

EFEITOS BIOLÓGICOS DOS TELEFONES CELULARES PORTÁTEIS

Álvaro Augusto A. de Salles

Depto. Eng. Elétrica, UFRGS
Rua Sarmiento Leite s/n, P.Alegre,RS, 90035-190
e-mail:"aasalles@vortex.ufrgs.br"

Sumário: Neste trabalho são descritos sumariamente os principais efeitos biológicos dos telefones celulares portáteis com modulação analógica e utilizando antena tipo monopolo convencional, são mencionados alguns resultados de simulações numéricas e são apresentados alguns comentários, conclusões e sugestões sobre as precauções que os usuários dos telefones celulares devem adotar visando reduzir os riscos à saúde, enquanto outras providências mais efetivas não sejam implementadas.

Abstract: The relevant handheld cellular phone bioeffects employing monopole antennas are described. Some numerical simulation results, comments and suggestions to reduce human risks, while more effective solutions are not available, are also considered.

1. INTRODUÇÃO

A produção, a comercialização e a operação dos serviços de comunicações móveis tornaram-se hoje uns dos segmentos mais rentáveis da humanidade. As previsões mais otimistas sobre número de usuários tiveram que ser continuamente corrigidas para valores significativamente mais elevados e os preços dos equipamentos para os consumidores continuam caindo bem mais rápido que o esperado. Isto resultou numa crescente popularidade de uma tecnologia cuja segurança para o usuário tem sido posta em questão, especialmente tendo em vista os relativamente elevados campos eletromagnéticos emitidos pelos aparelhos portáteis com antenas tipo monopolo convencional extremamente próximas à cabeça dos usuários [1-4]. Para se ter uma idéia da abrangência desta questão, a previsão oficial é que até o final de 1996, mais de 4 milhões de terminais estarão em operação no Brasil, e no mundo deverão ser mais que 70 milhões.

Algumas publicações[5-11] têm mostrado que os telefones celulares portáteis, na pior situação (p.ex., para operação com a antena tipo monopolo irradiando muito próximo da cabeça do usuário), não respeitam normas estabelecidas nos USA e na Europa [12-13]. Por outro lado, estas normas estão sendo continuamente revistas, sempre para limites mais baixos, e o próprio FCC (*Federal Communication Commission*) dos USA em 1996 divulgou uma atualização da sua recomendação de 1993, com

limites de exposição mais restritivos que os anteriores [14], o que também é uma tendência para as normas européias.

Uma das razões das contínuas alterações nas normas é a significativa e perigosa defasagem entre a rapidez do desenvolvimento e da popularização dos celulares e a natural exigência de tempo para maturação confiável das pesquisas (especialmente nas áreas das ciências médicas) e para a divulgação de seus resultados. Neste sentido, **a telefonia celular é um caso típico onde a tecnologia cresceu muito rapidamente e as conseqüências biológicas para os usuários só estão sendo melhor conhecidas ao mesmo tempo, e muitas vezes após a sua enorme e arriscada utilização.**

Por exemplo, para estudar os possíveis efeitos sobre a saúde dos campos eletromagnéticos produzidos pelos telefones celulares e outros aparelhos (como os fornos de microondas), a OMS (Organização Mundial da Saúde) lançou em junho de 1996 um programa de cinco anos orçado em US\$ 3,3 milhões. Também algumas empresas fabricantes, através da CTIA (*"The Cellular Telecommunication Industry Association"*) dos USA, estão suportando em US\$ 25 milhões pesquisas sobre os efeitos biológicos da telefonia celular. Não se tem conhecimento de quando os resultados destas pesquisas serão disponíveis.

Então, uma vez que os usuários dos telefones celulares portáteis estão sendo expostos a campos eletromagnéticos em intensidade e por períodos de tempo nunca antes experimentado por nenhum setor significativo da população, e uma vez que a avaliação dos efeitos biológicos a médio e longo prazo desta exposição requer vários anos de estudos epidemiológicos, é indispensável que precauções adequadas sejam adotadas enquanto não houver maior conhecimento da extensão exata dos riscos à saúde dos usuários. Isto é uma das motivações essenciais deste trabalho.

Neste artigo são discutidos os principais efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos induzidos nas pessoas pelos telefones celulares portáteis utilizando antena tipo monopolo convencional, são revistos alguns resultados de simulações numéricas usando o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), são apresentados

comentários, conclusões e sugestões visando reduzir o risco à saúde dos usuários. Os sistemas mais largamente difundidos de telefonia celular no Brasil utilizam o padrão desenvolvido pelo Bell Labs, denominado **AMPS** (*Advanced Mobile Phone Systems*), e os transmissores dos aparelhos portáteis emitem no máximo 600 miliwatts numa faixa de frequências da ordem de 825 a 850 Mhz. As antenas são tipicamente monopolos de meia onda, um quarto de onda ou mesmo menores. Estes telefones celulares portáteis usualmente dispõem de um microprocessador que ajusta o nível de potência emitida, dependendo da atenuação até a antena com a qual está se comunicando.

2. PRINCIPAIS EFEITOS BIOLÓGICOS

Independentemente da possibilidade de interferir em dispositivos médicos (p.ex. em marcapassos, equipamentos de salas cirúrgicas e de tratamento intensivo), os principais efeitos biológicos das ondas eletromagnéticas podem genericamente ser divididos em dois tipos: (a) "Efeitos Térmicos" e (b) "Efeitos Não Térmicos", que serão considerados a seguir.

