariamente durante vistorias às gaiolas. O registro da presença de algum nódulo mediante a apalpação só ocorreu após a existência de um acordo comum no parecer dos dois observadores. Ao longo das doze semanas de duração do experimento os quatro grupos de animais foram regularmente pesados. Os pesos individuais foram registrados para todos os animais até a data do sacrifício. Os animais que morreram antes da conclusão do estudo laboratorial foram pesados imediatamente após a sua morte, registrando-se o último valor de peso.

Alimentação e limpeza das Gaiolas:

A alimentação dos animais se consistiu na dieta padrão de laboratório (ração e água). A limpeza das gaiolas também seguiu a rotina padrão de laboratório.

Sacrifício, Dissecção e Montagens das Lâminas:

Ao final dos três meses do estudo laboratorial, os animais que permaneceram vivos até então foram sacrificados. Um total de 140 animais que sobreviveram ao experimento foram individualmente sacrificados em éter. Logo após, os animais foram submetidos a dissecção. Peças de vários órgãos como: cérebro, pulmão, coração, fígado, rins, baço e intestino foram coletadas. Em seguida, estas peças foram fixadas utilizando-se Bouin e formol a 10%, e submetidas ao processo de inclusão. Após a inclusão, e consequentemente a montagem dos blocos de parafina, estes foram submetidos a cortes seccionais de 4-7 μ cras, utilizados na preparação das lâminas destinadas a análise histopatológicas. Na dissecção, todos os tumores encontrados foram devidamente isolados e também fixados em Bouin, sendo submetidos posteriormente, após a preparação das lâminas, à análises microscópicas. Medições das dimensões dos mesmos foram feitas. Materiais para análises microscópicas também foram colhidos a partir de animais que não sobreviveram até o fim do experimento.

Condições de Temperatura, Luz e Umidade, Som e Vibrações:

Em ambas as salas onde foram acomodados os grupos experimentais, tanto a que possuía o equipamento de exposição (sala 1), quanto a que acomodou os grupos 03 e 04 (sala 2), os animais foram submetidos a iluminação correspondente ao ciclo natural de 12h claro-escuro. Cuidados foram tomados no controle de sons, aquecimento e vibrações a fim de que estes parâmetros não representassem um fator de estresse para os animais.

Sistema de Exposição ao Campo Magnético B:

Um estudo foi desenvolvido com a finalidade de se construir um equipamento de exposição a campo magnético capaz de influenciar 24 gaiolas de animais (12 gaiolas do grupo 1 e 12 gaiolas do grupo 2). Na construção do sistema de exposição, utilizou-se um projeto constituído por 20 espiras com dimensões internas de (0,50 x 0,80 metros), dispostas em 4 blocos distanciados uns dos outros em 0,60 m. Para a obtenção de uma intensidade de campo com valor médio equivalente a 0,5 mT, uma corrente de 50 A foi disponibilizada. Um transformador de distribuição foi utilizado, o qual foi submetido a um ensaio de curto-circuito com a finalidade de se obter o valor alto de corrente. O desenho esquemático do sistema de exposição encontra-se na Fig. 10 a seguir.

