

Cálculo da SAR na cabeça produzida por telefones celulares dispostos assimetricamente

Cláudio Pereira da Costa*, Glauco Fontgalland

Resumo Neste trabalho foi realizado o cálculo da Taxa de Absorção Específica (SAR) em usuários passivos e no seu entorno, quando localizados nas proximidades de usuários ativos de aparelhos celulares. Utilizando o *software* Microwave Studio CST foram simuladas duas configurações. Os modelos consistem de aproximações da cabeça humana, com quatro interfaces cada, representando os tecidos da pele, músculo, crânio e cérebro. Foi observado o fenômeno de superposição dos níveis de campo elétrico e, portanto, a SAR resultante da composição construtiva de fontes distintas. Os níveis de SAR obtidos foram comparados às normas vigentes e a trabalhos publicados. A maior parte dos valores obtidos está abaixo dos limites de exposição de campo eletromagnético utilizados. No entanto, como esperado, alguns pontos encontram-se acima dos valores emitidos por uma única fonte (telefone celular), decorrente da superposição dos campos. Os níveis de SAR obtidos neste trabalho atingiram o valor máximo de 73,6 mW/kg, valor que não ultrapassa os limites de exposição da ANATEL.

Palavras-chave Eletromagnetismo computacional, Telefone celular, SAR, Usuários passivos.

SAR evaluation from various mobile phones disposed asymmetrically

Abstract *In this paper, the Specific Absorption Rate (SAR) evaluation in and nearby passive users when they are closed to mobile phones active users is made. With the help of CST two configurations were considered. The models are approximations of the human head by geoids geometries, with four interfaces. Each one represent the tissues present in the human head (skin, muscle, bone and brain). The electric field superposition phenomenon and SAR from different sources are observed. The calculated SAR levels are compared with the guidelines and published studies. Most of the SAR values obtained are below the exposure limits, while some ones are greater than those produced by only one source (mobile phone) as presented in published papers. As expected, these hot spots are due to the superposition of electric field. The obtained SAR levels in this study reached the maximum value of 73.6 mW/kg, a value that does not exceed the exposure limits of ANATEL.*

Keywords *Computational electromagnetic, Mobile phone, SAR, Passive users.*

Extended Abstract

Introduction

The rapid increase in the use of cell phones is an undeniable fact and concerns the modern society. Currently, in Brazil there are approximately 242 million users of mobile phones (Agência..., 2012). Such devices are sources of electromagnetic (EM) fields near children and adults who make use of them without really knowing the effects to exposure.

The international organizations such as IEEE and ICNIRP set standards and recommendations to limit the exposure levels to these sources of EM fields. In Brazil, ANATEL endorses the limits suggested by the ICNIRP.

There are several radiation sources of fields responsible for the EM radiation in the environment, such as laptops/notebooks, network LAN 802.11 a/b/g and cell phones. As wireless devices, they work with antennas that radiate in various directions, radiating on the user of the device (active user) and passive users stayed around it. Thus, it is clear that people close to these sources are exposed to fields that need to be investigated.

The occurrence of field concentration areas, said hot spots, resulting from the superposition of electric and magnetic fields, independent of the frequency of operation, is quite common due to the large number of active users of mobile phones (Costa and Fontgalland, 2009; Pereira Filho et al., 2009).

The available rule does not specify the adopted ANATEL SAR levels resulting from direct and indirect public exposure or the superposition fields on passive users (general public) nearby of these sources. This needs to be investigated in order to contribute to the works on the exposure limits in passive users, demystify some myths and justify the restrictions on the active users in specific public places (hospitals, clinics, daycare, etc.).

In this paper, the SAR levels in a person's head are calculated and compared with other studies using the 3D electromagnetic simulator CST Microwave Studio software. The model of the head is in free space placed nearby of two active users. The simulated source (mobile phone) uses a monopole antenna with horizontal polarization in the frequency of 2.45 GHz. Two possible configurations of the spatial arrangement of these sources are considered, aiming to identify the points of greatest positive contribution of the fields.

Material and Methods

It was revised the equations for SAR as function of electrical parameters (electric field) and the international (IEEE and ICNIRP), and national, ANATEL, standards and recommendations. The human head model adopted is simulated using the to calculate the SAR in a passive user. The model consists of homogeneous geoid concentric structures with a

radius of 0.09 m to represent the human head.

