

EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO NÃO-IONIZANTE

Joabson Nogueira de Carvalho

Alfrêdo Gomes Neto

Escola Técnica Federal da Paraíba - ETFPB

Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado - GTEMA

Av. 1º de Maio, 720, João Pessoa, PB, CEP: 58.015-430

E-Mail: joabson@jpa.etfpb.br , alfredo@jpa.etfpb.br

Resumo

Este trabalho apresenta de forma resumida os fundamentos da interação do campo eletromagnético com tecidos biológicos, discutindo os aspectos relacionados com os padrões de segurança adotados, no que tange aos níveis máximos de exposição à energia eletromagnética.

1 - Introdução

Ao longo dos anos, o espectro eletromagnético de frequências foi gerenciado de forma a estabelecer frequências e níveis de potência buscando atender as diversas aplicações das ondas eletromagnéticas. Tais parâmetros buscam evitar principalmente a interferência das estações de radiodifusão entre si ou com outras aplicações, como secagens industriais [1] ou aplicações médicas [2].

O congestionamento do espectro, as elevadas densidades de potência utilizadas em algumas aplicações, bem como as novas tecnologias que utilizam ondas eletromagnéticas, levaram alguns pesquisadores [3], [4] a investir cada vez mais no estudo da interação das ondas eletromagnéticas com os tecidos biológicos.

Devido principalmente à complexidade do tema, dado o grande número de variáveis envolvidas, não existe ainda um estudo completo sobre esta interação, necessitando uma maior investigação para se estabelecer normas de segurança mais precisas para exposição da população às ondas eletromagnéticas.

2 - Ondas eletromagnéticas

O comportamento dos campos eletromagnéticos, num meio qualquer, são regidos pelas equações de Maxwell. Uma onda plana é caracterizada por possuir uma superfície equipotencial plana. Em qualquer instante de tempo fixo, apresenta os vetores \mathbf{E} e \mathbf{H} uniformes sobre superfícies planas. Supondo que o campo elétrico só possui componente na direção x , temos

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_x}{\partial z^2} - \gamma^2 \mathbf{E}_x = 0 \quad (1)$$

que é conhecida como *equação de onda*. que tem como solução genérica :

$$\mathbf{E}_x(z) = \mathbf{E}^+ e^{-\gamma z} + \mathbf{E}^- e^{+\gamma z} \quad (2)$$

Pode-se definir a constante de propagação complexa para o meio considerando como [1]:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon'}} \quad (3)$$

sendo α a constante de atenuação e β a constante de fase. A constante de atenuação (α) e a constante de fase (β) são dadas, respectivamente, por [1]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_g} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r'^2}} - 1 \right)} \text{ Np/m} \quad (4)$$

e

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r'^2}} + 1 \right)} \text{ rd/m} \quad (5)$$

sendo λ_g o comprimento de onda no material, que é dado por:

$$\lambda_g = \lambda_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r'^2}} + 1 \right)} \quad (6)$$

A equação (2) representa uma onda se propagando na direção z, com velocidade de fase $v_p = \omega / \beta$ e com fator de decaimento exponencial dada pela constante de atenuação α . Observa-se portanto a grande dependência de E_x com os valores de ϵ e σ do meio irradiado.

3 - Propriedades dielétricas dos tecidos

Devido à natureza não homogênea dos tecidos biológicos (pele, gordura, músculo, tumores, etc.), existe uma grande dispersão das propriedades térmicas e elétricas, que conduz a uma distribuição complexa de temperatura no tecido irradiado com campos eletromagnéticos [1].

A interação dos campos eletromagnéticos com tecidos biológicos está relacionada com suas propriedades eletromagnéticas (permissividade elétrica, condutividade, permeabilidade magnética, etc.).