(a) "Efeitos Térmicos"

Os efeitos térmicos são aqueles causados por um aquecimento direto dos tecidos biológicos como resultado da absorção da energia eletromagnética num meio dissipativo, por exemplo nos meios dielétricos dissipativos onde a permissividade (ou constante dielétrica) apresenta uma parte imaginária maior que zero. A parte imaginária (ϵ_r'') da permissividade relativa de um dielétrico dissipativo pode ser relacionada à uma condutividade equivalente :

$$\sigma = 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' \quad (\text{S/m}) \quad (1)$$

onde f é a frequência e ϵ_0 é a permissividade do vácuo. Tanto os valores das partes real (ϵ_r') e imaginária (ϵ_r'') da permissividade relativa ($\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r''$), bem como da condutividade equivalente σ variam substancialmente com a frequência e com o tipo de tecido [15]. Ao contrário das radiações não ionizantes em comprimentos de onda menores (p.ex., no infravermelho), as radiações em microondas e em RF não são somente absorvidas pela pele, mas dependendo da frequência, em camadas mais profundas de tecidos também. Uma vez que os sensores de temperatura do corpo humano estão localizados somente na pele, efeitos prejudiciais aos tecidos podem ocorrer devido a aquecimentos excessivos em regiões mais profundas, sem serem percebidos pelas pessoas .

Então, genericamente, todos os efeitos que podem ser devidos a um aumento de temperatura nos tecidos são chamados efeitos térmicos. Estes efeitos térmicos têm sido estudados há muitas décadas [16-17], e os resultados da absorção dos campos eletromagnéticos por diferentes tipos de tecidos são relativamente bem conhecidos,

existindo mesmo normas internacionalmente aceitas que estabelecem limites de exposição em função da frequência de operação, do tempo de exposição, do tipo de usuário, etc...[12,13]. Os limites de exposição podem ser expressos em densidade de potência incidente (p.ex., em mW/cm^2). Por outro lado, um parâmetro dosimétrico largamente utilizado é a "Taxa de Absorção Específica" (ou SAR - "*Specific Absorption Rate*", em inglês), que é definida como "a derivada no tempo do aumento de energia " dW " absorvida ou dissipada num elemento de massa " dm " contida num elemento de volume " dV " cuja massa específica é " ρ " " [18-20], e que analiticamente pode ser expressa por,

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{\rho(dV)} \quad (\text{mW/g}) \quad (2)$$

Daí, é possível, em outras palavras, dizer-se que a SAR quantifica a potência absorvida por unidade de massa. Utilizando o teorema do vetor de Poynting para campos eletromagnéticos com excitação senoidal no domínio da frequência, a SAR pode ser também expressa por,

$$\text{SAR} = \frac{\sigma}{2\rho} |E_i|^2 = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r''}{2\rho} |E_i|^2 = \frac{|J_i|^2}{2\rho \sigma} \quad (\text{mW/g}) \quad (3)$$

onde E_i e J_i são os valores de pico do campo elétrico e da densidade de corrente no local considerado. Observa-se que a SAR é diretamente proporcional ao aumento local de temperatura, responsável pelos efeitos térmicos,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\text{SAR}}{C_p} \quad (^\circ\text{C/s}) \quad (4)$$

onde T é a temperatura e C_p é o calor específico do tecido ($\text{J/kg.}^\circ\text{C}$). Para exposição do corpo inteiro por exemplo, pode-se considerar a SAR média, que será então a relação entre a potência total absorvida pelo corpo e sua massa. Entretanto, para aquecimentos localizados, como os produzidos pelos telefones celulares emitindo muito próximos (p.ex., a 2 cm, 1 cm ou menos) da cabeça do usuário, deve ser usada a SAR local, que é definida como a potência absorvida (em mW , p. ex.) por uma grama de tecido.

Uma norma largamente utilizada foi elaborada pelo IEEE dos USA, denominada IEEE C-95.1-1991, que em 1992 foi adotada pelo ANSI- *American National Standards Institute*, e que em 1993 foi recomendada pelo FCC dos USA [12,14]. Esta norma foi resultado de oito anos de estudos realizados por 125 engenheiros, médicos, bioquímicos, biofísicos, biólogos, etc, e estabelece limites para dois tipos de ambientes: (a) os "controlados" nos quais o indivíduo tem conhecimento dos níveis de exposição (p.ex., técnicos de laboratórios usando equipamentos especiais) e (b) os ambientes "não controlados", nos quais as pessoas não têm conhecimento dos níveis de exposição (usualmente envolvendo o público em geral; é este o caso de aparelhos como os

telefones celulares portáteis e os fornos de microondas domésticos).

Na norma ANSI/IEEE C-95.1, o limite para ambientes não controlados foi estabelecido em cinco vezes menor que o limite em ambientes controlados. Em termos de densidade de potência incidente (p.ex., em mW/cm^2) para o corpo inteiro, os limites de exposição para ambientes não controlados estabelecidos por aquela norma em função da frequência de operação, estão representados na Fig. 1 . Observa-se que para uma frequência de 840 Mhz, tipicamente utilizada em telefonia analógica convencional em nosso país (sistema AMPS), o limite corresponde a $0,57 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

Em taxa de absorção específica (SAR), a norma ANSI/IEEE C-95.1 para o público em geral limita em $0,08 \text{ mW}/\text{g}$ para a SAR média no corpo inteiro da pessoa, e em $1,6 \text{ mW}/\text{g}$ para o valor máximo da SAR entregue a qualquer 1 grama de tecido, num período de 30 minutos ou mais [12]. Já a norma européia CENELEC CLC/TC211-B estabelece para o público em geral o limite de $2 \text{ mW}/\text{g}$ para o valor máximo da SAR, avaliado num volume equivalente a 10 gramas de tecido num período de 6 minutos [13].

Anteriormente, o FCC não exigia dos fabricantes resultados de testes para verificação de respeito às normas ANSI/IEEE C.95.1, de novos equipamentos que transmitissem menos que $0,74 \text{ W}$ (considerados "low power", ou seja, baixa potência), que é o caso dos aparelhos celulares portáteis com modulação analógica convencional (sistema AMPS) emitindo no máximo 600 mW [1] . Isto foi corrigido em agosto de 1996 , quando então o FCC determinou que também estes aparelhos não deveriam ser excluídos do respeito aquelas normas, uma vez que para a antena à uma distância menor que $2,5 \text{ cm}$,

os níveis de SAR absorvidos na cabeça do usuário excedem os limites estabelecidos por aquelas normas [14].