Without of loss of accuracy, to achieve the proposed desired goals (determination of the points of constructive superposition of fields in the passive user and its surrounding) the model of the human head consists of four types of homogeneous tissues: three stuff layers and the interior volume of the structure completed by the brain tissue. The model is accomplished with four interfaces. The dimensions used in the homogeneous model are: skin (1 mm), muscle (1 mm), skull (3.5 mm) and brain tissue in the interior volume (Figure 1a).

Results

The calculated results for SAR are dependent of the configuration. The obtained values present high level in the skin, where the estimated value was 73.6 mW/kg (configuration 2). This result points out that the use of punctual SAR maybe used as reference and accuracy parameter for determining the amount of EM energy absorbed in biological tissues.

The level of the SAR for 10 g of tissues in passive users presented in Tables 3-6 were compared to the value of 0.590 mW/kg obtained for an elliptical model of the head (active user) with one layer (Cocherova, 2008). It should highlighted here that the calculated levels in passive users with two sources have exceed the value for the active users with one source, presented by Cocherova (2008). In both woks the electric field was considering the horizontal polarization.

Discussion and Conclusion

The results obtained lead that the choice of the unit of mass has an important influence on the amount of energy absorbed by human tissue.

The existence of the SAR levels in passive user in all tissues at any position in the region of study results from the reflections between layers in the head model and the superposition of EM fields from the two sources. Also, the variation SAR levels surround the passive user come from the superposition of EM fields generated from two sources operating in the same frequency (2.45 GHz).

In some positions, the calculated SAR levels for configuration 1 shows an increasing in the SAR value with the distance from the source field. This fact shows the superposition of electric fields in the region of study and corroborates with the results published by Costa and Fontgalland (2009) and Pereira Filho et al. (2009).

The SAR levels calculated in the passive user with only two sources did not exceed the exposure limits of the international and Brazilian rules. However, it should be noted that higher levels can be easily achieved increasing the number of sources.

Introdução

O aparelho celular é uma das fontes de campo eletromagnético (EM) que mais tem sido alvo de questionamentos, devido sua proximidade com o usuário e sua grande disseminação junto à população. Estima-se que haja mais de 3 bilhões de aparelhos no mundo, gerando campos EM próximo à usuários jovens, adultos e àqueles que estão à sua volta (Costa e Fontgalland, 2009).

Atualmente no Brasil existem aproximadamente 242 milhões de usuários de aparelhos celulares (Agência..., 2012). Este número torna-se uma preocupação devido à falta de uma maior conscientização e de informação credível sobre seus efeitos. Esta preocupação é evidenciada por inúmeras publicações sobre as possíveis consequências dos efeitos biológicos “têrmicos”. Fernández Rodriguez (2001) e Salles *et al.* (2003) utilizaram simulações computacionais para calcular a Taxa de Absorção Específica (SAR) na cabeça humana utilizando o método FDTD.

Com o propósito de regularizar tal questão, órgãos governamentais e agências de pesquisas definiram recomendações e normas para os limites de exposição para os trabalhadores e público em geral: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998), Agência Nacional de Telecomunicações (2002) e IEEE (2005).

A SAR é o parâmetro ao qual são definidas as recomendações de segurança que leva em consideração o aumento térmico de 1 °C produzido pelo depósito de energia em qualquer unidade de massa de 1 g ou 10 g de tecido biológico.

Existem várias fontes de campos responsáveis pela irradiação da radiação EM ‘nos ambientes (abertos ou fechados), como os *Laptops/Notebooks*, redes LAN 802.11 a/b/g e aparelhos celulares. Esses aparelhos operam com antenas que irradiam em várias direções, isto é, irradiam sobre o usuário (ativo) portador do dispositivo e sobre os usuários (passivos) próximos a ele. Assim, fica evidente que pessoas que estejam em locais próximos a essas fontes e não estejam utilizando determinado dispositivo estão expostas a níveis de campos que necessitam ser investigados.

Devido ao grande número de usuários ativos de aparelhos celulares, a ocorrência de regiões de concentração de campo, ditas ‘pontos quentes’, decorrentes da superposição dos campos elétrico e magnético é bastante frequente (Costa e Fontgalland, 2009; Pereira Filho *et al.*, 2009).

A norma vigente da ANATEL não faz nenhuma menção aos níveis de SAR resultantes da exposição pública direta e indireta ou da superposição de campos em usuários passivos (trabalhadores ou público em geral) nas proximidades dessas fontes.

