

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÉMERSON ROSSETTO CAMARGO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO AO CAMPO
ELETROMAGNÉTICO EM
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO AO CAMPO
ELETROMAGNÉTICO EM
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÉMERSON ROSSETTO CAMARGO

**ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO AO CAMPO
ELETROMAGNÉTICO EM
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Campinas – Campinas, Brasil

Msc. Roberto Ricardo Simões de Freire, SENCO Engenharia.

Mestre pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pela paciência e incentivo em todos esses anos de curso.

À minha namorada pela paciência e por sempre acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ary e Marilene, por terem me incentivado sempre a estudar e me darem suporte emocional e financeiro ao longo do curso.

À minha namorada Tatiane pelo amor, amizade, apoio e confiança.

À minha irmã Caroline pela amizade e amor.

Ao Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação e respeito com os alunos.

Ao Eng. Roberto Ricardo Simões de Freire pela oportunidade de aprendizado.

Aos colegas pelas conversas, risadas e auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por oferecer um ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a exposição a campos elétricos e magnéticos em subestações de energia elétrica. Para atingir esse objetivo foram estudados os efeitos da exposição aos campos eletromagnéticos nos tecidos vivos, descrevendo os mecanismos de acoplamento e os efeitos adversos que esses podem causar no corpo humano. Também são apresentadas as normas internacionais e nacionais e seus respectivos limites para a exposição. Finalizando, são apresentados resultados de medições em subestações de ultra alta e alta tensão para avaliar se os campos nesses locais podem ultrapassar os valores apresentados nas normas.

Palavras-chaves: Normas de exposição a Campos Elétricos e Magnéticos. Campos Eletromagnéticos. Subestações de Energia Elétrica.

ABSTRACT

The present work is about the analysis of electromagnetic field exposure in electric power substations. To achieve this goal studies about the effects of electromagnetic fields exposure in living tissues were made, describing the couple mechanisms and the adverses effects that these couples can cause to the human body. Also are shown the internationals and national standards and their respective limits of exposure. Finally, are presents the results of measurements in high and very high voltage substations to determine whether the fields at these sites may exceed the values given in the standards.

Keywords: Electric and Magnetic Fields Exposure Standards. Electromagnetic Fields. Electric Power Substations.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Motivação.....	12
1.2 Apresentação do Problema e Objetivos.....	12
1.3 Estrutura do Trabalho.....	13
2 ELETROMAGNETISMO.....	15
2.1 Equações de Maxwell.....	15
2.2 Potenciais Escalar e Vetorial.....	16
3 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E TECIDOS BIOLÓGICOS	18
3.1 Propriedades Elétricas dos Tecidos:.....	18
3.2 Mecanismos de Acoplamento entre o Campo Eletromagnético e o Corpo Humano: 23	
3.3 Bases Biológicas para Restringir a Exposição:.....	25
3.4 Taxa de Absorção Específica:.....	28
4 NORMAS E QUANTIDADES LIMÍTES.....	30
4.1 IEEE Std c95.6-2002:.....	30
4.2 Diretiva 2004/20/EC:.....	34
4.3 NBR 5422:.....	40
5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	42
5.1 Subestação de Rosiori, Romênia:.....	42
5.2 Subestações de Cluj, Romênia:.....	45
5.3 Instalações Elétricas da Eletropaulo.....	47
6 CONCLUSÃO.....	49
7REFERÊNCIAS.....	52

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Permissividade (ϵ) e condutividade (σ) como função da frequência.....	20
Figura 2: Condutividade e Permissividade de um tecido muscular.....	22
Figura 3: Exemplos de acoplamentos eletromagnéticos.....	23
Figura 4: Arranjo geral da subestação de Rosiori.....	42
Figura 5: Distribuição do campo magnético em mA/m.....	43
Figura 6: Distribuição do campo elétrico em kV/m.....	43
Figura 7: Distribuição do campo elétrico com valores superiores a 10 kV/m.....	44
Figura 8: Distribuição do campo elétrico em kV/m nas subestações de Cluj-Sul (a) e Cluj-Centro (b).....	45
Figura 9: Distribuição do campo magnético em mA/m nas subestações de Cluj-Sul (a) e Cluj-Centro (b).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dispersões Elétricas da Bio-matéria.....	21
Tabela 2: Restrições Básicas aplicadas a varias regiões do corpo.....	31
Tabela 3: Exposição Máxima Permitida ao Campo Magnético na Cabeça e Tronco.....	32
Tabela 4: Exposição Máxima Permitida ao Campo Magnético nas pernas e braços.....	32
Tabela 5: Exposição Máxima Permitida a campo elétricos.....	33
Tabela 6: Exposição Máxima Permitida a correntes induzidas e de contato (0-3 kHz).....	34
Tabela 7: Valores máximo de exposição para campos eletromagnéticos (0-300 GHz).....	37
Tabela 8: Valores que desencadeiam a ação.....	38
Tabela 9: Níveis de referência de exposição a campos elétricos e magnéticos.....	41
Tabela 10: Resultados das medições nas instalações da Eletropaulo S.A.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRICEM: Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética.

CEM: Campo Eletromagnético.

EMF: Electric and Magnetic Fields (Campos Elétrico e Magnético).

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

ELF: Extreme Low frequency.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

NAS: National Academy of Sciences. (Acadêmia Nacional de Ciências dos Estados Unidos)

PNS: Peripheral nerve stimulation (Estimulação nervosa periférica).

SE: Subestação de energia elétrica.

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Estudos sobre exposição ocupacional e do público geral a campos eletromagnéticos (CEM) de baixa frequência vêm recebendo maior atenção nos últimos anos devido a existência de efeitos nocivos, como a possível ocorrência de doenças como câncer e leucemia ocasionadas pela exposição da população a estes campos.

Os resultados dos estudos mobilizaram o público a buscar maiores informações sobre o tema. Junto a isso, a necessidade de descobrir até que níveis de exposição os dispositivos eletrônicos podem ser submetidos, torna de grande interesse um método de cálculo que possa prever esses campos com precisão suficiente.

1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

Subestações são instalações elétricas que compreendem equipamentos instalados em ambiente abrigado ou ao tempo, destinado à transformação da tensão, distribuição, controle e proteção da energia elétrica. Esse tipo de instalação tem como objetivo variar o nível de tensão para minimizar as perdas por efeito Joule em linhas de transmissão e distribuição.

Subestações no Brasil trabalham com frequência de 60Hz e, nessa frequência, o campo eletromagnético pode ser considerado quase estático e seus efeitos podem ser analisados separadamente [1].

A intensidade de campo nas proximidades desse tipo de instalações será tratada neste trabalho. São avaliados os efeitos desses campos no corpo humano, índices internacionais de exposição e a necessidade de medição/cálculo dos campos nessas instalações.

A literatura apresenta diversos artigos sobre medição de níveis de campos em subestações de energia elétrica.

Neste trabalho são abordados trabalhos encontrados na literatura que tratam sobre medições realizadas em subestações de energia elétrica.

Inicialmente está apresentado um estudo sobre efeitos biológicos induzidos pelos campos elétrico e magnético no corpo humano. São analisadas as normas internacionais sobre exposição ocupacional e do público e, a seguir, serão abordados os artigos sobre a medição dos campos em subestações de energia elétrica.

Após a análise das medições realizadas foram comparados os valores obtidos com os valores limítrofes que as normas internacionais apresentam. Após essa análise é discutida a necessidade de se fazer esse tipo de avaliação.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, sendo que neste primeiro capítulo são apresentadas as razões que levaram o autor a dissertar sobre esse tema assim como uma breve visão sobre os assuntos que serão desenvolvidos.

O Capítulo 2 apresenta a base do eletromagnetismo – as equações de Maxwell, e comenta simplificações que podem ser feitas para o cálculo de campos de baixa frequência.

O Capítulo 3 trata sobre a interação dos campos eletromagnéticos com os tecidos do corpo humano e apresenta modelagens matemáticas dessas interações.

No Capítulo 4 são descritas as normas que regem a exposição ao campo eletromagnético internacionalmente e nacionalmente através da NBR-5422-1 da ABNT intitulada Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos de 50 e 60Hz.

O Capítulo 5 trata sobre as medições realizadas nacionalmente e internacionalmente em subestações de energia elétrica e os resultados obtidos, bem como suas análises.

As conclusões do trabalho, assim como possíveis melhorias, estão apresentadas no Capítulo 6.

2 ELETROMAGNETISMO

2.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Fenômenos eletromagnéticos são regidos pelas equações de Maxwell, citadas abaixo em sua forma diferencial.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} ; \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{S} ; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 ; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho . \quad (4)$$

Onde:

\vec{E} - Campo Elétrico;

\vec{H} - Campo Magnético;

\vec{D} - Densidade de campo elétrico;

\vec{B} - Densidade de campo magnético;

\vec{S} - Densidade Superficial de corrente elétrica;

ρ - Densidade volumétrica de cargas.

O operador Nabla, ∇ , é dado pela seguinte relação em coordenadas cartesianas:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \vec{k} \quad (5)$$

em que \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} são vetores unitários nas direções x, y e z respectivamente. Utilizando o operador Nabla pode-se obter o rotacional ou o divergente de um vetor através do produto vetorial ou do produto escalar de ∇ com o vetor considerado.

Entre os campos elétrico e Magnético e suas densidades são válidas as seguintes relações para materiais isotrópicos lineares:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad ; \quad (6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad ; \quad (7)$$

$$\vec{S} = \sigma \cdot \vec{E} \quad . \quad (8)$$

Onde:

μ - Permeabilidade magnética [*Henry/metro*];

ϵ - Permeabilidade elétrica [*Faraday/metro*];

σ - Condutividade elétrica [*(Ohm·metro)⁻¹*].