(b) "Efeitos Não-Térmicos"

Os efeitos "não-térmicos" são por exemplo efeitos bioquímicos ou eletrofísicos causados diretamente pelos campos eletromagnéticos induzidos, e não indiretamente por um aumento localizado ou distribuído de temperatura. Alguns efeitos "não-térmicos" reportados na literatura incluem efeitos nos sistemas nervoso, cardiovascular e imunológico, bem como no metabolismo e em fatores hereditários [1-3, 15, 17 e 21]. Entretanto, nestas áreas os resultados ainda são polêmicos, não existindo via de regra conclusões definitivas, o que poderá ainda demorar muitos anos. Alguns resultados são mesmo conflitantes, especialmente devido a técnicas experimentais não muito confiáveis. Por exemplo, (a) os métodos utilizados para caracterizar os sintomas em estudos epidemiológicos; (b) dosimetria em RF e microondas, especialmente em campo próximo; e (c) a presença de influências estranhas não consideradas na interpretação dos resultados.

Efeitos que foram claramente demonstrados incluem a alteração no fluxo de íons através das membranas das células (afetando particularmente as propriedades eletrofisiológicas das células nervosas), alteração na mobilidade dos íons de cálcio (particularmente nos tecidos do cérebro), alterações na síntese de DNA e na transcrição de RNA e efeitos na resposta de células normais a moléculas sinalizantes (incluindo hormônios, neurotransmissores e fatores de crescimento)[17] . Alterações no fluxo de cálcio em células, na barreira entre o sangue e o cérebro ("blood-brain barrier", que protege o cérebro de certas toxinas) e no desenvolvimento de tumores cerebrais foram também reportados [1] .

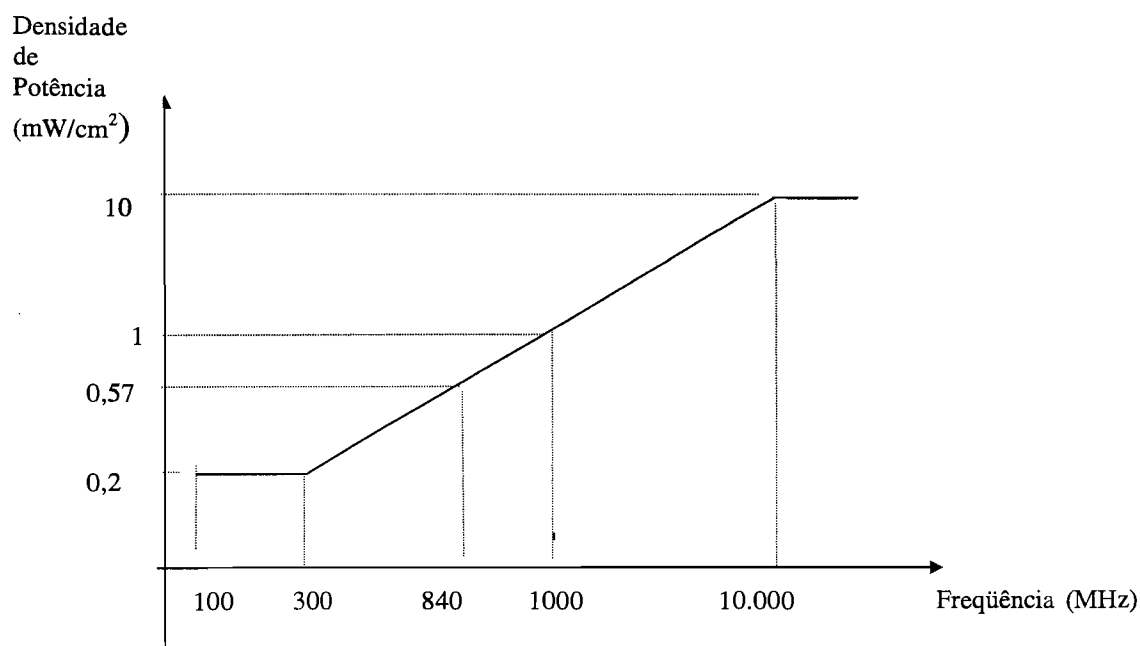


Fig. 1 - Norma IEEE "C 95.1-1991": Limites para Exposição por Seres Humanos a Radiações de Energia Eletromagnética

Entre outras, uma incerteza importante que está para ser confirmada é se estes efeitos não térmicos podem ou não ocorrer em taxas de absorção específicas bem abaixo daquelas observadas para os efeitos térmicos. Efeitos no sistema imunológico foram constatados em cobaias quando a SAR era maior que 0,4 mW/g, as células nervosas eram influenciadas quando os valores de SAR eram superiores a 2 mW/g e exposição a SAR entre 2 e 3 mW/g promoveu a ocorrência de câncer ou carcinomas em ratos [17]. Além disto, alterações no sistema endócrino e na química sanguínea foram relatados quando a SAR é maior que 1 mW/g e alterações nos sistemas hematológicos e imunológicos ocorrem quando a SAR é igual ou maior que 0,5 mW/g para exposições prolongadas [19]. Alguns autores resumem os dados experimentais em cobaias sugerindo que os efeitos aparecem em SAR médias entre 1 a 4 mW/g, e isto tem sido um critério adotado nas normas mais recentes [19].

Reverendo a literatura, observa-se que, à medida que as pesquisas avançam e novos resultados aparecem, as normas são atualizadas e novos limites mais restritivos são sugeridos [12-14]. Entre as muitas dúvidas que ainda estão por ser esclarecidas é possível ressaltar-se por exemplo, como o campo eletromagnético atua em determinadas estruturas, como: (a) nos cromossomos ou nas moléculas de DNA que constituem os gens [1], e (b) na alteração da mobilidade dos ions (p.ex., de cálcio), particularmente em tecidos do cérebro e nas propriedades eletrofisiológicas das células nervosas [17]. Por outro lado, é sabido que um estágio inicial do desenvolvimento do câncer é uma alteração no código genético de células do corpo, isto é, a molécula de DNA.