Neste trabalho são calculados os níveis de SAR utilizando o *software* de simulação eletromagnética 3D Microwave Studio. O modelo considerado da cabeça de um usuário passivo, situado no espaço livre nas proximidades de usuários ativos, será irradiado por antenas monopolo com polarização horizontal na frequência de 2,45 GHz para duas configurações.

Os valores dos níveis de SAR calculados são comparados aos níveis de referência das normas vigentes e com outros trabalhos publicados com o objetivo de contribuir com o estudo sobre os limites e precauções de exposição à radiação EM.

Materiais e Métodos

Taxa de absorção específica

A SAR é um dos parâmetros mais confiáveis para quantificar os efeitos da exposição à radiação EM, sendo utilizado para aplicação das recomendações e normas pelos órgãos competentes. A SAR é definida como a dissipação de potência por unidade de massa de tecido biológico (Santos, 2008).

A determinação da SAR como parâmetro de investigação sobre os efeitos da exposição deu-se através de vários estudos desenvolvidos pelos órgãos regulamentadores (Fernández Rodriguez, 2001), os quais trouxeram resultados relacionados à variação de temperatura gerada por uma fonte de campo EM. A SAR está relacionada diretamente ao aumento da temperatura devido à energia EM que incide sobre o tecido humano. A Equação 1 a seguir é proveniente dessa definição:

$$SAR = \frac{dP}{dm} \quad (1)$$

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) obtém-se:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left[\frac{dW}{dm} \right] \quad (3)$$

Da definição de densidade:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (4)$$

e

$$dW = W_v dV \quad (5)$$

obtém-se a expressão mensurável (Equação 6):

$$SAR = \frac{d}{dt} \left[\frac{W_v dV}{\rho dV} \right] = \frac{1}{\rho} \frac{dW_v}{dt} = \frac{P_v}{\rho} \quad (6)$$

A variação volumétrica da potência em um determinado meio é dada pela Equação 7 (Hayt Junior e Buck, 2003; Sadiku, 2006):

$$P_v = \frac{dW_v}{dt} = \sigma E^2 \quad (7)$$

Assim, o valor máximo do nível da SAR para um determinado material em campos distantes é calculado pela Equação 8 (Federal..., 1998; Internacional..., 1998; IEEE, 2005):

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (8)$$

onde ρ é a densidade [kg/m^3] e σ é a condutividade do tecido [S].

Para se obter um valor médio da SAR utiliza-se uma fonte de excitação senoidal expressa da seguinte forma:

$$E = E_0 \cos(\omega t) \quad (9)$$

Logo, a potência volumétrica pode ser expressa por:

$$P_v = \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad (10)$$

Analogamente, tem-se que o valor médio da SAR é:

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (11)$$

Observa-se que a SAR é diretamente proporcional ao aumento local de temperatura, responsável pelos efeitos térmicos

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{SAR}{C_p} \quad (12)$$

em que T é a temperatura, e C_p é o calor específico do tecido [$\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$] (Fernández Rodríguez, 2001).

Nestes termos, a determinação do valor exato da SAR resulta da medição do campo elétrico. Mas, como medir o campo elétrico no interior de seres humanos vivos? Uma resposta a esta questão é dada através dos resultados de pesquisas que utilizaram simulações numéricas computacionais, com *phantom* SAM (Manequim Antropomórfico Específico) de formato e propriedades dielétricas (permissividade, permeabilidade e condutividade) semelhantes aos de humanos vivos (Monebhurrin, 2009; Monebhurrin *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2008). Estas propriedades dielétricas são dependentes, dentre outros fatores, da frequência, e permitem caracterizar o material para todo o espectro eletromagnético.

Limites de exposição e normas

Com o objetivo de proteger a saúde pública, a ICNIRP em 1998 publicou um documento fornecendo os níveis de referência de exposição para comparação com valores medidos em grandezas físicas usadas para especificar as restrições básicas de exposição a campo EM.

Nestas normas a SAR funciona como o parâmetro limitador da radiação no corpo humano, medida em 1 g ou 10 g de tecido biológico [W/kg] ou [mW/kg]. Esses limites levam em consideração o vácuo como meio de medição e o valor eficaz da grandeza relacionada diretamente com a SAR. Na Tabela 1 são apresentados os valores máximos da SAR localizada para os principais órgãos nacional e internacional.