No caso de frequências muito baixas, o comprimento de onda dentro e fora do objeto de estudos torna-se muito grande. Isto implica que a fase dos campos elétrico e magnético podem ser consideradas constantes na vizinhança do objeto e isso permite que seja usada a aproximação para campos quase-estáticos.

Essa aproximação consiste em desprezar as correntes de deslocamento, ou seja, desprezar o termo $\partial \vec{D} / \partial t$ na equação (2), obtendo:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{S} \quad . \quad (9)$$

2.2 POTENCIAIS ESCALAR E VETORIAL

Difícilmente as equações de Maxwell são solucionadas na forma em que estão apresentadas anteriormente, já que isto implicaria encontrar uma solução, analítica ou numérica, que satisfaça varias equações simultaneamente. Por isso costuma-se solucionar uma equação equivalente, a qual decorre das citadas anteriormente.

Para isso as equações de Maxwell são reescritas envolvendo o potencial elétrico (escalar) e o potencial magnético (vetorial):

Do teorema de Helmholtz, vem:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (10)$$

substituindo (10) em (1), obtém-se:

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = -\vec{J} \quad (11)$$

Como o rotacional do gradiente de qualquer função é nulo, pode-se escrever o termo entre parênteses em termos de uma função escalar φ , chamada potencial elétrico

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla \varphi \quad (12)$$

Substituindo (12) nas duas equações de Maxwell remanescentes obtém-se:

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{A}) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (13)$$

$$\left(\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \right) - \nabla \left(\nabla \cdot \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = -\mu_0 \vec{J} \quad (14)$$

Trabalhando apenas com os potenciais elétrico e magnético pode-se reduzir o problema, já que diminuí-se o número de variáveis presentes nas equações.

3 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E TECIDOS BIOLÓGICOS

3.1 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS TECIDOS:

Nesta seção é apresentada uma breve descrição das propriedades dielétricas dos tecidos, já que uma compreensão dessas propriedades é fundamental para a análise de exposição ao campo eletromagnético.

Essas propriedades são dependentes da frequência dos campos eletromagnéticos incidentes. Agora serão apresentados os principais parâmetros eletromagnéticos dos tecidos biológicos.

3.1.1 Permissividade:

A permissividade é um parâmetro que, além de variar com a frequência dos campos eletromagnéticos, varia também com cada tipo de meio biológico [13].

Pode-se entender a permissividade como a quantidade de campo elétrico que interage com o meio exposto, e é medida em Farad por metro [F/m]. Podemos definir a permissividade em relação a permissividade do espaço livre (ϵ_0), sendo esta relação dada em (15) e conhecida como permissividade relativa (ϵ_r).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (15)$$

3.1.2 Permeabilidade Magnética:

Essa grandeza apresenta a capacidade de interação dos meios com o campo magnético, mostrando o potencial desse meio ser mais ou menos suscetível a passagem de fluxo magnético[14].

Da mesma forma que foi feita com a permissividade, podemos definir a permeabilidade magnética (μ) em função do seu valor para o espaço livre (μ_0), obtendo assim a permeabilidade relativa (μ_r). Esta relação está apresentada em (16).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (16)$$

3.1.3 Condutividade:

Segundo [14] quando se estuda casos em que o campo elétrico está envolvido, pode-se classificar os materiais em dois tipos: isolantes (dielétricos) e condutores. A condutividade (σ) expressa a capacidade de conduzir corrente elétrica de um determinado meio, e tem como unidade o Siemens por metro [S/m].

Os tecidos biológicos podem ser descritos como meios dielétricos com perdas, já que apresentam valor de condutividade.

Através dessas propriedades pode-se analisar mais profundamente a interação dos campos eletromagnéticos com o tecido biológico a nível celular, já que essas interações estão relacionadas com a variação da permissividade e condutividade dos tecidos com a frequência dos campos eletromagnéticos a que esses meios biológicos estão expostos.

3.1.4 Regiões de dispersão da bio-matéria:

Tecidos são geralmente muito dispersivos e possuem três regiões de dispersão principais α , β e γ que correspondem as baixas, médias e altas frequências respectivamente, como podemos observar na Figura 1 [2].

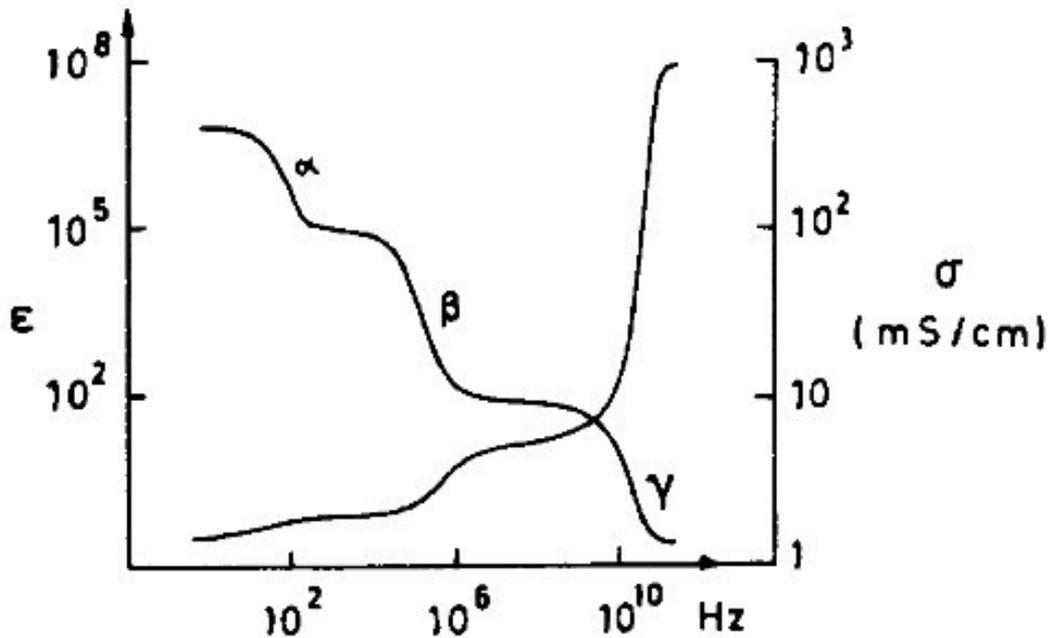


Figura 1: Permissividade (ϵ) e condutividade (σ) como função da frequência.

A região de dispersão α foi inicialmente observada em tecidos musculares e alguns anos depois em suspensões coloidais. O trabalho realizado com essas soluções indica a existência de superfícies capacitivas e indutivas dependentes da frequência. Nos tecidos musculares o retículo sarcoplasmático aparenta ser o principal responsável pela forte dispersão encontrada.

A região β geralmente ocorre no intervalo de 0,1 a 10MHz e é causada pela estrutura celular dos tecidos, com membranas más condutoras que separam o citoplasma e o espaço extra-celular. A constante de tempo para o processo de carga das membranas depende da capacitância da membrana, do raio celular e da resistividade do fluído [2, 3].

A dispersão γ é observada em uma variedade de tecidos e soluções de proteínas acima de 1GHz. Esse efeito é esperado já que há relaxação da água em frequências próximas a 20GHz, e tecidos e células possuem muita água.

Na Tabela 1 são apresentadas vários constituintes dos tecidos biológicos que participam da resposta dielétrica e suas respectivas regiões de dispersão. Esses constituintes variam desde água até células com organelas, proteínas e membranas carregadas [4].

Tabela 1: Dispersões Elétricas da Bio-matéria.

Constituinte	Regiões de Dispersão
Água e eletrólitos	γ
Amino-ácidos	γ^1
Proteínas	$\beta + \gamma^1$
Ácidos nucleicos	$\alpha + \beta + \gamma^1$
Células com membranas + fluídos livres de proteínas	$\beta + \gamma$
Células com membranas e proteínas	$\beta + \gamma^1$
Células com relaxação de membrana	$\alpha + \beta + \gamma$
Células com membranas e sistema tubular	$\alpha + \beta + \gamma$

Cada uma dessas regiões de dispersão pode ser entendida como causada por um mecanismo de polarização com tempo de relaxação τ e modelo Debye para permissividade relativa complexa da forma [11]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (17)$$

Define-se relaxação dielétrica como o tempo (τ) necessário para que o material retorne à sua desordem molecular.

Na prática os efeitos de polarização nos tecidos são mais complexos e as regiões de dispersão estão espalhadas. Esse efeito é geralmente modelado usando o modelo de dispersão de Cole-Cole [11], descrito por

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_n \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha_n}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon} \quad (18)$$

¹A região δ foi desconsiderada neste estudo devido a sua pouca contribuição na dispersão [4].

Onde σ_i é a condutividade iônica estática, α é o parâmetro de espalhamento de dispersão, ϵ_s é a permissividade para a frequência mais baixa do intervalo e ϵ_∞ a permissividade para a maior frequência do intervalo em questão.

A Figura 2 mostra um exemplo de condutividade e permissividade para um tecido muscular.

Como é verificado a permissividade de um tecido pode ser muito alta se comparada a materiais comuns em aplicações técnicas. Na aproximação anterior para campos quase-estáticos foi omitido o efeito da corrente de deslocamento, baseado na suposição que $\epsilon \ll \sigma/\omega$, o que pode ser questionado para alguns tecidos em baixa frequência. O erro devido a essa omissão em cálculos típicos de exposição ao campo eletromagnético é considerado pequeno em relação as incertezas sobre parâmetros do material [5].