A permissividade complexa (ϵ^*) descreve o comportamento do material na presença de um campo elétrico alternado, e é expressa como :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad ; \quad (7)$$

A parte real, chamada constante dielétrica, representa a capacidade do material de armazenar energia elétrica, enquanto a parte imaginária, conhecida como fator de perdas, descreve a perda de energia do campo elétrico no material (polarização dielétrica). A permissividade dos materiais é geralmente expressa em relação ao valor da permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

$$\epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (8)$$

Outro parâmetro importante usado para caracterizar os materiais é o fator de dissipação, conhecido como tangente de perdas (δ), definida como sendo a razão entre o fator de perdas e a constante dielétrica.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (9)$$

O fator de perdas relativo, ϵ_r'' , é função da condutividade do material e da frequência do campo, isto é:

$$\epsilon_r'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (10)$$

A permissividade de materiais dielétricos, em particular de tecidos biológicos, depende ainda de outros fatores, tais como temperatura, composição (teor de umidade, sais, etc.), densidade, estado físico, etc. A Tabela 1 mostra a variação da constante dielétrica, condutividade e tangente de perdas para tecidos biológicos com maior ou menor teor de água, para diversas frequências [1].

Uma medida utilizada de modo a padronizar a quantidade de energia absorvida pelo tecido é o SAR (taxa de absorção específica), definida como [4]:

$$\begin{aligned} \text{SAR} &= \frac{P}{\rho_m} = \frac{\sigma |E|^2}{\rho_m} \\ &= \frac{2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2}{\rho_m} \quad \text{W/Kg} \end{aligned} \quad (11)$$

Onde ϵ representa a permissividade elétrica do meio, f a frequência de oscilação do campo e ρ_m a densidade do material.

A taxa de absorção específica pode ser entendida como a capacidade de cada tecido absorver energia eletromagnética. Observa-se da equação (11) que esta capacidade está relacionada com os aspectos físicos do tecido e, também, com a amplitude e frequência do campo.

f(MHz)	13,56	100	433	2450
Tecido com alto valor de água				
ϵ'	160	72	53	47
σ (S/m)	0,63	0,89	1,18	2,17
$\tan\delta$	5,2	2,2	0,9	0,3
Tecido com baixo teor de água				
ϵ'		7,5	5,6	5,5
σ (S/m)		19-76	38-118	96-213
$\tan\delta$		0,5-1,8	0,3-0,9	0,1-0,3

Tabela 1 - Constante dielétrica, condutividade e tangente de perdas para tecidos com altos e baixos teores de água para vários valores de frequência.

4 - Mecanismos de conversão da energia eletromagnética em calor.

No processo de aquecimento por campos eletromagnéticos, a energia transportada pelos campos se transforma em energia mecânica, que atua sobre as cargas livres e moléculas do tecido, produzindo energia térmica. Os principais mecanismos de conversão de energia eletromagnética em calor são a condução iônica e a rotação dipolar.

4.1 - Condução iônica

Na condução iônica há um deslocamento dos íons de um material na presença de um campo elétrico. A energia cinética que os íons adquirem é fornecida pelo campo externo aplicado. A colisão desses íons com outras moléculas do material (ionizadas ou não) transfere parte de sua energia cinética para o deslocamento destas últimas. A parcela restante da energia cinética é transformada em calor.

O mecanismo de perdas pela condução iônica é mais acentuado nas baixas frequências. Em frequências elevadas sua ação desprezível em relação à rotação dipolar.

4.2 - Rotação dipolar

O principal mecanismo de conversão de calor da energia eletromagnética em tecidos biológicos é a rotação dipolar. As moléculas de água (e de várias proteínas) possuem um momento dipolar, resultante de uma repartição não homogênea de suas cargas elétricas, assemelhando-se a dipolos elétricos [1]. Esses dipolos, embora originalmente dispostos de forma aleatória, tendem a se alinhar com o campo aplicado. Submetidos a um campo alternado de alta frequência, os dipolos passarão a adquirir uma oscilação, de acordo com a frequência do campo aplicado, como indicado na Figura 1.