Todos os limites vistos na Tabela 1 resultam de várias normas de padronização adotadas em cada região. No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (2002) adotou diretrizes por meio da Resolução 303, com seus limites de exposição pública e ocupacional referenciando aos guias de recomendações do ICNIRP (estabelecidas pela CENELEC).

Vale destacar que praticamente todas as normas vigentes trazem o valor de 4 W/kg como o limite máximo de absorção de energia, sem alteração da temperatura do corpo. Os valores apresentados para partes específicas são obtidos através de fatores de segurança.

Propriedades dielétricas e modelo da cabeça humana

A determinação dos níveis de exposição à radiação EM é baseada no conhecimento das características dielétricas dos tecidos biológicos. A partir da permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade (σ) é possível estimar, em frequências de RF, os níveis de energia EM superpostos nos tecidos biológicos (Costa *et al.*, 2010).

Devido à grande complexidade do corpo humano, os órgãos reguladores dos limites de exposição e os centros de pesquisa continuam realizando estudos para caracterizar todos os tipos de tecidos do corpo humano. A FCC, por exemplo, disponibiliza um banco

Tabela 1. Comparação dos limites máximos adotados pela Europa, EUA e Brasil.

	Europa	USA	Brasil
SAR média corpo inteiro [W/kg]	0,08	0,08	0,08
SAR localizada (cabeça) [W/kg]	2	1,6	2
Tempo de exposição [min]	6	30	6
Unidade de massa [g]	10	1	10

de dados com várias propriedades dielétricas do tecido humano (Tabela 2) (Federal..., 1998).

Neste trabalho foi utilizado um ambiente de simulação eletromagnética 3D Microwave Studio CST para calcular a SAR em três modelos da cabeça humana constituídos por estruturas geóides concêntricas. Um raio médio de 0,09 m foi considerado para representar a cabeça humana. Fenômenos de reflexão, espalhamento, transmissão e reflexão frustrada são frequentemente encontrados em problemas de propagação em meios multicamadas ou interfaces dielétricas. Desta forma, para alcançar os objetivos aqui desejados, o modelo da cabeça humana é constituído por apenas quatro tipos de tecidos homogêneos. Pelas razões descritas anteriormente e pelo fato de se procurar identificar uma situação onde a superposição dos campos ocorra, não há a necessidade, para esse momento, de um modelo mais preciso das características dielétricas ou de uma modelagem completa da cabeça. Assim, o modelo é constituído por 4 interfaces, 3 camadas de tecido com espessuras, e o interior da estrutura preenchido pelo tecido do cérebro. Os tecidos homogêneos utilizados no modelo são: pele (1 mm), músculo (1 mm), osso do crânio (3,5 mm) e o tecido do cérebro (Figura 1a).

Na modelagem da fonte de campo com o Microwave Studio CST é utilizada uma antena monopolar de 1/8 de comprimento de onda. Para o modelo do ambiente simulado (usuários ativos

e passivos) pode-se considerar que o diagrama de irradiação do monopolo de $\lambda/8$, $\lambda/4$ e da antena *patch* apresentam a mesma distribuição espacial de campo na região exterior da cabeça (Salles *et al.*, 2003). Os diversos modelos de antenas adotados nos aparelhos celulares apresentam características de irradiação de antenas omnidirecionais em um plano. Simulada em material condutor perfeito (PEC), a antena monopolo irradia 1 W normalizado com polarização horizontal na frequência 2,45 GHz (Figura 1b). A modelagem do aparelho celular consiste de uma caixa metálica de dimensões totais de $99,8 \times 44 \times 3$ mm. A antena monopolo de $\lambda/8$ é fixada na parte superior do aparelho. A fonte de excitação discreta e o aparelho celular modelados com o *software* Microwave Studio CST estão ilustrados na Figura 1b.

O objetivo deste trabalho não é investigar a SAR em vários modelos da cabeça humana. Trabalhos relacionando vários outros tipos de modelos da cabeça foram desenvolvidos por (Beard *et al.*, 2006; Cocherova *et al.*, 2008; Fernández Rodrigues, 2001; Ismail e Jenu, 2007; Monebhurrun *et al.*, 2002; Monebhurrun, 2009). Esses trabalhos apresentam em comum o fato de abordarem o assunto de efeitos de campos eletromagnéticos em tecidos biológicos considerando os níveis de SAR presentes no usuário ativo. As simulações realizadas neste trabalho visam o usuário passivo como alvo das atenções e determinação do nível de SAR.