Para se ter uma idéia do estágio de incerteza nestes assuntos, frases tipicamente encontradas no final de diversos artigos são por exemplo: “Apesar dos grandes esforços, é provável que no futuro próximo ainda não se tenha respostas a questões essenciais” [2]; ou “Tendo em vista o crescimento inexorável em popularidade das comunicações pessoais, parece justificada a necessidade de investigações científicas e abertas ao público sobre os efeitos biológicos dos sinais de sistemas de comunicações móveis atuais e futuros” [22]; também, “Os níveis dos campos eletromagnéticos na cabeça são importantes para a avaliação de possíveis danos não térmicos, o que está ainda sob discussão” [8]; ou ainda, “A questão se o desenvolvimento dos tumores é ou não estimulado pelos campos eletromagnéticos produzidos pelos telefones celulares, ou seja, se eles são ou não “promotores de câncer”, ainda permanece não respondida” [2].

Resumindo, os pesquisadores ainda devem responder às seguintes questões:

- (a) Como os campos eletromagnéticos interagem com determinadas células ?
- (b) Esta interação pode danificá-las ?
- (c) Este dano seria transitório ou definitivo ?

- (d) Qual seria a extensão deste dano, em termos de danos a alguns tecidos ou órgãos ?

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Diversos autores utilizaram métodos numéricos para simular os efeitos da interação em campos próximos da antena dos telefones celulares portáteis com os tecidos da cabeça. Por ser muito poderoso e preciso para estimar o comportamento eletromagnético em geometrias tridimensionais complexas com materiais não homogêneos (condutores ou dielétricos) e com perdas, o método das diferenças finitas no domínio do tempo (ou FDTD, em inglês) tem sido o mais utilizado. O método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) básico foi primeiro proposto por Yee [23], e depois desenvolvido por outros autores [5-11]. Neste método, as equações de Maxwell na forma diferencial no domínio do tempo são resolvidas para diversos pontos na região considerada, bem como em suas redondezas, em incrementos de tempo até que sejam obtidas soluções convergentes. Uma vez que um detalhamento maior deste método foge do escopo deste trabalho e que este método está descrito nas referências mencionadas [5-11,23], aqui serão somente repetidos alguns aspectos considerados essenciais.

A equações rotacionais de Maxwell no domínio do tempo podem ser escritas da seguinte forma:

onde usualmente é utilizado o sistema MKS e os parâmetros σ , ρ , μ e ϵ são a condutividade (em S/m), a resistividade (em Ω/m), a permeabilidade (em H/m) e a permissividade (em F/m) dos tecidos nas diferentes regiões do corpo, respectivamente. Nestas equações, os termos $\rho \bar{H}$ e $\sigma \bar{E}$ representam as perdas magnéticas e elétricas que podem ocorrer no meio devido à conversão da energia eletromagnética em calor.

$$\nabla \times \bar{H} = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} \quad (5)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \rho \bar{H} \quad (6)$$

No sistema de coordenadas cartesianas cada componente de campo tem três sub-componentes e obtém-se então o seguinte conjunto de equações escalares:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho H_x \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho H_y \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho H_z \right\} \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right\} \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right\} \quad (12)$$

Seguindo o esquema básico de diferenças finitas proposto por Yee [23] e aplicando manipulações adequadas, as equações (7) a (12) são discretizadas e equações apropriadas de diferenças finitas no domínio do tempo são obtidas. O espaço tridimensional é também discretizado em grades de cubos elementares (chamadas "células", ou "células unitárias"), aos quais são atribuídas propriedades elétricas individualizadas em função de sua localização. O intervalo de tempo para o método FDTD é definido por um procedimento de diferenças finitas explícito. Para um espaço de células cúbicas, este procedimento envolve posicionar as componentes do campo elétrico E no meio das bordas do cubo e as componentes do campo magnético H no centro das faces das células unitárias. O cálculo então é procedido da forma "salto-da-rã" ("leap-frog", em inglês), computando-se alternadamente E e H em meios intervalos de tempo. Para garantir estabilidade do algoritmo de intervalo de tempo, este intervalo de tempo Δt é escolhido igual a $\Delta t = \Delta/2c$, onde Δ é a dimensão da célula e "c" é a velocidade da luz. Por

exemplo, em [8] e em [11], o intervalo de tempo Δt é igual a 8,3 ps.

Os campos no domínio computacional são inicialmente feitos nulos. A excitação é então introduzida especificando-se uma tensão no ponto de alimentação do monopolo utilizado como antena. Uma vez que o algoritmo de intervalos de tempo no método FDTD permite que os campos elétricos sejam calculados dos campos magnéticos e vice-versa, a solução do problema é obtida de forma iterativa com incrementos no tempo e no espaço, conforme está descrito no artigo original de Yee [23]. Desde que os dados no domínio do tempo tenham sido coletados, a transformada de Fourier é usada para a obtenção das quantidades no domínio da frequência, como a impedância de entrada, o diagrama de irradiação, o ganho, etc.

A discretização do espaço tridimensional em grades de cubos elementares neste método exige memória computacional proporcional ao número de pontos "N" da grade, e não a N^2 ou mais, como é o caso de outros métodos numéricos. O tempo de computação entretanto cresce com $N^{4/3}$. Por exemplo, em [7], a cabeça de um adulto é modelada por células cúbicas com dimensões de 3,17 mm, resultando então em 126.000 células constituídas de cérebro, músculo, osso, gordura, pele, sangue e olhos. Em [9], as dimensões dos cubos são de 5 mm, resultando em 57.263 células para representar a cabeça, em [5] são usados cubos de 6,56 mm resultando em 24.552 células, e em [11] os cubos são de 5 mm resultando em 141.680 células para representar a cabeça e a mão do operador. A título de ilustração, em uma estação de trabalho tipo SUN SPARC-2 com 64 Mbytes de memória DRAM e 1,5 Gbytes de espaço de disco, 8,5 Mbytes de armazenamento foram necessários para uma simulação com tempo total de CPU de 1 h, 28 min e 16 s [11].