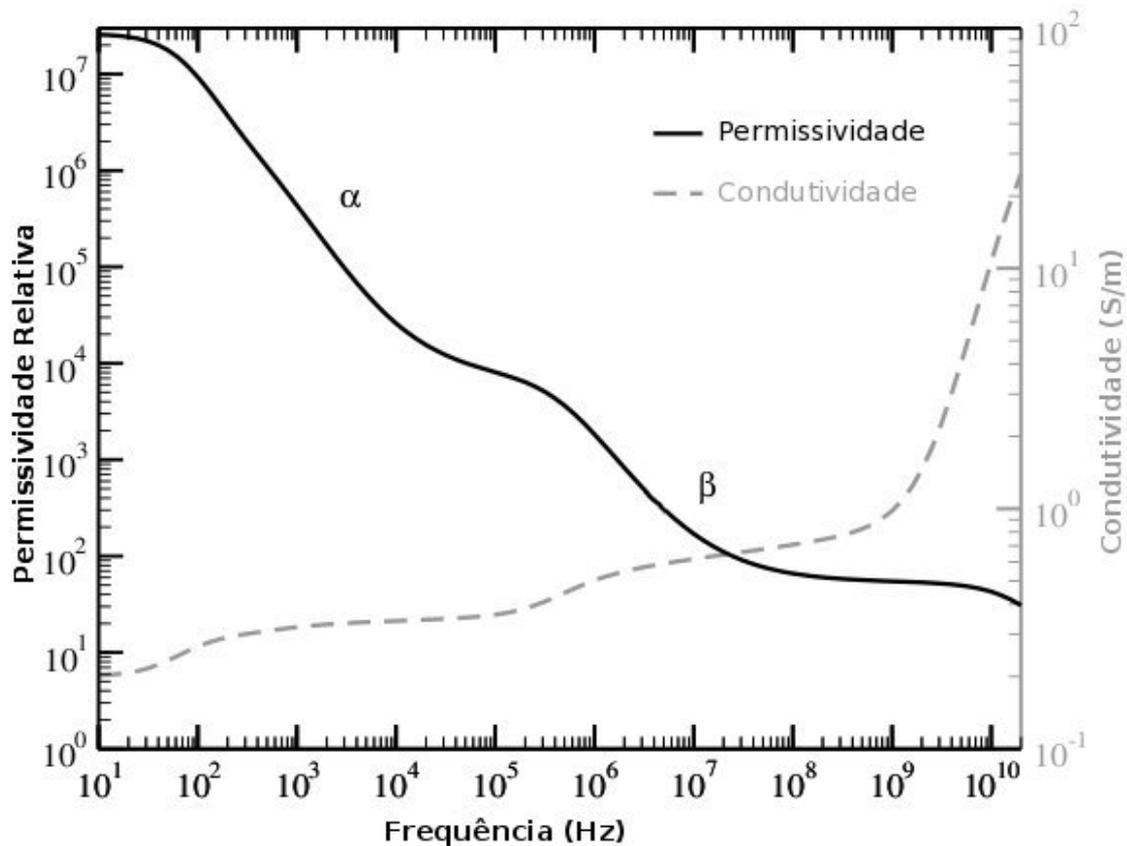


Figura 2: Condutividade e Permissividade de um tecido muscular.

3.2 MECANISMOS DE ACOPLAMENTO ENTRE O CAMPO ELETROMAGNÉTICO E O CORPO HUMANO:

Estão estabelecidos três mecanismos básicos de acoplamento entre os campos eletromagnéticos variantes no tempo e a matéria viva [6]:

1. acoplamento através do campo elétrico de baixa frequência;
2. acoplamento através do campo magnético de baixa frequência;
3. absorção de energia de campos eletromagnéticos.

Nesse estudo não são considerados mecanismos de acoplamento, correntes devido ao contato entre o corpo e um objeto condutor que está em potencial diferente.

O conceito principal dos mecanismos de acoplamento está resumido a seguir. Na figura 3 estão apresentados os efeitos dos acoplamentos 2 e 3.

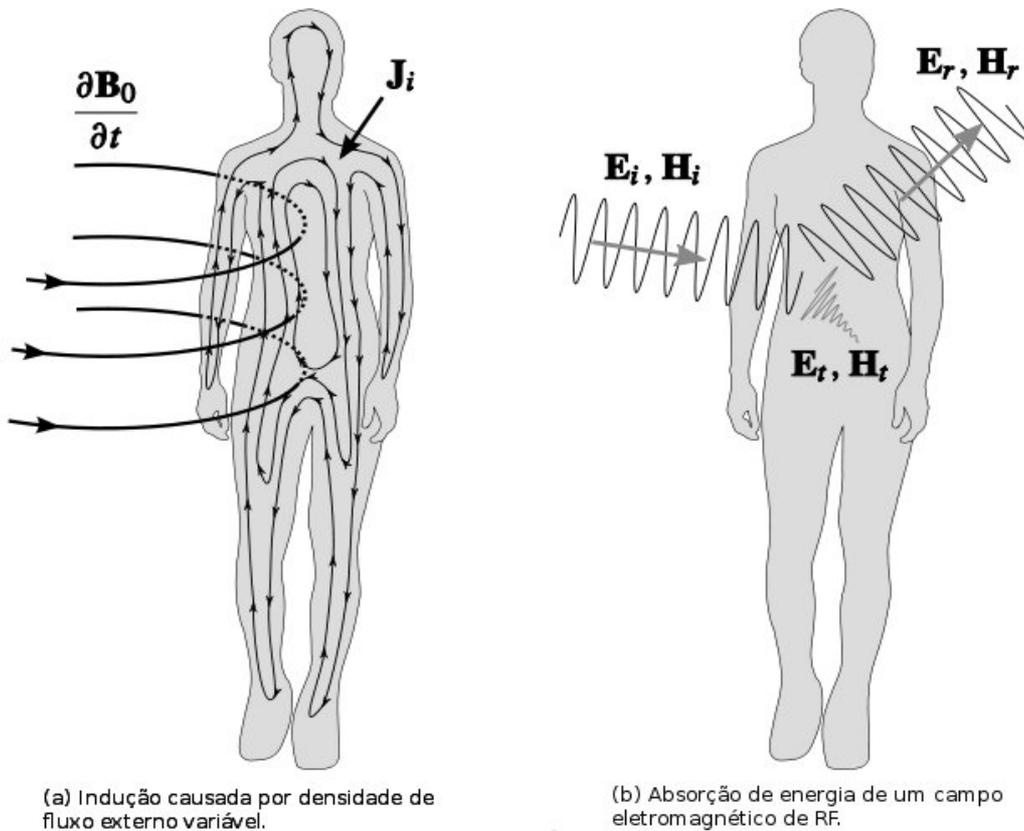


Figura 3: Exemplos de acoplamentos eletromagnéticos.

Campo elétrico de baixa frequência: a interação de campos elétricos variantes no tempo com o corpo humano induz correntes, resulta na formação de dipolos elétricos e na reorientação dos dipolos já presentes no tecido. A magnitude desses efeitos depende das propriedades elétricas do corpo, como condutividade e permissividade, que variam com o tipo de tecido e a frequência do campo aplicado.

Campo magnético de baixa frequência: como o corpo humano é não magnético, um campo magnético estático penetra um corpo estacionário. Na região de baixa frequência o campo magnético variável ou o movimento do corpo no campo magnético induzem forças eletromotoras e correntes. Essas correntes são solenoidais do tipo $\nabla \cdot J = 0$.

Absorção de Energia de Campos eletromagnéticos: em frequências acima de 100KHz é possível haver absorção de energia significativa, o que pode levar a um aumento danoso da temperatura. As áreas que absorvem mais energia variam, dependendo da frequência e, obviamente, da fonte de exposição. Em frequências muito altas, da ordem de dezenas de GHz, a energia é absorvida principalmente na pele, já que o campo não penetra no corpo. Para frequências variando de aproximadamente 300MHz até alguns GHz, podemos observar absorção local e não uniforme [6]. Quanto a absorção de energias os campos eletromagnéticos podem ser divididos em quatro faixas: de 100 KHz a 20 MHz a absorção no tronco decresce rapidamente com a frequência e pode ser significativa no pescoço e nas pernas; de 20 MHz a 300 MHz pode ocorrer uma grande absorção no corpo todo; de 300 MHz a vários GHz ocorre absorção local significativa e não uniforme e acima de 10 GHz, onde a absorção de energia principalmente na superfície do corpo.

Nos casos 2 e 3, a exposição não uniforme é mais difícil de determinar, já que não se pode descrevê-la usando somente a intensidade do campo como medida. Os valores de cada

local dependem da exata geometria e operação da fonte, e então, cada fonte de campo tem que ser considerada separadamente.

Um importante mecanismo de acoplamento entre os campos estáticos e o corpo humano, é a indução de correntes devido ao movimento em campos magnéticos estáticos. A magnitude do campo elétrico induzido para os movimentos da cabeça em campos magnéticos intensos foi medido em [8]. Este tipo de acoplamento pode causar significantes respostas fisiológicas que podem ser usadas, por exemplo, em dispositivos de ressonância magnética.

3.3 BASES BIOLÓGICAS PARA RESTRINGIR A EXPOSIÇÃO:

Os efeitos biológicos de campos eletromagnéticos é um assunto muito estudado, contudo ainda não completamente dominado. Como os efeitos de exposição a campos eletromagnéticos muito fortes têm efeitos prejudiciais a saúde, houve uma necessidade de se criar medidas regulatórias e até mesmo uma legislação específica. Essas medidas foram criadas com base em estudos dos efeitos biológicos provocados por esses campos no corpo humano. Serão mostrados agora alguns desses efeitos, para campos encontrados na literatura [6][7].