Tabela 2. Propriedades dielétricas dos tecidos simulados para a frequência de 2,45 GHz (Federal..., 1998).

Table 2. Dielectric properties to simulated of tissues in frequency of 2.45 GHz (Federal..., 1998).

Tipo de tecido	Cabeça		
	Constante dielétrica relativa $[\epsilon_r]$	Condutividade σ [S/m]	Densidade volumétrica ρ [kg/m ³]
Cérebro	42,53	1,51	1030
Crânio	14,96	0,60	1850
Músculo	53,57	1,81	1040
Pele	38,00	1,46	1000

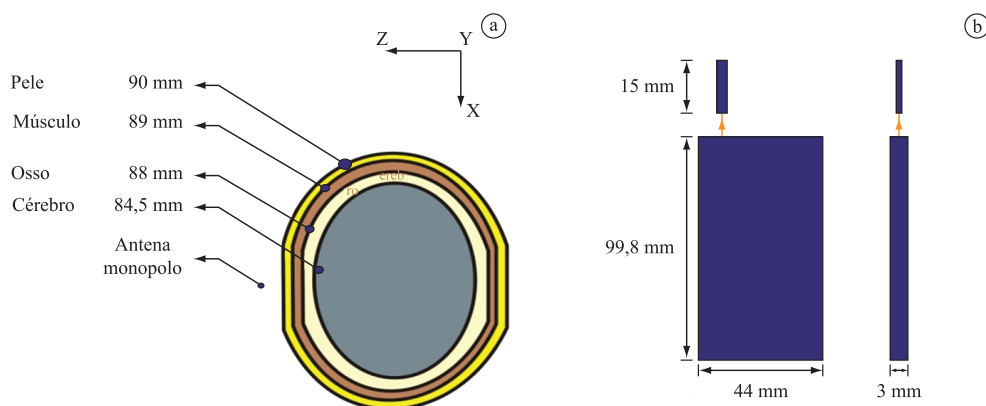


Figura 1. a) Vista superior do modelo da cabeça, b) Antena monopolo (Costa e Fontgalland, 2009).

Figure 1. a) Top view of the model's head, b) monopole antenna (Costa and Fontgalland, 2009).

Simulação computacional

Neste estudo foi considerado o modelo da cabeça humana, apresentado na Figura 1a, com uma antena monopolo (Figura 1b) para representar o usuário ativo. Os valores são calculados na região de campos distantes (RCD).

Numa primeira configuração (Figura 2), os modelos de fonte de campo EM foram fixados em duas posições no mesmo eixo onde é calculada a SAR ($z = 0$ e $z = 1$ m). Isso permite criar um ambiente eletromagnético em campos distantes (região de estudo). Posteriormente foi inserido um usuário passivo neste ambiente, para calcular os níveis de SAR resultantes dos campos EM devido ao acoplamento entre os dois modelos da cabeça (usuário ativo e passivo).

A segunda configuração estudada (Figura 3) utiliza um arranjo espacial com todas as fontes de campo EM fixadas em um eixo diferente (eixo x), distantes de 0,3 m.

Em ambos os casos foram variadas as posições relativas ao usuário passivo e calculado os níveis máximos de SAR em 1 g, 10 g e em um ponto (SAR pontual).

Os níveis foram calculados e apresentados nas Tabelas 3 a 6, levando em consideração os valores máximos registrados em cada tecido, e a distância mínima de 0,3 m entre os usuários ativo e passivo.

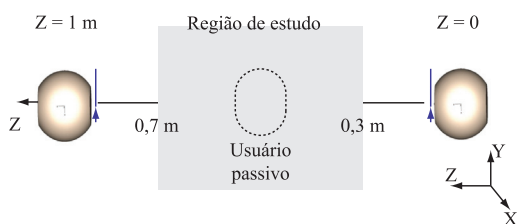


Figura 2. Configuração 1 – Dois usuários ativos com um usuário passivo nas proximidades.

Figure 2. Configuration 1 – Two active users with a passive user nearby.