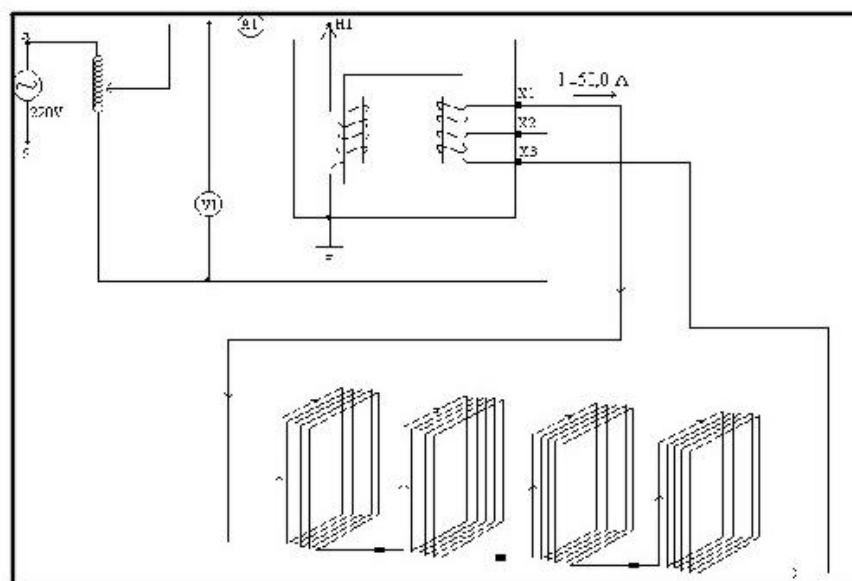


Figura 10 – Equipamento de Exposição

A influência magnética sofrida pelos animais em pontos distintos de suas gaiolas, acomodadas internamente na estante de madeira, deteve-se ao valor mínimo de 0,1 mT e ao valor máximo de 0,8 mT. Um esquema de rotação das gaiolas no interior do equipamento de exposição foi executado semanalmente, objetivando minimizar as diferenças nesta influência magnética.

Análise Estatística:

A avaliação estatística dos resultados obtidos ao final da pesquisa foi feita através do software EPI-INFO.06 [Vil,99]. Para a comparação da incidência de câncer entre os grupos estudados utilizou-se o teste de Qui-Quadrado (teste exato de Fisher) e empregou-se o valor de 5% ($P < 0.05$) como limiar de significância estatística.

Resultados:

Os resultados obtidos serão apresentados de acordo com a divisão dos grupos adotados no estudo laboratorial.

Grupo 01: nenhuma evidência do desenvolvimento de tumores malignos foi constatada macroscopicamente entre os animais deste grupo. Não houve mortes neste grupo, todos os animais com os quais se iniciou o experimento permaneceram vivos até o fim do mesmo. Nenhum caso de câncer foi diagnosticado após a análise histopatológica das 60 lâminas (1/animal) correspondentes aos animais deste grupo.

Grupo 02: 6 casos de desenvolvimento de tumores foram identificados entre os 20 animais que permaneceram vivos até o final do experimento. Em um destes casos, a presença de tumoração só veio a ser detectada a olho nu durante a execução da dissecação do animal, onde se constatou a presença de 2 tumores no baço do animal. Quatro dos 6 animais apresentaram 1 tumor/animal e em 2 animais verificou-se o desenvolvimento de 2 tumores /animal. Medições das dimensões destes tumores (tomando-se o maior diâmetro externo) foram realizadas no decorrer das semanas finais do experimento até a data predefinida para a realização do sacrifício dos animais. Após a análise histopatológica das 20 lâminas (1/animal)

referentes aos 20 animais pertencentes ao grupo 02, diagnosticou-se 6 casos de câncer. Nos outros 14 animais não houve indícios da manifestação de neoplasia. O diagnóstico conclusivo das 6 ocorrências de câncer foi: “*linfoma difuso histiocítico leucemioide de linfonodo com invasão via sanguínea e linfática para o fígado, baço e rins*”. A Fig.11, a seguir, ilustra detalhes de células neoplásicas na luz dos vasos linfáticos invadindo os túbulos renais de uma das cobaias analisadas. A Fig.12 ilustra nódulos metastáticos volumosos em células do fígado de uma das cobaias analisadas.