- Estimulação Nervosa Periférica (PNS): nervos periféricos têm uma resposta do tipo “tudo ou nada” que pode ser chaveada por um campo elétrico, ou equivalentemente por uma corrente, que causa a despolarização da membrana. O valor em que ocorre a despolarização é dependente da frequência, e em casos severos, como choques elétricos, a estimulação periférica nervosa pode afetar o coração e causar arritmia cardíaca.
- Fosfenos: “é um fenômeno entóptico, caracterizado pela sensação de ver manchas luminosas, causada pela estimulação mecânica, elétrica ou magnética da retina ou do

cortex visual” [9]. Fatores causadores deste fenômeno são a exposição a correntes elétricas de frequência extra baixa e a campos magnéticos. Essas exposições causam a modificação do potencial sináptico da retina, e sua ocorrência é também dependente da frequência, ocorrendo a um nível mínimo em aproximadamente 20Hz.

- Aquecimento: A absorção de energia de campos eletromagnéticos causa aumento de temperatura em tecidos, e esse é um efeito bem estabelecido na literatura. Os níveis mais altos de absorção podem causar danos irreparáveis aos tecidos expostos. Os olhos são particularmente sensíveis, já que o calor pode causar cataratas [10].
- Efeito Magnetohidrodinâmico: causado pela força de Lorentz aplicada a uma partícula carregada, como os íons encontrados no sangue, se movendo em um campo magnético. Esse efeito é associado com campos magnéticos muito intensos, como os encontrados em equipamento de ressonância magnética.
- Tontura: campos magnéticos intensos podem causar sensação de tontura, ou vertigem. Esses efeitos são causados provavelmente pelo campo elétrico induzido que estimula as células ciliadas no sistema vestibular² e as células nervosas conectadas a esse sistema.
- Efeitos Audíveis: o “efeito auditivo de microondas” é um exemplo bem conhecido. Pessoas com audição normal, podem perceber pela audição campos modulados por pulsos, com frequências de aproximadamente 200 MHz a 6,5 GHz. A sensação auditiva tem sido descrita de diversos modos, como um zumbido, estalo, ou estouro,

²Sistema vestibular, ou aparelho vestibular, é o órgão sensorial que detecta as sensações relacionadas com o equilíbrio e se localiza dentro da orelha interna. Ele é composto por um labirinto ósseo contendo o labirinto membranoso, que constitui a parte funcional do aparelho. O labirinto ósseo é composto ainda por uma cavidade central de forma irregular: o vestíbulo. Este é composto principalmente do ducto coclear, de três canais semicirculares e de duas grandes câmaras conhecidas como utrículo e sáculo. O ducto coclear é a principal área sensorial para a audição e não tem nada a ver com o equilíbrio. Todavia, o utrículo, o sáculo e os canais semicirculares são todas partes integrantes dos mecanismos responsáveis pela manutenção do equilíbrio [12].

dependendo das características de modulação do campo. Esses efeitos têm sido atribuídos à interação termoelástica no córtex auditivo do cérebro.

- Eletroporação: campos elétricos intensos formam poros nas membranas celulares e podem causar danos irreversíveis. A intensidade do campo elétrico para que ocorra a eletroporação é bastante alta, e por isso esse efeito é associado com acidentes envolvendo alta tensão. A eletroporação também é usada como mecanismo para inserção de material genético e químico no interior da célula.

Em [6] são citados resultados de estudos epidemiológicos envolvendo a exposição a campos eletromagnéticos e seus resultados, e um breve resumo dessas conclusões estão apresentadas abaixo.

Estudos realizados sobre a possível ligação da exposição a campos eletromagnéticos de frequência extremamente baixa e efeitos na gravidez não apresentam evidências consistentes de efeitos adversos no peso de nascença nem na taxa de crescimento intra-uterino [6].

Muitos estudos sobre a possibilidade de conexão entre a exposição a campos eletromagnéticos de 50/60 Hz e a elevação do risco de câncer foram realizados, desde que Wertheimer e Leeper dissertaram, em 1979, sobre uma associação da mortalidade infantil por câncer e a proximidade das casas às linhas de transmissão.

Há uma grande controvérsia sobre essa conexão no meio acadêmico, já que a pequena amostra com que esses estudos foram realizados causa uma grande incerteza nos resultados obtidos. Apesar disso a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos (NAS) acabou por concluir que as crianças morando perto de linhas de transmissão parecem estar expostas a um risco maior de leucemia.

Também foram realizados estudos sobre a ligação da exposição ocupacional em trabalhadores do setor elétrico e o risco de câncer. Esses estudos ainda não apresentaram nenhuma certeza da conexão da exposição a campos elétricos ou magnéticos com o aumento do risco de câncer, apesar de estudos recentes apresentarem indícios de aumento do número de casos de câncer de mama entre os trabalhadores expostos a campos elétricos de alta intensidade.

3.4 TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA:

Como foi apresentado na seção 3.2, os tecidos biológicos quando expostos a campos eletromagnéticos podem absorver uma quantidade significativa de energia. Para avaliar e criar limites para a quantidade de energia absorvida foi definida matematicamente a Taxa de Absorção Específica (Specific Absorption Rate – SAR). Essa grandeza física é aceita internacionalmente como unidade dosimétrica do nível de energia absorvida por unidade de massa.

$$SAR = \frac{dP}{dm} \quad (19)$$

Onde “P” é a potência e “m” a massa do tecido. Pode-se definir P como:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (20)$$

substituindo (20) em (19) vem:

$$SAR = \frac{d}{dm} \left(\frac{dW}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) \quad (21)$$

Pode-se então definir a Taxa de Absorção específica em função da densidade de massa ρ , dada em kg/m^3 , e a densidade de energia W_v , dada em J/m^3 , obtendo assim a expressão

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{W_v dv}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dW_v}{dt} = \frac{P_v}{\rho} \quad (22)$$

onde $\rho = \frac{dm}{dv}$ e $W_v = \frac{dW}{dv}$.

P_v é a densidade volumétrica de potência em W/m^3 . Define-se a densidade volumétrica de potência absorvida por uma substância por

$$P_v = \frac{dW_v}{dt} = \sigma E^2 \quad (23)$$

onde σ é a condutividade do material em Siemens/m e E é o valor eficaz do campo elétrico.

Substituindo (23) em (22), podemos escrever a Taxa de Absorção Específica como:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (24)$$

Podendo-se medir o campo podemos obter a SAR conhecendo a densidade de massa e a condutividade do material exposto ao campo.

A relação da SAR com o 4.1 IEEE Std c95.6-2002: aumento de temperatura pode ser dada por:

$$SAR = c_p \frac{\Delta T}{dt} \quad (25)$$

onde ΔT é a variação de temperatura em $^{\circ}C$ e c_p é o calor específico do corpo em $J/Kg^{\circ}C$.

4 NORMAS E QUANTIDADES LIMÍTES

Serão analisadas neste trabalho as normas que regem os limites de exposição de Humanos a campos eletromagnéticos de baixa frequência. Nos Estados Unidos esses índices são normatizados pelo IEEE Std. C95.6 (IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz) e na União Europeia pela Diretiva 2004/20/EC. Também serão analisadas as recomendações da NBR 5422 - Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos de 50 E 60 Hz.

4.1 IEEE STD C95.6-2002:

4.1.1 Restrições Básicas:

As restrições básicas citadas na norma se referem a limitação das forças elétricas que podem causar efeitos adversos em tecidos biológicos. Os efeitos nocivos considerados são os apresentados por Reilly [7] e descritos no capítulo anterior desse trabalho.

Na Tabela 2 está reproduzida a tabela que apresenta as restrições para áreas individuais do corpo humano em relação ao campo elétrico incidente.

Nesta tabela são considerados dois parâmetros:

- E_0 : é o campo que provoca a corrente de reobase³ no tecido biológico.
- f_c : é um parâmetro para as frequências da tabela.

³Reobase: é a mínima intensidade de corrente, de tempo teoricamente infinito, necessária para produzir um estímulo elétrico que promova uma contração muscular limiar.

Tabela 2: Restrições Básicas aplicadas a varias regiões do corpo.

Tecido Exposto	f_e (Hz)	Público geral	Ambiente controlado
		$E_0 - \text{rms (V/m)}$	$E_0 - \text{rms (V/m)}$
Cerebro	20	$5,89 \times 10^{-3}$	$1,77 \times 10^{-2}$
Coração	167	0,943	0,943
Mãos, Pulsos, Pés e Tornozelos.	3350	2,10	2,10
Outros Tecidos	3350	0,701	2,10

Os limites são determinados da Tabela 2 através das equações (26) e (27):

$$E_i = E_0, \text{ para } f \leq f_e \quad (26)$$

$$E_i = E_0(f / f_e), \text{ para } f \geq f_e \quad (27)$$

onde E_i é o campo elétrico máximo permitido induzido no tecido.

Em adição às restrições apresentadas na Tabela 2 para o campo elétrico, campos magnéticos menores que 10 Hz devem estar restritos a um valor de pico de 167 mT para o público geral e de 500 mT para ambientes controlados. Para campos magnéticos superiores a 10 Hz não há restrição básica citada no documento.

4.1.2 Exposição Máxima Permitida à Densidade de Fluxo Magnético:

A Tabela 3 apresenta os valores máximos permitidos segundo o IEEE Std C95.6-2002 para a exposição da cabeça e do tronco ao campo magnético. O tempo considerado nas medições RMS são 0,2 segundos para frequências acima de 25 Hz e no mínimo 5 ciclos (não excedendo 10 segundos) para frequências menores que 25 Hz.

Tabela 3: Exposição Máxima Permitida ao Campo Magnético na Cabeça e Tronco.