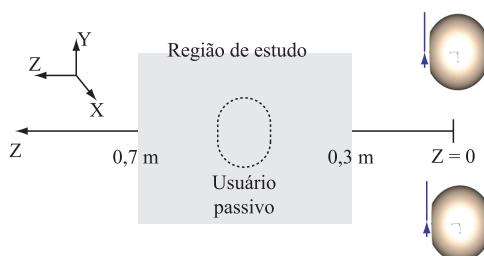


Figura 3. Configuração 2 – Dois usuários ativos com um usuário passivo nas proximidades.

Figure 3. Configuration 2 – Two active users with a passive user nearby.

Resultados

Todos os valores dos níveis da SAR calculados neste trabalho são apresentados em mW/kg e provenientes de uma fonte de potência de 1 W normalizada (antena monopolo) com polarização horizontal na frequência de 2,45 GHz. Os valores são determinados a partir de uma distância mínima de 0,3 m, considerando essa a menor distância entre todos os usuários existentes.

Nos resultados das simulações efetuadas foi utilizada a distância de 1,5 cm como a maior distância entre o aparelho celular e o usuário ativo. Deve-se destacar que os níveis de energia EM absorvida na cabeça tende a aumentar consideravelmente em distâncias menores que 2 cm.

Os níveis da SAR calculados nas duas configurações, apresentadas nas seções anteriores, foram caracterizados por comportamentos da seguinte forma:

- Configuração 1: As fontes de campo EM estão alinhadas, no mesmo eixo, com o usuário passivo na região de estudo. Os níveis da SAR obtidos apresentam uma variação inversamente proporcional com a distância. Estes resultados apresentam níveis mais elevados na posição $z = 0,7$ m na maior parte dos tecidos, o que caracteriza a superposição dos campos EM das duas fontes;
- Configuração 2: As fontes de campo EM estão dispostas em um eixo perpendicular ao eixo do usuário passivo, localizado na região de estudo. Os níveis de SAR resultante são bastante elevados a pequenas distâncias das fontes e variam inversamente proporcional com a distância. Esses níveis diminuem consideravelmente quando o usuário passivo se aproxima do extremo ($z = 0,7$ m) da região de estudo.

Os valores calculados para a SAR pontual possuem comportamentos distintos, dependendo da configuração apresentada, com níveis elevados em todos os tecidos. Estes valores de SAR pontual possibilitam cálculos mais precisos da quantidade de energia armazenada nos tecidos, resultando em um melhor detalhamento das informações sobre os fenômenos biológicos que podem acontecer.

Os níveis de SAR em 10 g nas Tabelas 3 a 6 são comparados ao valor de 0,590 mW/kg , obtido de um modelo elíptico de uma camada da cabeça (usuário ativo) (Cocherova, 2008). Todos os níveis calculados ultrapassaram bastante os valores apresentados por Cocherova (2008), considerando a mesma polarização do campo EM.

Tabela 3. Níveis máximos da SAR calculados na camada da pele.
Table 3. Maximum levels of SAR calculated in the layer of the skin.

Distância [m]	Configuração 1					Configuração 2				
	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]
	Potência normalizada em 1 W					Potência normalizada em 1 W				
0,3	6,91	0,35	6,42	0,40	11,80	22,50	1,13	26,30	1,64	73,60
0,4	5,21	0,26	7,76	0,49	14,70	8,19	0,41	8,92	0,56	25,20
0,5	3,45	0,17	1,75	0,11	4,80	3,98	0,20	5,18	0,32	13,10
0,6	5,38	0,27	7,95	0,50	16,00	3,10	0,16	4,00	0,25	12,20
0,7	7,14	0,36	6,32	0,40	9,52	2,43	0,12	3,10	0,19	7,27

Tabela 4. Níveis máximos da SAR calculados na camada do músculo.
Table 4. Maximum levels of SAR calculated in the layer of the muscle.

Distância [m]	Configuração 1					Configuração 2				
	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]
	Potência normalizada em 1 W					Potência normalizada em 1 W				
0,30	6,91	0,35	5,72	0,36	6,24	22,50	1,13	26,30	1,64	65,50
0,40	5,21	0,26	6,91	0,43	13,10	8,19	0,41	8,92	0,56	22,40
0,50	3,45	0,17	1,75	0,11	3,74	3,98	0,20	5,18	0,32	11,50
0,60	5,38	0,27	7,97	0,50	14,30	3,10	0,16	4,00	0,25	9,70
0,70	7,14	0,36	5,03	0,31	6,59	2,43	0,12	3,10	0,19	5,79

Tabela 5. Níveis máximos da SAR calculados na camada do crânio.
Table 5. Maximum levels of SAR calculated in the layer of the skull.