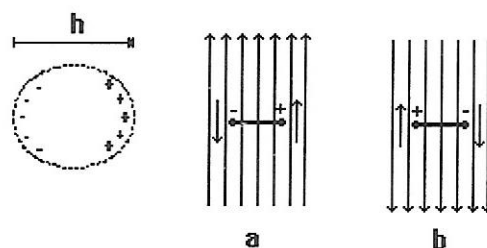


Figura 1 - Processo de rotação do dipolo sob a influência de um campo elétrico alternado.

A variação da constante dielétrica com a frequência é mostrada na Figura 2. Pode-se observar três “janelas” de frequência onde existem picos da constante dielétrica, indicados respectivamente por a, b e c, nas regiões de baixas, médias e altas frequências. Estes picos são causados por mecanismos de relaxação diferentes. [4]

Na região “a”, as perdas estão relacionadas com estruturas intracelulares. Em frequências médias (região “b”) as perdas são devidos a carregamentos de membranas celulares pelos eletrólitos, enquanto na região “c” predominam as perdas devido à rotação dipolar causadas pela água e eletrólitos.

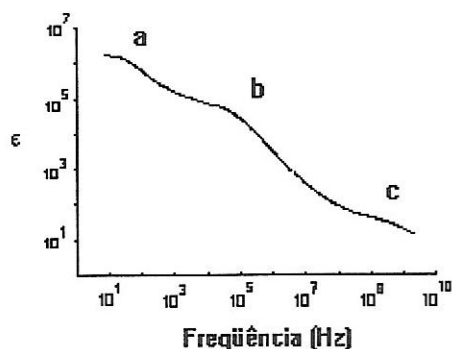


Figura 2 - Dependência da constante dielétrica de um músculo com a frequência.

5 - Penetração da onda eletromagnética no tecido biológico

Uma onda eletromagnética que se propaga no meio se atenua ao penetrar no dielétrico com taxa de decaimento exponencial.

A profundidade de penetração no tecido (profundidade de película ou δ) é definida como sendo a distância percorrida pela onda para a qual a intensidade do campo elétrico cai de 36,8% do seu valor na superfície. Assim [1]:

$$\delta = \frac{67,52}{f} \left[\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon' \right]^{-1/2} \text{ m} \quad (12)$$

Observa-se da equação (12) o aumento da profundidade de penetração com a diminuição da frequência de oscilação do campo.

7 - Polarização

A polarização da onda eletromagnética é por definição a orientação do vetor campo elétrico da onda eletromagnética em relação ao plano de terra. A polarização dos campos incidentes tem grande efeito na intensidade dos campos internos correspondentes.

Medidas em modelos experimentais [4] evidenciam que a máxima absorção da energia ocorre para polarização E, ou seja,

quando o vetor campo elétrico tem o mesmo sentido de orientação da máxima dimensão do corpo.

Existe uma frequência de ressonância na qual a absorção é máxima, sendo esta frequência depende do tamanho do corpo irradiado frente ao comprimento de onda, e corresponde a aproximadamente $0,4 \lambda$.

7 - Efeitos observados do campo eletromagnético nos tecidos.

7.1 - Efeitos térmicos

A energia eletromagnética é convertida em calor no tecido, seja em consequência da condução iônica, ou mesmo rotação dipolar das moléculas de água ou de proteínas, que constituem grande parte dos tecidos do corpo humano.

A distribuição do campo no tecido é uma função intrínseca da frequência, configuração da fonte primária, polarização do campo, geometria dos tecidos e das suas propriedades eletromagnéticas. A distribuição inicial de calor é posteriormente modificada pelas propriedades térmicas (calor específico, condutividade térmica, etc.) do tecido e pelos mecanismos neurocirculatórios, que tem a função da termoregulação do corpo. Quando a capacidade termoreguladora do sistema orgânico, ou de parte dele, é excedida, podem causar danos ao metabolismo do tecido ou até a morte do mesmo. Isto ocorre, evidentemente quando a densidade de potência absorvida é maior do que a densidade de potência metabólica de saída do corpo, que é de cerca de 5 mW/cm^2 . [3]

A absorção da energia eletromagnética é alta para tecidos com alto teor de água, como músculo, tecido cerebral, órgãos internos e pele, sendo menor para tecidos com baixos teores de água, como gordura e osso.