Frequência (Hz)	Público geral		Ambiente Controlado	
	B – rms (mT)	H – rms (A/m)	B – rms (mT)	H – rms (A/m)
< 0,153	118	$9,39 \times 10^4$	353	$2,81 \times 10^5$
0,153 - 20	18,1/f	$1,44 \times 10^4/f$	54,3/f	$4,32 \times 10^4/f$
20 - 759	0,904	719	2,71	$2,16 \times 10^3$
759 - 3000	687/f	$5,47 \times 10^5/f$	2060/f	$1,64 \times 10^6/f$

Respeitando os valores da Tabela 3 garantimos que os valores de restrição básicos apresentados na Tabela 2 estão sendo respeitados também. Mas se os valores da Tabela 3 não estão sendo respeitados, isto não implica que os valores de restrição básicos não estão dentro do recomendado, sendo então necessário avaliar as restrições básicas.

Caso os valores básicos de restrição estejam sendo cumpridos os valores da Tabela 3 podem ser excedidos.

Para braços e pernas os níveis máximos admissíveis estão listados na Tabela 4. Novamente caso os valores da Tabela 4 estejam sendo respeitados, estamos respeitando também os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 4: Exposição Máxima Permitida ao Campo Magnético nas pernas e braços.

Frequência (Hz)	Público geral	Ambiente Controlado
	B – rms (mT)	B – rms (mT)
< 10,7	353	353
10,7 – 3000	3790/f	3790/f

Caso os valores da Tabela 4 não estejam satisfeitos deveremos avaliar a exposição através dos índices apresentados na Tabela 1.

4.1.3 Exposição Máxima Permitida aos Campos Elétricos:

Para os valores limites de exposição ao campo elétrico o IEEE considera o campo elétrico constante em magnitude, direção e fase relativa em uma região suficiente para envolver o corpo humano.

Os tempos médios para as medidas rms são os mesmos já apresentados no item 4.1.2 para a exposição ao fluxo magnético.

Os limites para exposição a campos elétricos são dados na Tabela 5, e são referentes a exposição de todo o corpo. Esses valores podem ser ultrapassados em ambientes controlados em que o indivíduo exposto não tenha contato com objetos aterrados.

Tabela 5: Exposição Máxima Permitida a campo elétricos.

Público geral		Ambiente Controlado	
Intervalo de frequência (Hz)	E – rms (V/m)	Intervalo de frequência (Hz)	E – rms (V/m)
1 – 368 ^c	5000 ^{a,d}	1 – 272 ^c	20000 ^{b,e}
368 – 3000	$1,84 \times 10^6/f$	272 – 3000	$5,44 \times 10^6/f$
3000	614	3000	1813

^aOs valores máximos permitidos para linhas de transmissão é de 10 kV/m em condições normais de carga.

^bdescargas são facilmente encontradas para campos de 20 kV/m, e possíveis na faixa de 5-10 kV/m se não houver medidas de proteção.

^cOs limites para frequências menores que 1 Hz não são menores que os especificados para 1 Hz.

^dEm campos elétricos de 5 kV/m descargas serão dolorosas para 7% dos adultos (indivíduos bem isolados tocando a terra).

^eO limite de 20000 V/m poderá ser excedido em ambientes controlados caso não haja contato com objetos aterrados.

4.1.4 Valores de Exposição Máximos para Correntes Induzidas e de Contato:

Para as correntes induzidas e de contato o Std C95.6-2002 apresenta os valores reproduzidos na Tabela 6.

Os valores limites nessa tabela são baseados em uma pessoa de pé, isolada do terra, tocando um objeto condutivo aterrado. Esses valores não protegem das sensações adversas momentos antes e depois do contato com o objeto.

Tabela 6: Exposição Máxima Permitida a correntes induzidas e de contato (0-3 kHz).

Condição	Público geral (mA, rms)	Ambiente Controlado (mA, rms)
Ambos os pés	2,70	6,0
Cada pé	1,35	3,0
Contato, segurar	-	3,0
Contato, tocar	0,50	1,5

Esses Limites se aplicam a corrente circulando entre o corpo e o objeto aterrado que pode ser tocado pela pessoa. O valor limite ao contato onde se segura o objeto se aplicam somente a pessoas com treinamento para fazer esse tipo de contato.

4.2 DIRETIVA 2004/20/EC:

A diretiva da União Europeia trata sobre o risco para a saúde e a segurança dos trabalhadores, causados pelos efeitos nocivos conhecidos no corpo humano, devido a exposição a campos eletromagnéticos de curta duração.

Esses efeitos são causados pela circulação de correntes induzidas e pela absorção de energia no corpo humano e também pelos efeitos causados por correntes de contato.

Não foram avaliados pela diretiva os possíveis efeitos de longo prazo causados pela exposição a campos eletromagnéticos, nem considerados os efeitos carcinogênicos devido à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variantes no tempo, pois a diretiva considerou que não há na literatura prova conclusiva sobre a relação entre a exposição a esses campos e a ocorrência de câncer em seres humanos.

Para o melhor entendimento das aplicações da diretiva, o documento 2004/20/EC da União Europeia define os seguintes tópicos:

a) Campo eletromagnético: “qualquer campo magnético estático ou qualquer campo elétrico, magnético ou eletromagnético variável no tempo com frequências até 300 Ghz;”

b) Valores limite de exposição: “limites relativos à exposição a campos eletromagnéticos baseados diretamente em efeitos sobre a saúde já estabelecidos e em considerações biológicas. A observância destes limites garantirá a proteção dos trabalhadores expostos a campos eletromagnéticos contra todos os efeitos prejudiciais conhecidos para a saúde;”

c) Valores que desencadeiam a ação: “magnitude de parâmetros diretamente mensuráveis, fornecidos em termos da intensidade do campo elétrico (E), intensidade do campo magnético (H), densidade do fluxo magnético (B) e densidade de potência (S), a partir do qual devem ser tomadas uma ou mais das medidas especificadas na presente diretiva. A observância destes valores garantirá a observância dos valores limite de exposição aplicáveis.

A observância dos itens “b” e “c” proporcionará, segundo esta diretiva, um elevado nível de proteção contra os efeitos sobre a saúde já conhecidos que resultam da exposição aos campos eletromagnéticos. Entretanto possíveis problemas de interferência ou efeitos adversos

no funcionamento de dispositivos médicos, tais como marca-passos, desfibriladores, implantes cocleares poderão ocorrer.

4.2.1 Valores Limite de Exposição:

Em função da frequência a diretiva cita as seguintes grandezas para analisar os limites de exposição:

- A densidade de corrente (**J**) para campos variáveis no tempo até 1 Hz, para prevenção de efeitos nos sistemas cardiovascular e sistema nervoso central;
- entre 1 Hz e 10 Mhz definem-se valores limites para a densidade de corrente para prevenção de efeitos sobre o sistema nervoso;
- entre 100 Khz e 10 Ghz são dados valores limites de exposição para a taxa de absorção específica (SAR), para prevenir aquecimento excessivo dos tecidos. Nessa faixa de frequências também são descritos valores limite de exposição para a densidade de corrente.
- Entre 10 e 300 Ghz são descritos valores para a densidade de potência para prevenção do aquecimento dos tecidos superficiais do corpo.

Os valores limites de exposição estão apresentado na Tabela 7, onde f é a frequência em Hz. Nessa tabela os valores para densidade de corrente visam proteger contra efeitos de exposição no sistema nervoso central, cabeça e tronco. Esses efeitos são considerados bem estabelecidos pela diretiva da União Europeia na faixa de frequência de 1 Hz a 10 Mhz.

Os valores da SAR devem ser médios e medidos ao longo de 6 minutos sobre uma massa de tecido contíguo de 10g com propriedades elétricas praticamente homogêneas.

As densidades de potência devem ser calculadas como médias numa área exposta de 20 cm² ao longo do período de 68/f1,05 min, onde f é dada em GHz. Esse cálculo visa compensar a redução da profundidade quanto elevamos o valor da frequência.

Tabela 7: Valores máximo de exposição para campos eletromagnéticos (0-300 GHz).

Faixa de frequências	Densidade de corrente para cabeça e tronco (J)	SAR média para todo o corpo	SAR localizada (cabeça e tronco)	SAR localizada (membros)	Densidade de potência
	(mA/m ²) (rms)	(W/kg)	(W/kg)	(W/kg)	(W/m ²)
Até 1 Hz	40	–	–	–	–
1 – 4 Hz	40/f	–	–	–	–
4 – 1000 Hz	10	–	–	–	–
1 – 100 kHz	f/100	–	–	–	–
0,1 – 10 MHz	f/100	0,4	10	20	–
0,01 – 10 GHz	–	0,4	10	20	–
10 – 300 GHz	–	–	–	–	50

4.2.2 Valores que Desencadeiam a Ação:

A diretiva apresenta valores limítrofes em função da frequência para os quais devem ser tomadas atitudes por parte do empregador para assegurar o bem estar do trabalhadores que estão sujeitos aos campos. Estes valores estão apresentados na Tabela 8.

Quando os valores que desencadeiam a ação são ultrapassados a diretiva estipula que devem ser medidos, e se necessário calculados, os índices apresentados na Tabela 7, para garantir que os valores ali estipulados não tenham sido superados.

Tabela 8: Valores que desencadeiam a ação.