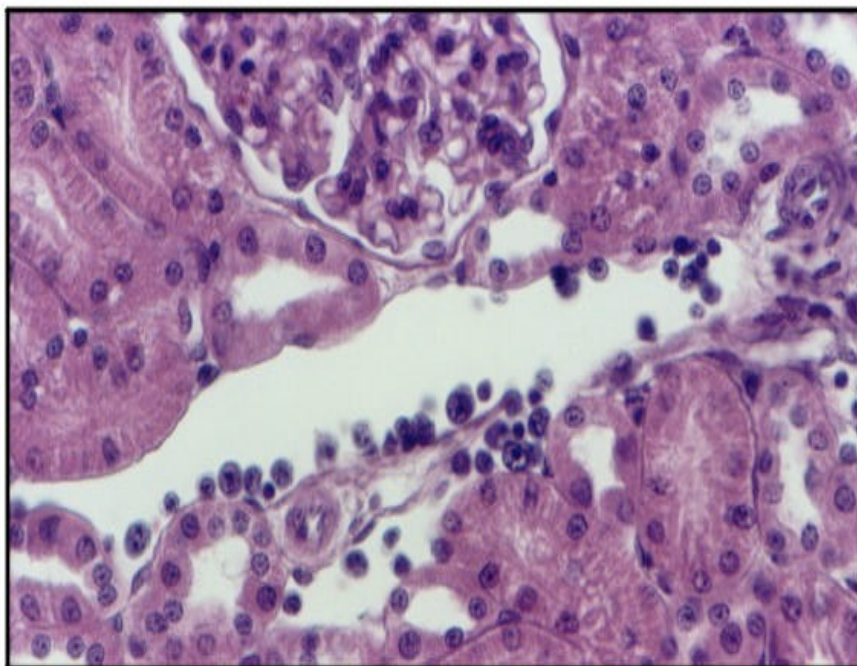


Figura 11 – Rins – HE400x

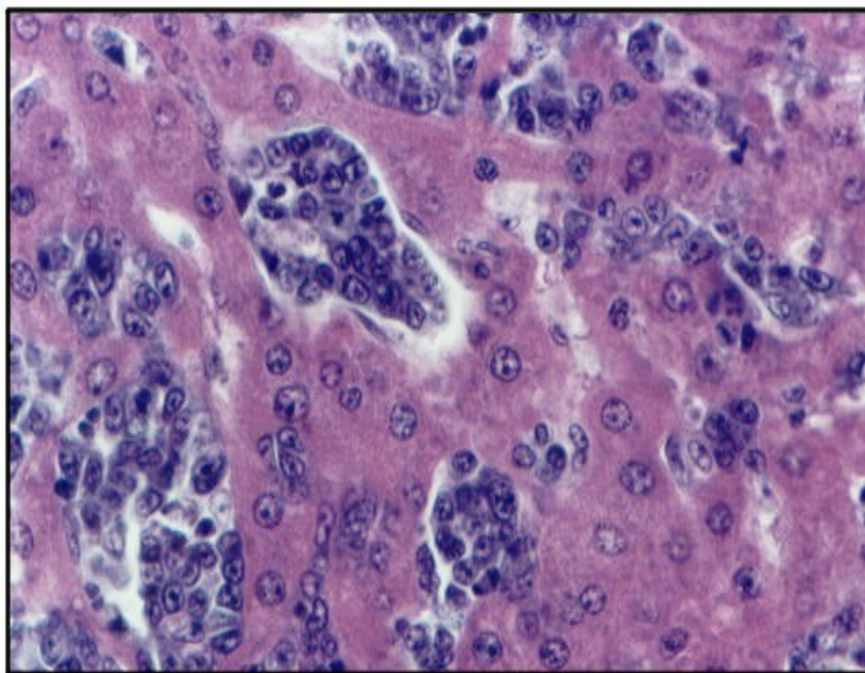


Figura 12 – Fígado – HE 440x

Grupo 03: um caso de desenvolvimento de tumoração maligna, percebido macroscopicamente, foi constatado entre os animais deste grupo. Neste caso, dois tumores foram encontrados no animal, os quais se desenvolveram na região axilar nas proximidades de cada uma das patas dianteiras. Apenas um caso de câncer foi diagnosticado no grupo 03 após a análise histopatológica das 21 lâminas (1/animal) correspondentes aos animais deste grupo (animais vivos até o final dos três meses de experimento). Nenhuma evidência do desenvolvimento de qualquer tipo de neoplasia, no prazo definido como duração do experimento, foi verificada nas lâminas referentes aos 20 animais restantes. O diagnóstico conclusivo da ocorrência única de câncer entre os animais deste grupo foi: *“linfoma histiocítico difuso com invasão via sanguínea e linfática para o baço, fígado e rins”*.