O corpo humano dissipa cerca de 75 - 100 Kcal/h, o que equivale a 87,2 - 116,2 W. Se essa quantidade de calor pudesse ser inteiramente confinada, ela seria suficiente

para elevar a temperatura de um homem de 70 Kg de 5°C em 4h.

7.2 - Efeitos não térmicos.

São efeitos não relacionados com a elevação de temperatura. O mais importante é o chamado efeito “cadeia de pérolas”. Este efeito é observado quando partículas em suspensão, como carvão, amido, leucócitos, são submetidos a um campo de RF de 1 a 100 MHz, contínuo ou pulsado. As partículas formam cadeias, numa direção paralela às linhas de força do campo elétrico, devido à polarização induzida pelo campo elétrico. Um outro efeito não térmico é a saturação dielétrica, que consiste na polarização de cadeias parciais de macromoléculas biológicas, levando a uma possível quebra de ligações de hidrogênio e a alterações da zona de hidratação, podendo causar desnaturação ou coagulação de moléculas [3].

8 - Padrões de segurança

Os níveis de radiação de campos eletromagnéticos devem ser controlados a fim de evitar riscos à saúde, devido à exposição a rádio-frequência.

O estabelecimento de padrões de segurança leva em conta três linhas básicas [5]:

- Efeitos biológicos da onda eletromagnética.
- Limite máximo de exposição para trabalhadores e população.
- Proteção da população contra os efeitos adversos dos campos eletromagnéticos.

Os efeitos térmicos, por serem mais danosos, são usados como base no estabelecimento de padrões.

A potência absorvida está diretamente relacionada com a frequência de oscilação do campo, a configuração da fonte primária, a geometria do tecido e de suas propriedades eletromagnéticas. A

distribuição inicial do calor é posteriormente modificada pelas propriedades térmicas (calor específico, condutividade térmica, etc.).

A orientação dos campos incidentes determinam a sua intensidade no interior do corpo. As condições de contorno eletromagnéticas dependem do sentido do vetor campo elétrico com respeito à interface dos tecidos [1]. Se o campo E é paralelo à interface que separa dois tecidos com alto e baixo teor de água, respectivamente, (como músculo e gordura, por exemplo) menos potência é absorvida no tecido com menor teor de água (no caso, a gordura). Por outro lado, se o campo elétrico incidir normal a essa interface, uma grande parte da potência é absorvida pelo tecido que contém baixas quantidades de água, podendo causar um aquecimento excessivo do mesmo (aquecimento dos tecidos superficiais).

O estabelecimento de padrões a serem utilizados no Brasil ainda deve ser objeto de discussão, já que não existe uma legislação própria para regulamentar o uso de sistemas de RF que operam no espectro da radiação não ionizante. Os padrões de segurança dependem, entre outros fatores, do tipo de sinal aplicado (CW ou pulsado), da polarização, da faixa de frequência, tempo de exposição e da densidade de potência.

O padrão C95.1 - 1992 [5] mostrado na Figura 3, licenciado pelo IEEE, estabelece os níveis máximos da taxa de absorção específica SAR e a densidade de potência absorvida W_a em dois domínios: ambientes controlados e ambientes não controlados. Para ambientes controlados, o nível seguro de exposição de W_a é de 5 mW/cm², para um tempo de exposição de 6 minutos em sinais pulsados ou CW, o que equivale a uma SAR médio de 0,4 W/Kg. Em ambientes não controlados, o padrão estabelece um limite de 0,08 W/Kg para a SAR no corpo inteiro, e 1,6 W/Kg de pico liberada em um grama de tecido, por 30 minutos ou mais. O valor máximo para a densidade de potência é de 0,57 mW/cm² para exposição de corpo inteiro.