Faixa de frequências	Densidade de corrente para cabeça e tronco (J) (mA/m²) (rms)	SAR média para todo o corpo (W/kg)	SAR localizada (cabeça e tronco) (W/kg)		SAR localizada (membros) (W/kg)	Densidade de potência (W/m²)
0 – 1 Hz	–	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	–	1,0	–
1 – 8 Hz	20000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	–	1,0	–
8 – 25 Hz	20000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$	–	1,0	–
0,025 – 0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	–	1,0	–
0,82 – 2,5 kHz	610	24,4	30,7	–	1,0	–
2,5 – 65 kHz	610	24,4	30,7	–	$0,4 f$	–
65 – 100 kHz	610	$1600/f$	$2000/f$	–	$0,4 f$	–
0,1 – 1 MHz	610	$1,6/f$	$2/f$	–	40	–
1 – 10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	$2/f$	–	40	–
10 – 110 MHz	61	0,16	0,2	10	40	100
110 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10	–	–
400 – 2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$0,01 f^{1/2}$	$f/40$	–	–
2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50	–	–

A avaliação, seja ela a medição ou o cálculo, deverá ser planejada e executada por empresas ou pessoas competentes em intervalos apropriados de tempo, conforme o disposto nos artigos 7º e 11º da Diretiva 89/391/CEE. Os dados obtidos com a análise deverão ser arquivados para que possam ser consultados posteriormente.

Se a avaliação constatar que os limites de exposição estão sendo respeitados e que não há risco para a segurança dos trabalhadores expostos, a empresa responsável deverá elaborar e executar um plano de ação com medidas técnicas e/ou organizacionais para evitar que a exposição ultrapasse os valores de limite de exposição.

A diretiva destaca as seguintes medidas a serem tomadas nestes casos:

- a) Mudar a metodologia do trabalho de forma que a exposição aos campos seja reduzida;
- b) escolher equipamentos capazes de executar o trabalho produzindo menos campos eletromagnéticos;
- c) utilização de blindagens ou mecanismos semelhantes, se necessário;
- d) programas adequados de manutenção para equipamentos, local de trabalho e postos de trabalho;
- e) criação e disposição dos locais de trabalho;
- f) limitação da duração e da intensidade da exposição;
- g) disponibilização de equipamentos de proteção individuais (EPI's) adequados.

A diretiva destaca que os locais onde os valores que desencadeiam a ação podem ser superados devem ser identificados, delimitados e de acesso restrito se isso for tecnicamente possível.

Os trabalhadores expostos ao risco devem ser mantidos informados a respeito do resultado da avaliação e deverão receber o treinamento necessário para entender os valores e conceitos relativos aos valores que desencadeiam a ação, valores limite de exposição e dos riscos associados a esses valores.

Caso a avaliação indique que os valores limite de exposição foram ultrapassados a empresa deverá tomar providências imediatas para redução desses níveis, identificação das causas que levaram ao rompimento dos valores limite e alteração das medidas de proteção e prevenção para que se evite novos valores de campo acima do permitido.

Segundo a diretiva em hipótese alguma os trabalhadores devem estar sujeitos a exposições de campos que superem os valores limite de exposição.

4.3 NBR 5422:

A Norma Brasileira 5422 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) trata sobre a medição de campos eletromagnéticos de 50 e 60 Hz. Apesar de tratar quase que especificamente dos métodos de medição, e da instrumentação usada para esse fim, esta norma trata no seu capítulo 6 sobre os níveis de referência para exposição humana.

4.3.1 Critérios para estabelecimento do valor de referência:

Como no documento da união europeia, a norma brasileira também define seus valores de referência nos efeitos biológicos comprovados, devido às exposições de curto prazo e com efeitos imediatos.

4.3.2 Valores de Referência:

Os valores de referência utilizados na NBR-5422 tem como base a densidade de corrente elétrica. Foi utilizado um valor de 100 mA/m² como base, já podem acontecer mudanças na excitabilidade do sistema nervoso central e também outros efeitos como o fosfeno.

Existe a possibilidade, de acordo com a norma brasileira, de excedência desses valores, sendo necessária então uma análise para que seja verificado que as densidades de corrente estabelecidas não foram ultrapassadas. A norma não traz detalhes de como e quem deve fazer essa análise.

Através do valor de base foram calculadas as densidades de correntes para a população ocupacional e para o público em geral. Para a exposição ocupacional foi adotado um fator de segurança de 10, sendo então a densidade de corrente permitida para os campo de 10 mA/m². Para o público em geral foi adotado um fator de segurança de 50, chegando então em uma densidade de corrente de 2 mA/m².

4.3.3 Níveis de Referência:

Na Tabela 9 estão os níveis de referência para o campo elétrico e magnético que atendem as condições básicas citadas anteriormente.

Tabela 9: Níveis de referência de exposição a campos elétricos e magnéticos.

Frequências	50 Hz		60 Hz	
	Elétrico (kV/m)	Magnético (μ T)	Elétrico (kV/m)	Magnético (μ T)
População ocupacional	10	500	8,3	416,5
Público em geral	5	100	4,16	83,3

5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO

5.1 SUBESTAÇÃO DE ROSIORI, ROMÊNIA:

Irá se discutir agora os resultados de medição do campo elétrico e magnético realizados [15] para a subestação de Rosiori. Localizada no noroeste da Romênia essa subestação de 400/220 kV liga o país com o sistema energético da antiga União Soviética.

O arranjo geral da subestação, que ocupa uma área de aproximadamente 6,5 hectares, está apresentado na Figura 4. Observando o arranjo geral da subestação pode-se observar as duas áreas distintas da instalação. À esquerda localiza-se o pátio de 400 kV com as três linhas que interliga a SE Rosiori a outras subestações. À direita encontra-se a área de 220 kV, fazendo a interligação entre essas duas áreas está o transformador de 400 MVA, 400/220 kV.

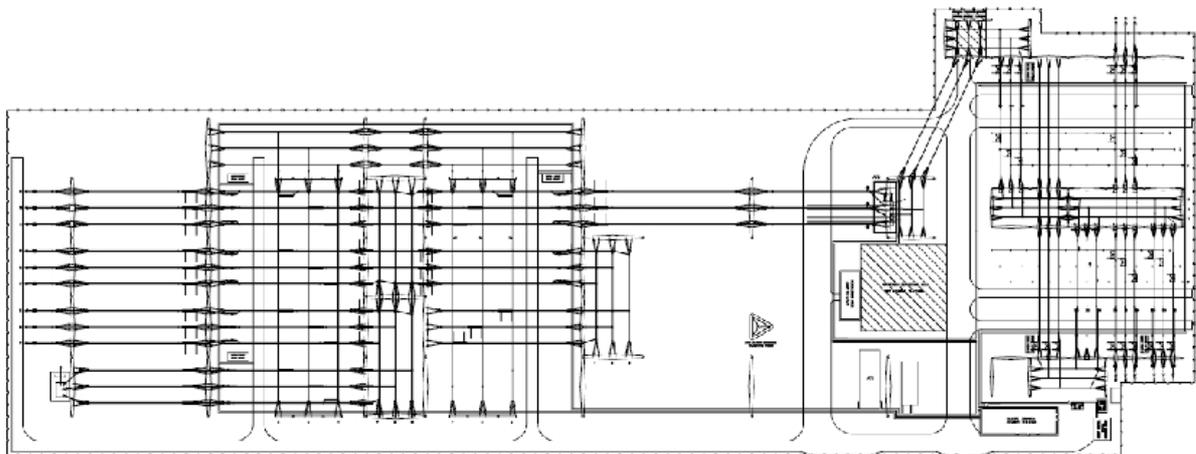


Figura 4: Arranjo geral da subestação de Rosiori.

5.1.1 Métodos de Medição:

Para realizar a medição foram considerados mais de 3 mil pontos de testes, formando uma rede retangular que cobriu toda a área da subestação.

As medidas de campo foram realizadas em linhas perpendiculares às linhas de energia de 400 kV, sendo a distância máxima entre duas linhas de medição existentes igual a 10 metros e entre os pontos de medição nas colunas a distância máxima foi de 3 metros. As linhas foram escolhidas de forma que passassem próximas aos principais equipamentos.

O dispositivo de medição de campo foi instalado a uma altura de 1,7 metros acima do solo. Os resultados da medição de campo magnético e elétrico estão ilustradas nas Figuras 5 e 6 respectivamente.

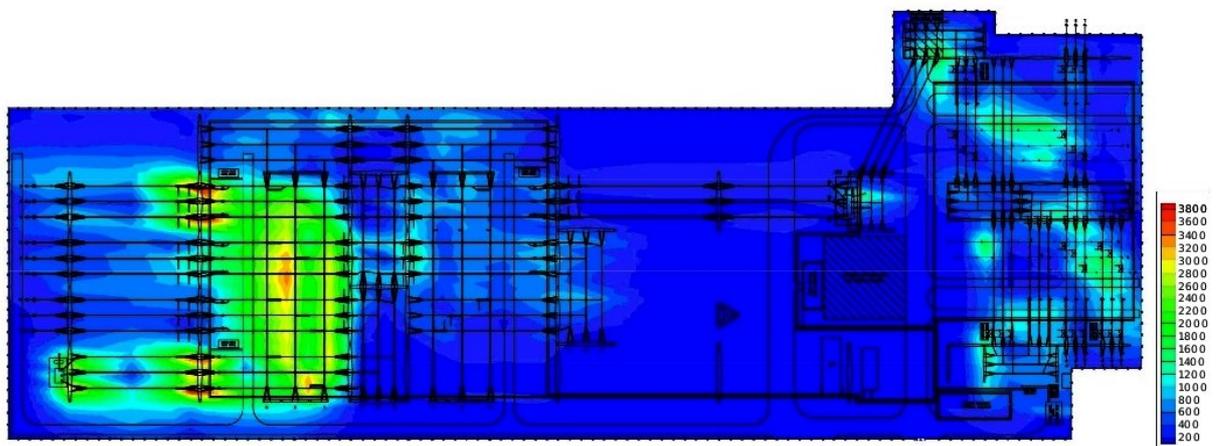


Figura 5: Distribuição do campo magnético em mA/m.