Grupo 04: nenhum indício do desenvolvimento de tumores malignos foi observado macroscopicamente. Nenhuma incidência de câncer foi encontrada entre os animais do grupo 04 após a análise histopatológica das 39 lâminas (1/animal) correspondentes a cada um dos animais deste grupo que completaram vivos o período de duração do experimento.

Após a análise estatística da incidência de neoplasias entre os grupos de estudo concluiu-se que campos magnéticos de baixa frequência (60 Hz) e densidade de fluxo média $B \approx 0,5$ mT, não atuaram como promotores de câncer em animais expostos (24h/dia, durante 7dias/semana no decorrer de três meses) em comparação ao grupo controle. No desenvolvimento de câncer, o campo magnético isoladamente não foi fator de risco estatisticamente significativo ($p = 1,000000$). A incidência de câncer em animais tratados quimicamente com DMBA, em comparação ao grupo controle não foi estatisticamente significativa ($p = 0,3500000$). O tratamento químico com DMBA isoladamente, não foi fator de risco estatisticamente significativo para o desenvolvimento de câncer. Campos magnéticos de baixa frequência (60Hz) e densidade de fluxo média $B \approx 0,5$ mT atuaram como co-promotores de câncer em animais expostos (24h/dia, durante 7dias/semana no decorrer de três meses) e tratados previamente com DMBA. A incidência de câncer entre estes animais em comparação ao grupo controle demonstrou que o campo magnético associado ao tratamento químico com DMBA constitui um fator de risco estatisticamente significativo ($p = 0,0008602$) para o desenvolvimento de câncer. Na associação de campo magnético e tratamento químico com DMBA, tanto o campo magnético como o tratamento químico com DMBA são importantes como fator de risco no desenvolvimento de câncer. A Fig.13 ilustra a porcentagem de incidência de câncer nos quatro grupos de estudo.

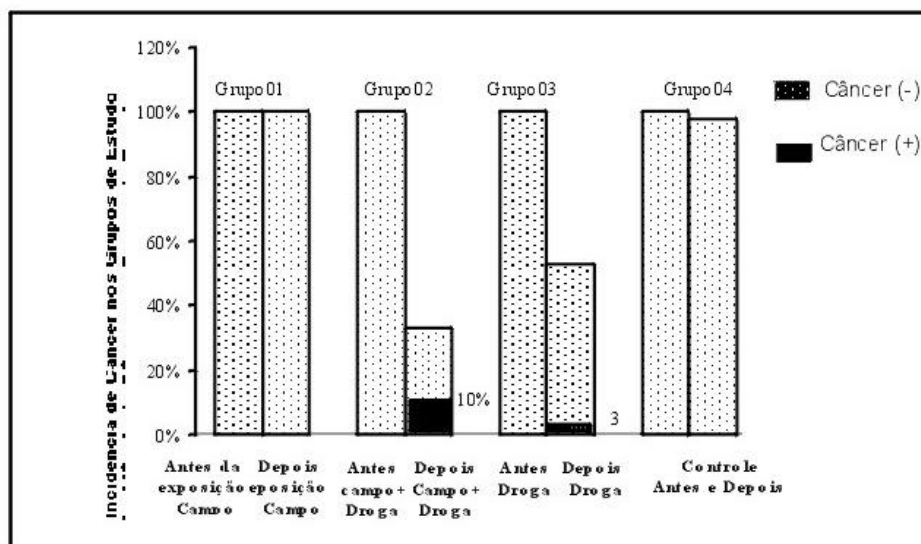


Figura 13 – Porcentagem de Incidência de Câncer nos Grupos de Estudo

CONCLUSÕES

As principais conclusões que alcançamos com este trabalho são as seguintes:

- Os níveis de campos elétricos e magnéticos provenientes de sistemas de energia – LTs, LDs e equipamentos eletrodomésticos em geral – encontram-se abaixo dos limites de exposição sugeridos por normas internacionais (ICNIRP). Os níveis máximos de campos magnéticos encontrados para LTs ficam entre 1 - 10 μ T. Em ambientes residenciais estes níveis ficam entre 0.01 - 0.3 μ T.
- Há evidências estatisticamente significativas – estudos epidemiológicos que utilizaram o “código de cabos” – de que crianças que residem próximas a LTs tem uma probabilidade 1.5 vezes maior de desenvolverem leucemia. Cabe, entretanto, ressaltar que esta associação é fraca.
- Não há evidências de estudos laboratoriais de que a exposição à campos elétricos e magnéticos 60Hz causa diretamente câncer de qualquer natureza em animais. Há entretanto, indícios que de o campo magnético pode atuar como co-promotor de câncer em animais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro das seguintes agências de fomento: Capes, Eletrobrás, CNPq (Projeto PQ:300353/97), Fapemig (Projeto TEC:1962/96) e do FIP (Fundo de Incentivo a Pesquisa) da PUC-Minas.

REFERÊNCIAS

- [Ans,87] ANSI/IEEE. "Procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines". ANSI/IEEE 644-1987. New York:IEEE.

- [Bau,95] Baum, A., et. al., "A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 μ T magnetic field exposure", *Carcinogenesis* 16:119-125, 1995.
- [Ben,91] Beniashvili, D.S., 1991. "Low-frequency electromagnetic radiation enhances the induction of rat mammary tumors by nitrosomethyl urea." *Cancer Letters* 61:75-79.
- [Cai,99] Caires, V.G.; "Caracterização de Campos Eletromagnéticos em Frequência Industrial e de Telefones Celulares"; Dissertação de Mestrado, PPGEE, PUC-Minas, 1999.
- [Epr,93] EPRI (Electric Power Research Institute). "Survey of residential magnetic field sources: goals, results, and conclusions". Vol.1 Project RP3335-02, Palo Alto, CA, USA, 1993.
- [Fey,93] Feychting, M., Ahlbom, A. "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines". *American Journal of Epidemiology* v.138, n. 7, p.467-481,1993.
- [Fra,90] Framwz, M. E., 1990. "Biological effects in mice exposed to 25mT, 60Hz magnetic Field." Abstract of the 12th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society Abstract B-2-3.
- [Gol,96] Goldberg, E.D.; "Literature Resources for Understanding Biological Effects of EM Fields". *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 15:96-101,1996.
- [Lee,97] Leeka, I. K., et. al., "Leukemia risk and occupational electric field exposure in Los Angeles County, California." *American Journal of Epidemiology*, v.146 n^o1 p. 87-90, 1997.
- [Leu,88] Leung, F.C., 1988. "Effects of electric fields on rat mammary tumor development induce by DMBA." Abstract of 10th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society Abstract A-01-2.
- [Los,93] Loscher, W., 1993. "Tumor Promotion in a Breast Cancer Model by Exposure to a Weak Alternating Magnetic Field." *Cancer Letters* 71: 75-81.
- [Mev,93] Mevissen, M., 1993. "Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats." *Bioelectromagnetics* 14: 131-143.
- [Mil,96] Miller, A. B., et. al., "Leukemia following occupational exposure to 60 Hz electric and magnetic fields among Ontario Electric utility workers" *American Journal of Epidemiology* v.144 n^o2 p. 150-160, 1996.
- [Nrc,97] National Research Council. "Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields". National Academy Press, Washington, USA, 1997.
- [Ols,93] Olsen, J.H., et. Al. "Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children." *British Medical Journal*, v.307, p.891-895, 1993.
- [Ram,00] Ramírez, J.A.; "Investigação dos Possíveis Efeitos Biológicos de Campos Eletromagnéticos", Relatório Final Projeto Fapemig TEC:1962/96, 2000.
- [Ran,90] Rannug, A., 1990. "Studies of 50MHz alternating magnetic fields in a rat liver foci bioassay." Abstract of the 12th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society Abstract B-22.
- [Ran,93a] Rannug, A. et al.; "A Study On Skin Tumor Formation In Mice With 50Hz Magnetic Field Exposure". *Carcinogenesis* 14:573-578, 1993.