9 - Conclusão

Neste trabalho foram apresentados os aspectos envolvidos na interação dos campos eletromagnéticos com os tecidos biológicos.

As propriedades dielétricas dos tecidos, que determinam as características de distribuição dos campos internos, variam com vários parâmetros, como frequência, densidade, temperatura, polarização do campo, etc.

Os estudos para determinação das características de absorção devem ser conduzidos em modelos experimentais. O impacto dos resultados deve ser utilizado no estabelecimento de padrões de segurança.

Os riscos à saúde, devido à exposição aos campos eletromagnéticos, estão ligados diretamente à distribuição da SAR (taxa de absorção específica).

10 - Referências Bibliográficas

- [1] JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO. *Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema de Hipertermia por Microondas*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Paraíba, Brasil, maio 1996.
- [2] METAXAS, A. C. e MEREDITH, R. J.. *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd., Inglaterra, 1983.
- [3] JOHNSON, C. C., and GUY, A. W. *Nonionizing electromagnetic Wave Effects in Biological Materials and Systems*, Proc. IEEE, Vol. 60, Estados Unidos, Junho 1972.
- [4] OSEPCHUK, J. M. *Biological Effects of Electromagnetic Radiation*, IEEE Press, Estados Unidos, 1983.
- [5] FISCHETTI, M., *The Cellular Phone Scare*, IEEE Spectrum, vol. 30, Junho, 1993.

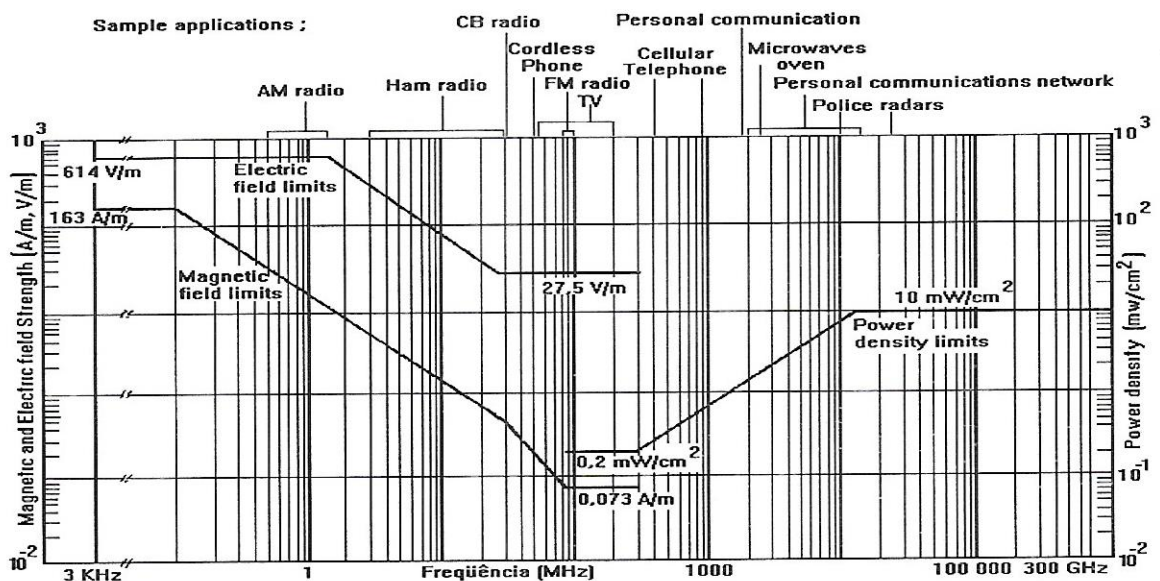


Figura 3 - Padrão 95.1 do IEEE