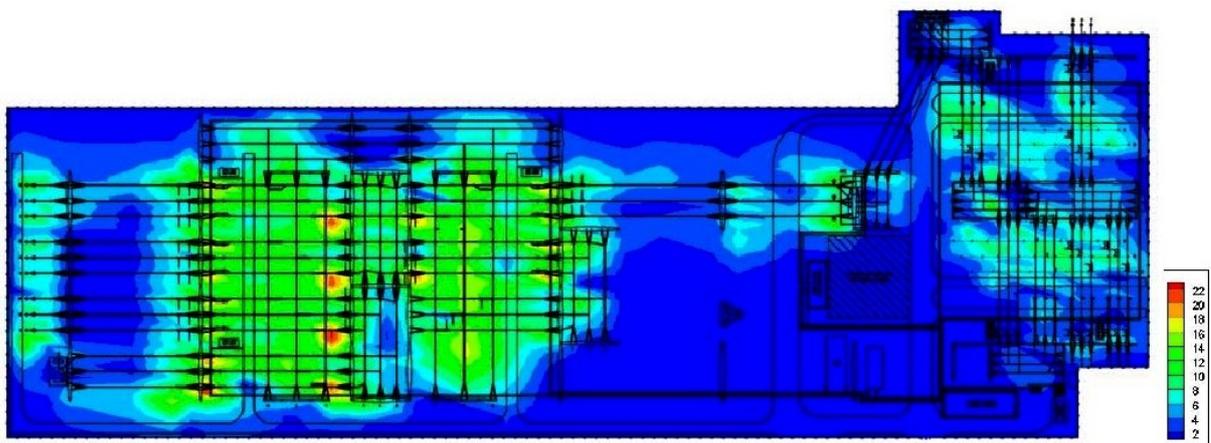


Figura 6: Distribuição do campo elétrico em kV/m.

5.1.2 Resultados Experimentais para o Campo Eletromagnético:

Pode-se observar na Figura 5 que os valores mais altos encontrados para o campo magnético não superam os 4 A/m. Como a Diretiva 2004/20/EC da União Europeia prevê para exposição de profissionais o índice de 400 A/m (para 50 Hz) verifica-se que a exposição humana ao campo eletromagnético na subestação não é considerado nocivo.

O valor de 4 A/m encontrado na subestação possibilita inclusive a exposição por tempo indeterminado, pois está abaixo dos 80 A/m permitidos pela Diretiva para exposição do público.

5.1.3 Resultados Experimentais para o Campo Elétrico:

Para o campo elétrico observa-se, pela Figura 6, que os valores excedem o índice de exposição ocupacional para a frequência de 50 Hz estabelecido pela Diretiva que é de 10 kV/m. Para melhor visualização esta área foi isolada e é mostrada na Figura 7.

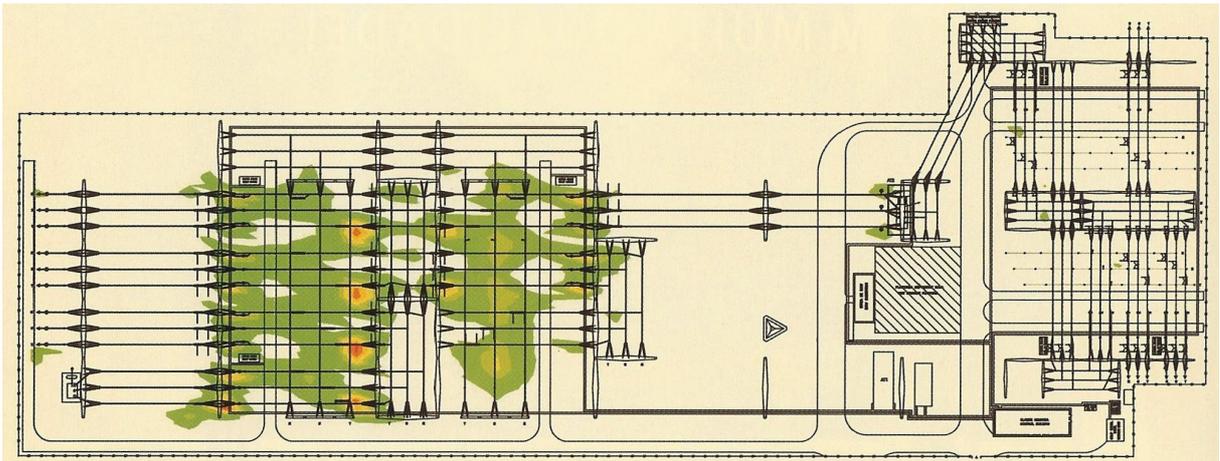


Figura 7: Distribuição do campo elétrico com valores superiores a 10 kV/m.

O campo elétrico atinge valores de até 23 kV/m perto dos disjuntores e seccionadoras, pois nessas áreas a tensão de 400 kV desce até 6,5 metros do solo. O limite de exposição também é ultrapassado na estrada de acesso aos cubículos dos relés que se encontram próximos dos barramentos 1 e 2.

5.2 SUBESTAÇÕES DE CLUJ, ROMÊNIA:

O resultado das medições feitas para duas subestações de 110/20/10 kV localizadas na cidade de Napoca, e como no estudo anterior, também pertencentes ao sistema elétrico da Romênia, está apresentado a seguir [15].

A subestação de Cluj-Sul foram feitas medições em 363 pontos, já para a subestação de Cluj-Centro em 198 pontos. Os métodos de medição obedecem as mesmas regras que foram apresentadas para a subestação de Rosiori.

Os resultados obtidos para o campo elétrico para as duas subestações de Cluj estão na Figura 8.

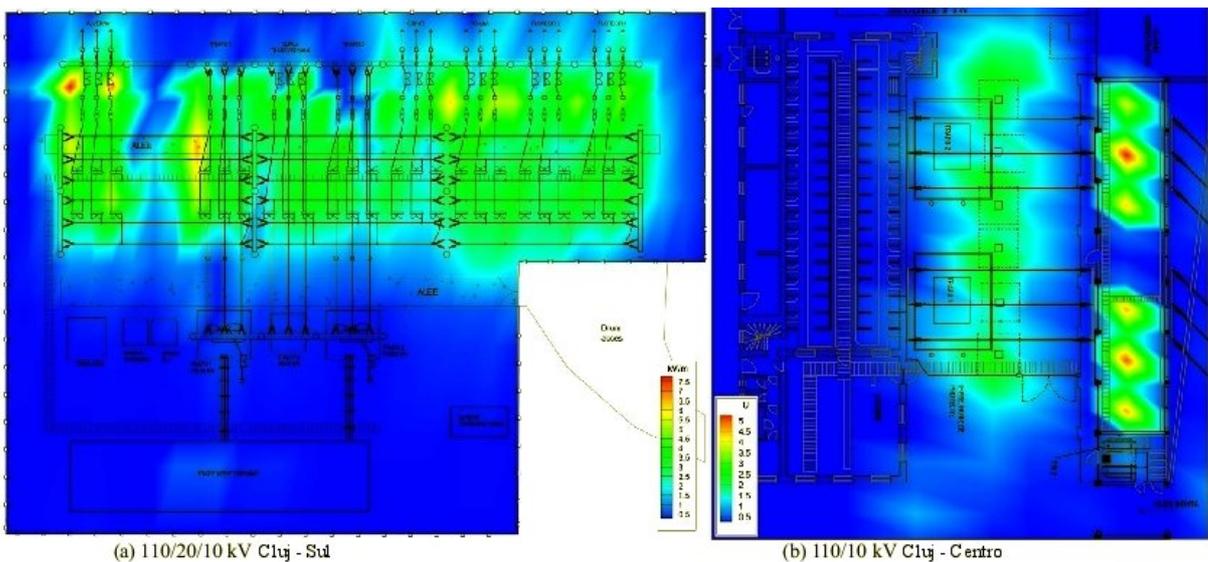


Figura 8: Distribuição do campo elétrico em kV/m nas subestações de Cluj-Sul (a) e Cluj-Centro (b).

Nas subestações de Cluj o valor máximo encontrado para o campo elétrico foi de 7,5 kV/m na subestação de Cluj-Sul e 5 kV/m para Cluj-Centro, portanto ambos dentro dos limites especificados na Diretiva.

Novamente obteve-se valores mais elevados de campo elétrico próximo aos disjuntores e seccionadoras onde os condutores de alta tensão estão próximos ao solo.

Os valores medidos para o campo magnético estão apresentados na Figura 9.

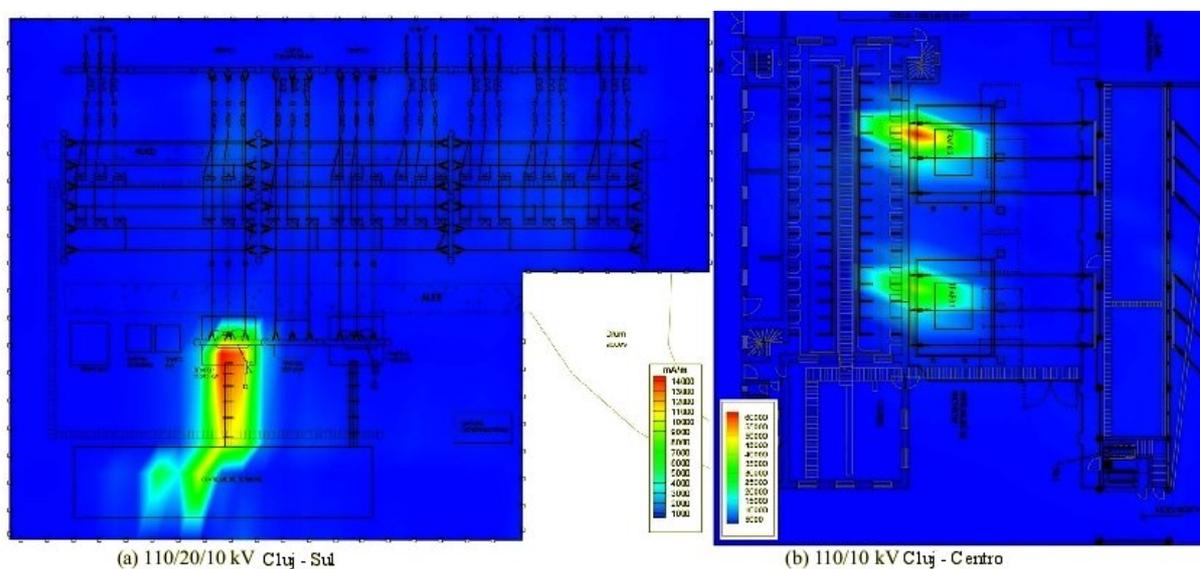


Figura 9: Distribuição do campo magnético em mA/m nas subestações de Cluj-Sul (a) e Cluj-Centro (b).