- [Ran,93b] Rannug, A., et. al., "Rat liver foci study on coexposure with 50Hz magnetic fields and known carcinogens" *Bioelectromagnetics* 14:17-27,1993.
- [Ran,94] Rannug, A. et al.; "Intermittent 50Hz Magnetic Field and Skin Tumor Promotion in SENCAR Mice". *Carcinogenesis* 15:153-157, 1994.
- [Rep,98] Repacholi, M.H.; "Low Level Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields". *Bioelectromagnetics* 19:1-19, 1998.
- [Ret,99] Retes, F.R.P.; "Campos Elétricos e Magnéticos Inseridos no Contexto da Higiene Ocupacional"; Dissertação de Mestrado, PPGEE, PUC-Minas, 1999.
- [Sav,88] Savitz, A.D. et al.; "Case-Control Study of Childhood Cancer and Exposure to 60-Hz Magnetic Fields". *American Journal of Epidemiology*, 128:21-38, 1988.
- [Sav,95] Savitz, A.D. & Loomis, P.D.; "Magnetic Field Exposure In Relation to Leukemia and Brain Cancer Morality Among Electric Utility Workers". *American Journal of Epidemiology*, 141:123-134, 1995.
- [Tyn,94] Tynes, T., et. al. "Leukemia and brain tumors in Norwegian railway workers, a nested case-control study". *American Journal of Epidemiology* v.139, nº7, p.645-653, 1994.
- [Tyn,97] Tynes, T. & Haldorsent, T. "Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines". *American Journal of Epidemiology* v.143, nº3, p.219-226, 1997.
- [Ver,93] Verkasalo, P. K., et. al. "Risk of cancer in Finnish children living close to power lines". *British Medical Journal*, v.307, p.895-899, 1993.
- [Vil,99] Vilas Boas, C.W.; "Campos Magnéticos de Frequência Industrial: Evidências de Possíveis Efeitos Biológicos"; Dissertação de Mestrado, PPGEE, PUC-Minas, 1999.
- [Wer,79] Wertheimer, N. & Leeper, E.; "Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer", *American Journal of Epidemiology*, 109:273-284, 1979.
- [Zec,98] Zecca, L., et. al., "Biological effects of prolonged exposure to ELF electromagnetic: III. 50 Hz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 19:57-66, 1998.

Jaime Arturo Ramírez é natural de Itaú de Minas, Minas Gerais. Ele obteve os graus de bacharel e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – em 1986 e 1990, respectivamente. Jaime Ramírez obteve o grau de PhD pelo Imperial College of Science Technology and Medicine, Londres, Inglaterra, em 1994. Atualmente ele é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. Já coordenou dez projetos de pesquisa, orientou duas teses de doutorado, 5 dissertações de mestrado; e já publicou 70 trabalhos em revistas indexadas e congressos internacionais e nacionais. Ele atua frequentemente como consultor de várias agências de fomento a pesquisa, entre elas destacam-se: Finep, CNPq, Capes, Fapemig e Fapemig. Entre as suas áreas de interesse destacam-se: eletromagnetismo aplicado, efeitos biológicos de campos eletromagnéticos de baixa e alta frequência, otimização: teoria e aplicações, e projetos assistidos por computador. O Prof. Jaime Ramírez é membro fundador da Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo – SBmag – e também é membro do IEEE. Ele pode ser contatado através do seu email: jramirez@cpdee.ufmg.br ou através da sua home-page: <http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez>.