Atlas de anatomia e imagens obtidas por métodos de ressonância magnética (MRI)[5] e de ressonância magnética nuclear (NMR) [8] são usadas para classificação e localização dos diferentes tecidos na cabeça. Por exemplo, na Tabela 1 estão mostradas as características típicas de alguns tecidos da cabeça humana usadas nas simulações, para frequências próximas a 900 Mhz [5].

Tabela 1. - Características dos tecidos da cabeça usadas nas simulações [5].

Tecido	Permissividade Relativa	Condutividade (S/m)	Massa específica (g/cm ³)
Osso	8	0,105	1,85
Pele (ou Gordura)	34,5	0,60	1,10
Músculo	58,5	1,21	1,04
Cérebro	55,0	1,23	1,03
Líquor	73,0	1,97	1,01
Cristalino	44,5	0,80	1,05
Córnea	52,0	1,85	1,02

É importante ressaltar-se dois aspectos interessantes observados nesta tabela. O primeiro é a elevada constante dielétrica (ou permissividade) relativa de alguns tecidos da cabeça, como por exemplo o líquido, o cérebro e a córnea, resultando em uma elevada densidade de fluxo elétrico (uma vez que: $D = \epsilon E$) nestes tecidos. O segundo aspecto relevante é a elevada condutividade de tecidos como o líquido, a córnea e o cérebro, a qual, associada à elevada constante dielétrica destes tecidos, provoca uma alta densidade de corrente e conseqüentemente uma elevada dissipação térmica neles.

Uma vez que os valores dos campos são determinados e que os parâmetros de cada região são conhecidos, a potência absorvida (P_{abs}) nos tecidos dissipativos é calculada então usando a integral

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \int_V \sigma |E|^2 dV \quad (13)$$

e a potência irradiada para o campo distante (P_{irr}) é dada por

$$P_{irr} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_S \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{n} dS \right\} \quad (14)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{H} são os valores de pico dos campos elétrico e magnético no domínio da frequência, e V , S e \mathbf{n} representam respectivamente, o volume contendo o tecido, a superfície fechada em torno do aparelho e do operador, e o vetor unitário normal à esta superfície. Nestas condições pode então ser definida a "eficiência de irradiação" η , dada por

$$\eta = \frac{P_{irr}}{P_{irr} + P_{abs}} = \frac{P_{irr}}{P_{entr}} \quad (15)$$

onde a potência entregue pelo aparelho portátil

$$P_{entr} = P_{irr} + P_{abs}$$

Os resultados das simulações são geralmente apresentados em SAR (mW/g), e em alguns casos normalizados para 1 W de potência emitida. Os resultados das simulações efetuadas por diversos autores usando o método FDTD são convergentes e tiveram seus resultados confirmados por medidas [5-11]. É importante observar-se que, à medida que a antena se aproxima da cabeça (p. ex., para distâncias menores que 2 ou 3 cm), os níveis de potência absorvidos pela cabeça crescem significativamente, tornando-se bem superiores aos limites estabelecidos pela normas [12-14].

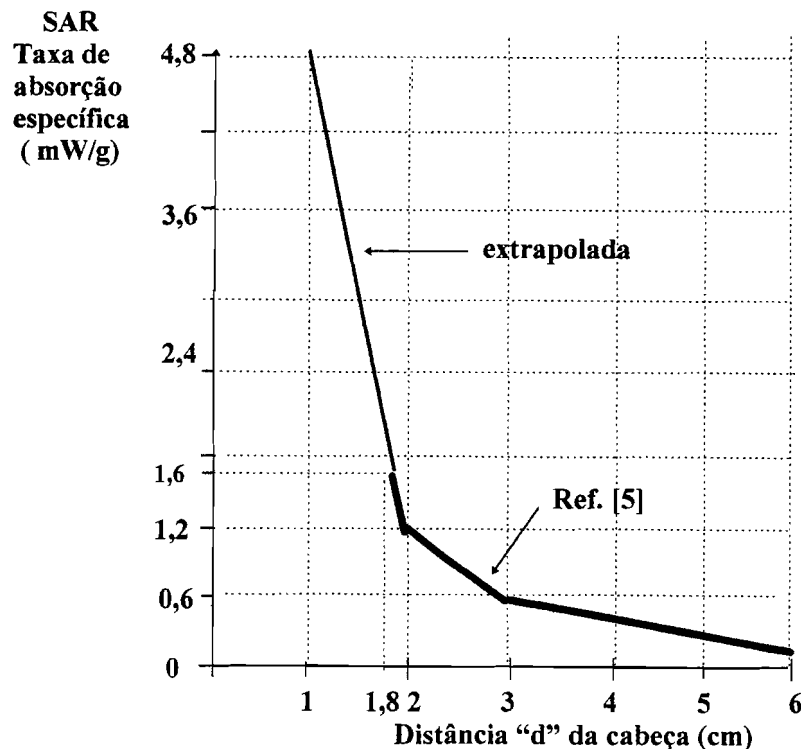


Fig 2 – Variação da Taxa de Absorção Específica com a distância "d" entre a antena e a cabeça do usuário para $P_{entr} = 600\text{mW}$.

Por exemplo, na Fig. 2 estão resultados obtidos em [5], com uma antena de 8,5 cm e utilizando os valores da Tabela 1. Observa-se que a 2 cm da cabeça tem-se uma SAR de 2 mW/g para 1 W de potência emitida, o que resulta em uma SAR= 1,2 mW/g para 600 mW de potência emitida.