Distância [m]	Configuração 1					Configuração 2				
	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]
	Potência normalizada em 1 W					Potência Normalizada em 1 W				
0,3	5,51	0,28	3,31	0,21	3,47	22,50	1,13	21,00	1,31	24,10
0,4	4,64	0,23	5,46	0,34	4,84	8,19	0,41	6,27	0,39	8,26
0,5	2,75	0,14	1,75	0,11	1,60	3,55	0,18	4,12	0,26	5,39
0,6	4,79	0,24	5,60	0,35	5,76	3,10	0,16	3,19	0,20	4,00
0,7	5,69	0,28	2,66	0,17	3,66	2,43	0,12	2,47	0,15	2,38

Tabela 6. Níveis máximos da SAR calculados na camada do cérebro.
Table 6. Maximum levels of SAR calculated in the layer of the brain.

Distância [m]	Configuração 1					Configuração 2				
	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]	SAR 10 g [mW/kg]	Brasil [%]	SAR 1 g [mW/kg]	USA [%]	SAR pontual [mW/kg]
	Potência normalizada em 1 W					Potência Normalizada em 1 W				
0,3	2,27	0,11	2,71	0,17	2,08	20,00	1,00	16,00	1,00	24,10
0,4	3,66	0,18	4,73	0,30	4,84	7,29	0,36	7,11	0,44	8,26
0,5	1,13	0,06	0,57	0,04	1,60	2,80	0,14	3,15	0,20	2,31
0,6	4,28	0,21	4,86	0,30	5,26	2,18	0,11	2,44	0,15	1,71
0,7	2,34	0,12	2,07	0,13	2,20	1,71	0,09	1,89	0,12	2,38

Discussão

A escolha da unidade de massa tem uma influência determinante na quantidade de energia absorvida pelo tecido humano. Portanto, deve-se levar em conta qual norma está sendo utilizada como referência aos resultados do estudo.

A existência dos níveis da SAR no usuário passivo em todos os tecidos, em qualquer posição na região de estudo, decorre das reflexões existentes nas camadas ou da superposição dos campos EM das duas fontes.

Em algumas posições, os níveis de SAR calculados na configuração 1 apresentaram um aumento de valor à medida que a distância da fonte de campo aumenta $z = 0$. Este fato evidencia a superposição de campos elétricos na região de estudo e corrobora com os resultados os publicados por Costa e Fontgalland (2009) e Pereira Filho *et al.* (2009).

Conclusão

Os resultados obtidos com a simulação da superposição dos campos EM provenientes de duas fontes no espaço livre sobre o modelo de camadas da cabeça foram apresentados. Eles permitiram identificar os níveis de radiação EM nos usuários passivos. Assim, a partir dos resultados apresentados pode-se compreender melhor o comportamento da distribuição do campo elétrico, ou SAR, em regiões próximas aos usuários passivos e avaliar os possíveis efeitos à saúde pública.

A investigação dos níveis de campo EM na região de estudo possibilitou averiguar a existência da superposição dos campos elétricos produzidos pelas duas fontes. A superposição dos campos forneceu pontos com valores de SAR abaixo do fornecido por uma única fonte, bem como valores acima. Ainda que seja possível estimar uma distância segura entre usuários passivo e ativos ela não é definitiva uma vez que o ambiente contribui para a alteração destes possíveis pontos seguros. O modelo apresentado ainda se caracteriza como caso particular uma vez que apenas duas fontes foram consideradas. Uma abordagem mais ampla envolvendo diversas fontes, modelos mais complexos da cabeça e algoritmos de otimização, em andamento, deve evidenciar novas situações de risco e, consequentemente, restrições do número de usuários ativos próximos a usuários passivos de aparelhos celulares.

Por fim, os níveis de SAR calculados no usuário passivo, para o modelo utilizado considerando apenas duas fontes de campo, não ultrapassaram os limites de exposição das normas vigentes. Porém, deve-se destacar que níveis mais altos podem ser atingidos com um número maior de fontes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro à pesquisa, e ao LEMA-UFMG.