O valor máximo medido na subestação de Cluj-Sul foi de 14 A/m, enquanto na subestação de Cluj-Centro 60 A/m, nenhum superando o valor limite apresentado na legislação para o campo magnético.

Apesar dos valores ficarem distantes dos permitidos pela Diretiva Europeia, nota-se que com o rebaixamento da tensão, e consequente transmissão com correntes mais altas, o valor do campo magnético superou o da subestação de Rosiori de 400 kV.

5.3 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DA ELETROPAULO

A Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética (ABRICEM) juntamente com a ELETROPAULO realizaram medições em instalações elétricas pertencentes a companhia de energia elétrica de São Paulo.

Essas medições fizeram parte de um programa [16] para avaliar a conformidade dos índices encontrados com os limites estabelecidos na Norma Brasileira a ser implantada, assim como analisar a influência dos campos elétricos e magnéticos nos seres humanos.

Os resultados encontrados nesse estudo podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados das medições nas instalações da Eletropaulo S.A.

Instalação	Número de medições para campo elétrico	Número de medições para campo magnético	Campo Elétrico (kV/m)		Indução Magnética (μ T)	
			Médio	Máximo	Médio	Máximo
Linha de Subtransmissão 88kV (dentro da faixa de segurança)	52	104	0,947	2,033	10,02	22,31
Linha de Subtransmissão 88kV (limite da faixa de segurança)	17	38	0,362	0,739	6,13	13,01
SE 88/13,8kV (limite da subestação)	18	46	0,343	0,687	7,81	15,92
Circuitos de distribuição de 13,8kV (limite das distâncias de segurança)	5	18	0,025	0,053	1,87	4,13

Foram escolhidas como regiões de medição as seguintes áreas:

- O interior de subestações transformadoras em pontos tais como: entrada/saída de transformadores, chaves seccionadoras, cabines de comando, disjuntores, banco de capacitores, sob as linhas de entrada/saída, e em pontos periféricos das subestações.
- O interior e periferia de faixas de linhas de subtransmissão e proximidades de circuitos de distribuição.

Nota-se que todos as medições tiveram valores inferiores aos permitidos nas normas internacionais, e pela legislação nacional através da NBR-5422.

6 CONCLUSÃO

As interações do corpo humano com as radiações eletromagnéticas vem recebendo mais atenção desde o relato de marinheiros, que durante a 2ª Guerra Mundial se aqueceram nos feixes das antenas de radar e após relataram vários problemas de saúde.

Estudos mostraram que a absorção de energia pelo corpo humano em campos eletromagnéticos podem ser nocivos principalmente em frequências acima de 100 kHz, mas para frequências inferiores a este valor, os estudos ainda são inconclusivos ou estão em processo de realização.

Nesse trabalho foram analisadas duas importantes norma internacionais e pode-se constatar que elas oferecem valores aproximadamente iguais para os limites de exposição a campos com frequência de 50-60 Hz. A norma brasileira NBR 5422 também traz valores limites para a exposição a campos de baixa frequência (EMF), mas falha ao não citar nenhuma medida corretiva aos campos que excedem tais índices.

A norma nacional também não prevê nenhum tipo de medida de precaução como ocorre com a Diretiva da União Europeia que traz índices abaixo dos máximos permitidos. Quando os limites são atingidos, na Europa, o responsável pelo local onde os campos ocorrem é obrigado a tomar medidas imediatas para a redução desses níveis.

A falta de cobrança, por parte da NBR, de medidas de aviso, como placas indicativas de zona com alto nível de exposição eletromagnética, a trabalhadores que estarão em locais onde o valor dos campos são superiores ao permitido também é considerada uma falta grave pelo autor desse trabalho.

Foram vistos também os resultados de medições realizadas em subestações de energia elétrica que mostraram que em algumas partes dessas instalações os valores limites impostos pelas legislações nacionais podem ser superados.

Por esses motivos é recomendado que sejam feitas medições nesse tipo de instalações, principalmente onde a tensão desce mais próxima ao solo (seccionadoras, disjuntores) no lado de alta tensão e próximo ao transformador do lado de baixa tensão. Esses locais foram os que se mostraram mais críticos, para o campo elétrico e magnético respectivamente, nos casos analisados.

Campos magnéticos de frequência extremamente baixa foram classificados como possivelmente carcinogênicos. Essa classificação foi baseada em análises comparativas e demonstrou um aumento consistente de duas vezes para o risco de leucemia infantil.

Outros estudos que buscavam evidências epidemiológicas da exposição aos campos eletromagnéticos sofreram de problemas metodológicos, como a pequena amostra e baixos intervalos de confiança nos dados estatísticos divulgados.

É importante que o Brasil faça parte das pesquisas sobre os efeitos desses campos, através de uma análise metodológica cuidadosa de longo prazo sobre a exposição a campos eletromagnéticos. Para isso seria necessário avaliar as pesquisas já feitas nacionalmente e internacionalmente para que não se cometessem os mesmos erros que acabaram por invalidar os resultados obtidos por estas.

Estudos como o realizado em [17] mostram o aumento dos índices esperados para doenças como neoplasias da vesícula biliar, câncer de rim e câncer de bexiga, sendo que o câncer de bexiga aparece em outro relatório nacional [18]. Para que essas dúvidas sejam sanadas deve-se realizar nova pesquisa, com amostras mais qualificadas e que possam gerar resultados com validade científica.

Sugere-se que esta pesquisa seja realizada nacionalmente em parceria com as concessionárias de geração e distribuição de energia elétrica, usando dosímetros para que se

consiga estimar tempo e nível de exposição de eletrecitários aos campos. Deve-se controlar outras variáveis que podem contaminar a amostra como o tabagismo e alcoolismo.

Uma pesquisa com uma amostra significativa e dados sobre possíveis efeitos nocivos ao organismo durará décadas, e portanto é urgente que o Brasil se organize para realizá-la obtendo dados científicos qualificados para elaboração de uma nova legislação que possa proteger trabalhadores e população de efeitos nocivos provocados, principalmente, pela exposição a campos magnéticos.

7 REFERÊNCIAS

- [1] Z. Stih, S. Barberovic, I. Kapetanovic, “Numerical Analysis of Low-Frequency Electromagnetic Field Exposure”, IEEE, pp. 1199-1202, 2003.
- [2] H.P. Schwan, Electrical properties of tissue and cell suspensions in: *Advances in Biological and Medical Physics*. Vol. 5, Editors: J.H.Lawrence and C.A.Tobias. Academic Press, New York, pp. 147-209, 1957.
- [3] K.R. Foster and H. P. Schwan, Dielectric properties of tissues and biological materials: A critical review, *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering* 17:1, pp.25-104, 1989.
- [4] H.P. Schwan and S. Takashima, Electrical conduction and dielectric behavior in biological systems, in: *Encyclopedia of Applied Physics, Vol. Biophysics and Medical Physics*, Editor: G.L. Trigg, VCH publishers, New York and Weinheim, 1993.
- [5] A. Barchanski, H. D. Gersem, E. Gjonaj, and T. Weiland, “Impact of the displacement current on low-frequency electromagnetic fields computed using high-resolution anatomy models,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 50, no. 19, pp. N243–N249, Oct 2005.
- [6] International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494–522, Apr 1998.
- [7] J. P. Reilly, “Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology”, New York: Springer-Verlag, 1998.
- [8] P. M. Glover and R. Bowtell, “Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 53, no. 2, pp. 361–373, 2008.
- [9] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fosfeno>. Acessado em 04/08/2009.

[10] R. L. Carpenter, "Ocular effects of microwave radiation," *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, vol. 55, no. 11, pp. 1048–1057, Dec 1979.

[11] C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I, II e III. Literature survey," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, pp. 2231–2293, 1996.

[12] http://www.biociencia.org/index.php?option=com_content&task=view&id=85&Itemid=72. Acessado em 25/10/2009.

[13] Polk, C.; Postow, E., *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*. New York: CRC Press, Inc.

[14] Bastos, J. P. A., 2004. *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática*. Florianópolis: Ed. da Ufsc., 1996.

[15] Transelectrica SA, Annual Report 2006, in press.

[16] <http://www.abricem.com.br/gte/sumario.htm>. Acessado em 22/11/2009.

[17] Mattos, I. E.; Sauaia, N.; Menezes, P. R., *Padrão de mortalidade por câncer em trabalhadores eletrecitários, Brasil, 2002*.

[18] Mattos, I. E.; Koifman, S., *Mortalidade por câncer em trabalhadores de companhia geradora de eletricidade do Estado de São Paulo, Brasil*. *Revista de Saúde Pública*, 30:564-575, 1996.