Em [5] não são apresentados resultados para distâncias menores que 2 cm. Entretanto, observa-se também da Fig. 2 que a SAR é praticamente proporcional ao inverso do quadrado da distância "d" entre a antena e a cabeça. Então espera-se que, sendo mantida esta proporcionalidade, para uma distância $d = 1$ cm, a SAR seja da ordem de 4,8 mW/g para uma potência emitida de 600 mW, o que é exatamente três vezes o limite de 1,6 mW/g estabelecido pela norma IEEE/ANSI C.95.1-1992 [12,14]. Ainda, continuando mantida esta proporcionalidade, teríamos então quando $d = 0,5$ cm, uma SAR= 19,2 mW/g, correspondendo a 12 vezes o limite daquela mesma norma. Como uma elevada percentagem de usuários, talvez a grande maioria, utiliza o telefone portátil com a antena praticamente encostada à cabeça, o limite estabelecido pela norma é ultrapassado então dezenas de vezes.

Particularmente em relação a aproximação da antena ao olho de adultos e crianças, na Fig. 3 estão mostrados resultados de simulação usando o método FDTD [7] que indicam que para um aparelho celular portátil emitindo 600 mW em 900 Mhz, à uma distância de 2 cm a SAR =3,6 mW/g e à 1 cm a SAR = 5 mW/g, ou seja, respectivamente mais que duas e três vezes o limite máximo de 1,6 mW/g da norma ANSI C-95.1-1992 [12,14]. O olho é muito suscetível a efeitos de aquecimento (produzindo p. ex. catarata) tendo em vista a existência de poucos vasos capilares em seus tecidos, dificultando consequentemente a dissipação térmica.

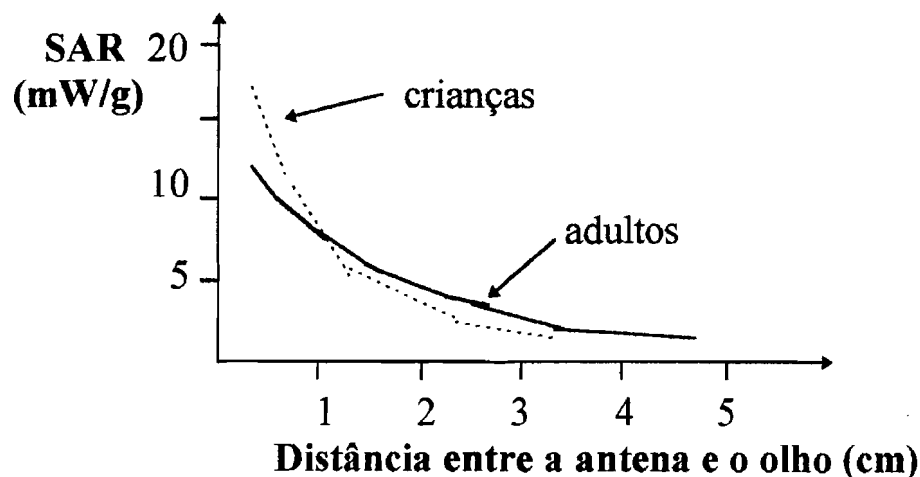


Fig 3 – SAR média no olho em função da distância da antena e a superfície do olho em 900Mhz, para uma potência emitida de 1 W [7].

Por outro lado, a redução da eficiência de irradiação η dos aparelhos celulares portáteis, definida de acordo com a eq. (15), à medida que a distância "d" entre a antena e a cabeça do usuário é diminuída foi também simulada usando o método FDTD e está mostrada na Fig. 4 , para uma antena de 8,5 cm de comprimento, em 900 Mhz, com $P_{\text{entr}} = 1$ W [5].

Observa-se que à uma distância de 2 cm da cabeça, cerca de 53 % da potência emitida pelo aparelho celular é absorvida na cabeça do usuário, o que além dos riscos dos efeitos biológicos já abordados, resulta em uma eficiência muito baixa na função de comunicação desejada, com consequências prejudiciais na qualidade de comunicação e na baixa duração da carga da bateria.

O fato que muitos usuários falam em situações desfavoráveis, como por exemplo, dentro de automóveis (onde as partes metálicas formam uma blindagem para a onda em seu percurso até o antena com a qual está se comunicando), no interior de edificações (residências, escritórios, etc.), quando a onda eletromagnética deve atravessar paredes de alvenaria ou de concreto que acarretam em perdas no seu percurso até a antena) e muitas vezes com a antena recolhida, faz com que o microprocessador via de regra disponível no telefone celular ajuste o nível de potência para os valores mais elevados, que é a situação mais arriscada. Por outro lado, alguns telefones celulares (bem como outros aparelhos usados em serviços especiais, p.ex. policiamento, segurança, etc.) são equipados para transmitir maior potência (p.ex., até 3 W), o que torna a situação ainda mais crítica.

4.COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Do que foi exposto, observa-se que ainda não há comprovação definitiva que a utilização dos telefones celulares portáteis faça mal à saúde. Entretanto, já existem evidências suficientes mostrando que, dependendo das condições de operação (especialmente quando a antena estiver muito próxima da cabeça), os limites de absorção estabelecidos pelas normas internacionais são superados. E, uma vez que a comprovação definitiva, especialmente para os "Efeitos Não Térmicos", pode demorar ainda vários anos, é importante que os usuários sejam alertados para os riscos, e que em paralelo alternativas adequadas sejam desenvolvidas visando reduzir estes riscos.

Por exemplo, dos resultados das simulações usando FDTD mostrados na Fig. 2 [5], observa-se que quando a distância da antena tipo monopolo for de 1,8 cm, a taxa de absorção específica (SAR) na cabeça já está no limite estabelecido pela norma ANSI/IEEE C.95.1 [12,14]. Como a grande maioria dos usuários normalmente fala com a antena mais próxima que isto, então aquela norma é excedida por um fator elevado e muito preocupante. Em síntese, os principais problemas apresentados se relacionam à elevada potência absorvida quando a antena se aproxima da cabeça, e à própria duração da conversação.