Referências

Beard BB, Kainz W, Onishi T, Iyama T, Watanabe S, Fujiwara O, Jianqing W, Bit-Babik G, Faraone A, Wiart J, Christ A, Kuster N, Ae-Kyoung L, Kroeze H, Siegbahn M, Keshvari J, Abrishamkar H, Simon W, Manteuffel D, Nikoloski N. Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2006; 48(2):397-407. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2006.873870>

Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. Informações e Consultas. Anatel; 2009. [citado 2009 Dez 21]. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalInternet.doc>

Cocherova E, Surda J, Ondracek O, Stofanik V. RF field orientation influence on the specific absorption rate in a biological object. In: *Microwave Techniques: Proceedings of the 14th Conference on Microwave Techniques*, 2008 April 23-24, Prague. IEEE; 2008. p. 1-3. <http://dx.doi.org/10.1109/COMITE.2008.4569938>

Costa CP, Fontgalland G. On the Electromagnetic Field behavior nearby coupled dielectrics spheres. In: *EHE: Proceedings of the 3th International Conference on Electromagnetic Fields, health and Environment*, 2009 Nov, São Paulo, Br. São Paulo: EPUSP; 2009.

Costa CP, Fontgalland G, Barbin SE. Near fields radiation superposition assessment in human nearby users of cellular phones. Beijing: APEMC; 2010.

Federal and Communications Commission – FCC. Tissue Dielectric Properties. [citado 2009 Jun 05]. Disponível em: <http://www.fcc.gov/fccbin/dielec.sh>

Fernández Rodriguez CE. Efeitos biológicos das radiações de rádio frequências de telefonia celular: simulação FDTD [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2001.

Hayt Junior WH, Buck JA. *Eletromagnetismo*. 6th ed. Rio de Janeiro: LTC; 2003. 339 p.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electrical, magnetic, and electromagnetic fields. *Health Physics*. 1998; 74(4).

IEEE. Recommended practice for determining the peak spatial-average Specific Absorption Rate (SAR) in the human head from wireless communications devices: Measurement techniques amendment 1: CAD file for human head model (SAM Phantom). 2003. IEEE Standard 1528.

Ismail NB, Jenu MZM. Modeling of electromagnetic wave penetration in a human head due to emissions from cellular phones. *Asia-Pacific Conference Electromagnetic*

Proceedings. 2007; 1(1). <http://dx.doi.org/10.1109/APACE.2007.4603971>

Monebhurrin V, Dale C, Bolomey J-C, Wiart J. A numerical approach for the determination of the tissue equivalent liquid used during SAR assessments. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002; 38(2):745-8. <http://dx.doi.org/10.1109/20.996193>

Monebhurrin V. Conservativeness of the SAM phantom for the SAR evaluation in the child's head. In: *COMPUMAG: Proceedings of the International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2009, Florianópolis, Brazil*. Florianópolis: UFSC; 2009.

Monebhurrin V, Gati A, Wong MF, Wiart J. SAR Calculations using realistic phone models: uncertainty due to positioning. In: *COMPUMAG: Proceedings of the International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2009, Florianópolis, Brazil*. Florianópolis: UFSC; 2009.

Pereira Filho ML, Costa MC, Cardoso JR. Evaluation of ELF magnetic field distribution. In: *EHE: Proceedings of*

the 3th International Conference on Electromagnetic Fields, health and Environment, 2009 Nov, São Paulo, Brasil. São Paulo: EPUSP; 2009.

Santos RIM. Estudo da interação de antenas de terminais móveis com o utilizador [dissertação]. Lisboa: Instituto Superior Técnico; 2008.

Sadiku MNO. *Elementos de eletromagnetismo*. reimpr. Porto Alegre: Bookman; 2006.

Salles AAA., Fernández C, Bonadiman M. Simulações da SAR na cabeça e antenas planares para telefones móveis. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*. 2003; 19(21):77-90.

Qi N, Zhang M, Wittig T, Prokop A. Application of CST time domain algorithm in the electromagnetic simulation standard of the SAR for mobile phone. In: *ICMMT 2008: Proceedings of the International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008 April 21-24, Nanjing*. IEEE; 2008. v. 4, p. 1717-20. <http://dx.doi.org/10.1109/ICMMT.2008.4540803>

Autores

Cláudio Pereira da Costa, Glauco Fontgalland

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados – LEMA, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, CEP 58429-140, Campina Grande, PB, Brasil