É possível afirmar-se que **nunca houve antes na história**

da humanidade, densidade de potência eletromagnética tão elevada sendo absorvida por tanto tempo numa região do corpo humano (a cabeça) tão importante. Observa-se que a antena tipo monopolo convencional atualmente empregada, à medida que é aproximada da cabeça do usuário tem seu diagrama de irradiação significativamente modificado pelas altas constantes dielétricas relativas dos tecidos da cabeça, e a maior parte da potência irradiada é então absorvida na cabeça. Então novas antenas deverão ser desenvolvidas, que irradiem mais no sentido oposto à cabeça do usuário, o que além de reduzir o risco à saúde, irá também contribuir para melhorar suas características (p.ex., diagrama de irradiação, ganho, impedância de entrada e eficiência de irradiação) de desempenho, a qualidade da comunicação, bem como a duração da bateria.

As novas técnicas de modulação (p.ex., TDMA, CDMA, etc.), que já estão sendo introduzidas no mercado, deverão exigir menores níveis de potências emitidas. Entretanto, o elevado número de telefones celulares portáteis que estará sendo utilizado no Brasil até fins de 1996 (mais de 4 milhões de terminais, segundo previsões oficiais), ainda utilizará o sistema AMPS, com antenas tipo monopolo vertical e potência máxima emitida de 600 mW. Então, parece razoável pensar-se que até que seja uniformizada a utilização de telefones celulares com menores riscos à saúde dos usuários, uma parcela significativa dos aparelhos com a tecnologia atual ainda continuará por muitos anos em operação.

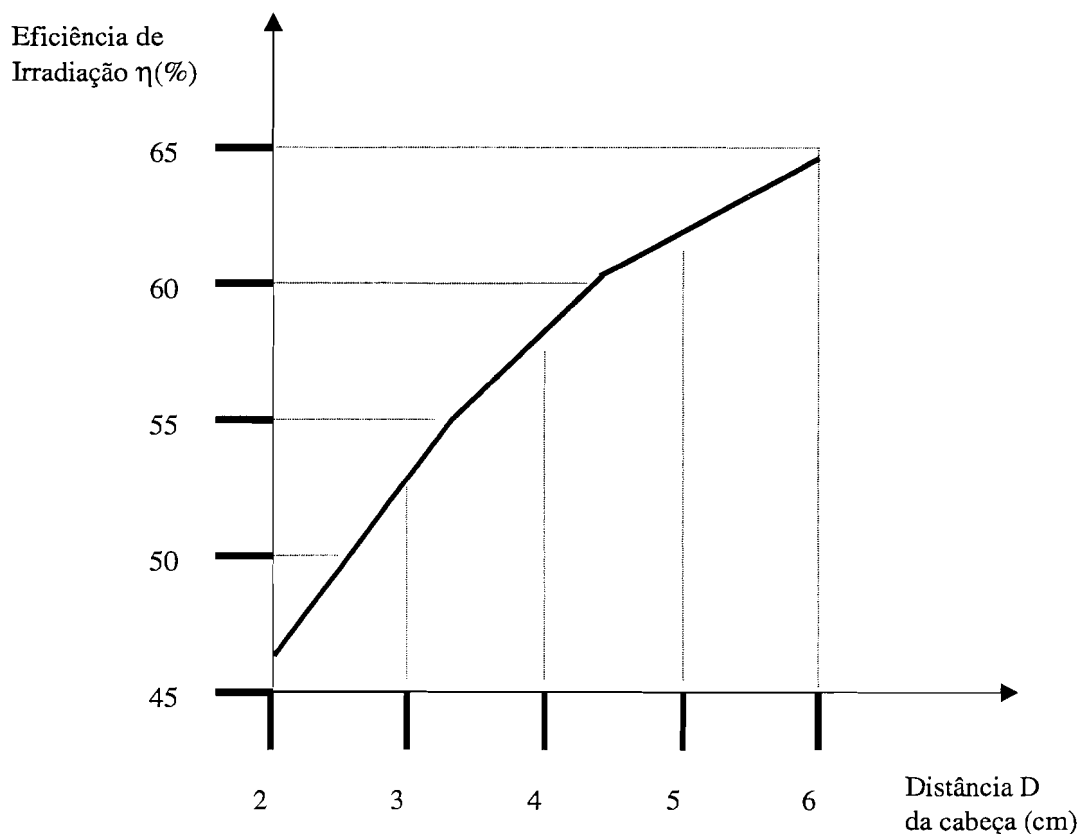


Fig. 4 - Redução da eficiência de irradiação η (%) com a diminuição da distância "d" entre a antena e a cabeça do usuário ($P_{\text{emr}} = 1 \text{ W}$) [5].

Quantas pessoas poderão até então sofrer conseqüências prejudiciais à saúde ? O que poderia ser feito para reduzir este risco ? Entre outras sugestões, as seguintes podem ser consideradas :

- (a) Falar sempre com a antena afastada no mínimo de 2 a 3 cm da cabeça, posicionada o mais para trás possível;
- (b) Nunca falar com a antena recolhida, procurar não falar dentro de automóveis (a menos que se disponha de antena externa ou "viva-voz") ou dentro de edificações (escritórios, residências, etc...), que são situações em que o telefone celular emite maior potência para se comunicar com a antena mais próxima;
- (c) Falar sempre o menor tempo possível, de preferência o essencial (é óbvio que isto contraria o interesse das operadoras), e quando a ligação durar mais que um ou dois minutos, trocar o aparelho para o outro lado da cabeça, visando minimizar os riscos;
- (d) Quando disponível, usar um elemento protetor (p.ex., um refletor metálico colocado entre a antena e a cabeça do usuário, que funcionaria como uma blindagem eletromagnética para a cabeça, redirecionando as ondas na direção desejada); este protetor sendo adequadamente dimensionado poderia otimizar alguns parâmetros como a diretividade, o ganho, a eficiência de irradiação, etc., e, sob o ponto de vista do usuário, garantiria funcionamento dentro dos limites das normas em praticamente quaisquer condições de operação, além de um menor consumo da bateria.

AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho foi suportado pelo CNPq, através de uma bolsa de pesquisa. O autor agradece a diversos colegas pelas discussões esclarecedoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fischetti, M., "The cellular phone scare", IEEE Spectrum, June 1993, pp.43-47.
- [2] Gottlober, H. and Henrichs, K., "Can mobile phones affect your health?", Telecom Report International, vol. 18, nº 3, 1995, pp.26-29.
- [3] Bren, S.P.A., "Reviewing the RF Safety Issue in Cellular Telephones", IEEE Engineering in Medicine and Biology, May/June 1996, pp.109-115.
- [4] Salles, A.A., "Efeitos Biológicos da Telefonia Celular", Telemo 96, Curitiba, PR, 22-25/julho 96, vol. 1, pg.501-506.
- [5] Jensen, M.A. and Rahmat-Samii, Y., "EM Interaction of Handset Antennas and a Human in Personal Communications", Proc. of the IEEE, vol. 83, nº 1, January 1995, pp. 7-17.
- [6] Hombach, V. et al., "The dependence of EM Energy Absorption upon Human Head Modeling at 900 MHz", to be published, IEEE Trans. on MTT, October 1996.
- [7] Dimbylow, P.J., "FDTD calculations of the SAR for a dipole closely coupled to the head at 900 Mhz and 1.9 Ghz", Phys. Med. Biol., vol. 38, 1993, pp. 361-368.
- [8] Martens, L. et al., "Calculation of the electromagnetic fields induced in the head of an operator of a cordless telephone", Radio Science, vol. 30, nº 1, Jan-Febr. 1995, pp. 283-290.
- [9] Chen, H-Y. and Wang, H-H., "Current and SAR Induced in a Human Head Model by the Electromagnetic Fields Irradiated from a Cellular Phone", IEEE Trans. on MTT, vol. 42, nº 12, December 1994, pp. 2249-2254.
- [10] Yildirim, B.S. and El-Sharawy, E.A., "Analysis of a Magnetically-Shielded Cellular Phone Antenna Using Finite-Difference Time-Domain Method", 1996 IEEE MTT-S Int'l. Microwave Symp. Digest, San Francisco, USA, June 1996, pp. 979-982.
- [11] Toftgard J., et al., "Effects on Portable Antennas of the Presence of a Person", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 41, nº 6, June 1993, pp.739-746.
- [12] ANSI, ANSI/IEEE C95.1-1992: "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 Ghz", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY 10017, 1992.
- [13] CENELEC CLC/TC211/B, "Second Draft: Safety Considerations for Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Telecommunications Equipment (MTE) in frequency range 30 Mhz- 6 Ghz", CENELEC, Brussels, Oct. 1995.
- [14] FCC 96-326: "FCC Updates its Guidelines for Evaluating the Environmental Effects of Radiofrequency Emissions; Action Implements Telecom Act Provisions (ET Docket Nº 93-62)", Report Nº DC 96-76, 1º/8/96, disponível no web "http://www.fcc.gov/oet/headline/fcc96326.html".
- [15] Bronzino, J.D.(ed.), "The Biomedical Engineering Handbook", CRC Press & IEEE Press, 1995, pp. 1388-1389, e Section IX-"Biologic Effects of Nonionizing Electromagnetic Fields", pp. 1380-1440.
- [16] Michaelson, S.M., "Human Exposure to Nonionizing Radiant Energy- Potential Hazards and Safety Standards" (Invited Paper), Proc. of the IEEE, vol. 60, nº 4, April 1972, pp.389-421.

- [17] Bernhardt, J.H., "Non-ionizing Radiation Safety: Radiofrequency Radiation, Electric and Magnetic Fields", *Physics on Medicine and Biology*, vol. 37, nº 4, 1992, pp. 807-844.
- [18] Environmental Health Criteria 137, "Electromagnetic Radiation (300 Hz to 300 Ghz)", World Health Organization, Geneva, 1993.
- [19] Stuchly, M.A., "Mobile Communication Systems and Biological Effects on their Users", *The Radio Science Bulletin*, nº 275, December 1995, pp.7-13.
- [20] Senise, J.T., "Sobre Normas de Segurança para Exposição a Campos Eletromagnéticos de Rádio-Frequências e Microondas", *Telemo 96*, Curitiba, PR, 22-25/julho 96, vol. 1, pg. 507-512.
- [21] Moseley, H., *Medical Physics Handbooks* 18, "Non-Ionising Radiation", Chap. 3 - Biological Effects of Microwaves and RF, pg. 38-61.
- [22] Kuster, N., "Do Mobile Phones Pose a Health Hazard?", comunicação privada.
- [23] Yee, K.S., "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-14, nº 5, May 1966, pp.302-307.

Álvaro Augusto Almeida de Salles nasceu em Bagé, RS, em 06/03/46. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela UFRGS em 1968, obteve seu mestrado em Engenharia Elétrica pela PUC-RJ em 1971, e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Londres em 1982. Entre 1970 e 1978 trabalhou como Professor Assistente no CETUC(PUC/RJ). Entre 1978 e 1982, na Universidade de Londres desenvolveu pesquisas em radares tipo Phased arrays e em controle ótico de amplificadores e osciladores a MESFET de GaAs. Entre 1982 e 1990 no CETUC desenvolveu pesquisas em semicondutores para microondas e comunicações óticas, como Professor Associado. Entre 1991 e 1994 foi Professor Visitante no UFRGS, onde a partir de 1995 é Professor Adjunto. Suas áreas de interesse em pesquisa atualmente incluem semicondutores HEMT e HBT para aplicações em microondas e comunicações óticas, bem como Efeitos Biológicos dos Campos Eletromagnéticos. Nesta área depositou um pedido de patente para um protetor para comunicações pessoais ("Protecom"). Foi autor de mais de 50 artigos em revistas e conferências nacionais e internacionais. O Prof. Salles é membro fundador da SBMO, foi "Chairman" do Simpósio internacional de Microondas (SBMO/IEEE) em 1987, foi membro do 'Editorial Board' da revista *Microwave and Optica Technology Letters* e membro da Comissão de Programa do TELEMO 96.