

3 Efeitos biológicos da radiação eletromagnética

A telefonia celular tem contribuído fortemente para a polêmica sobre os efeitos da radiação sobre a saúde da população, principalmente pela proliferação de suas antenas instaladas nas Estações Rádio-Base (ERB) espalhadas pelas cidades em diferentes locais e em vários países do mundo. Um efeito biológico pode ser caracterizado quando ocorre uma mudança que pode ser percebida em um sistema biológico, após a introdução de um determinado estímulo. As ondas eletromagnéticas quando interagem com o corpo humano, dependendo da frequência e da potência, podem produzir algum tipo de efeito biológico. Tal efeito, por si só, não significa necessariamente a existência de um perigo. Um efeito biológico se tornará um risco à segurança quando ocorrer uma falha na saúde da pessoa ou de seus descendentes.

A radiação das ondas eletromagnéticas é classificada em duas categorias: radiação ionizante e não-ionizante, conforme mostra o espectro eletromagnético da figura 23. No espectro, as frequências estão associadas aos seus respectivos comprimentos de ondas e com suas diversas aplicações.

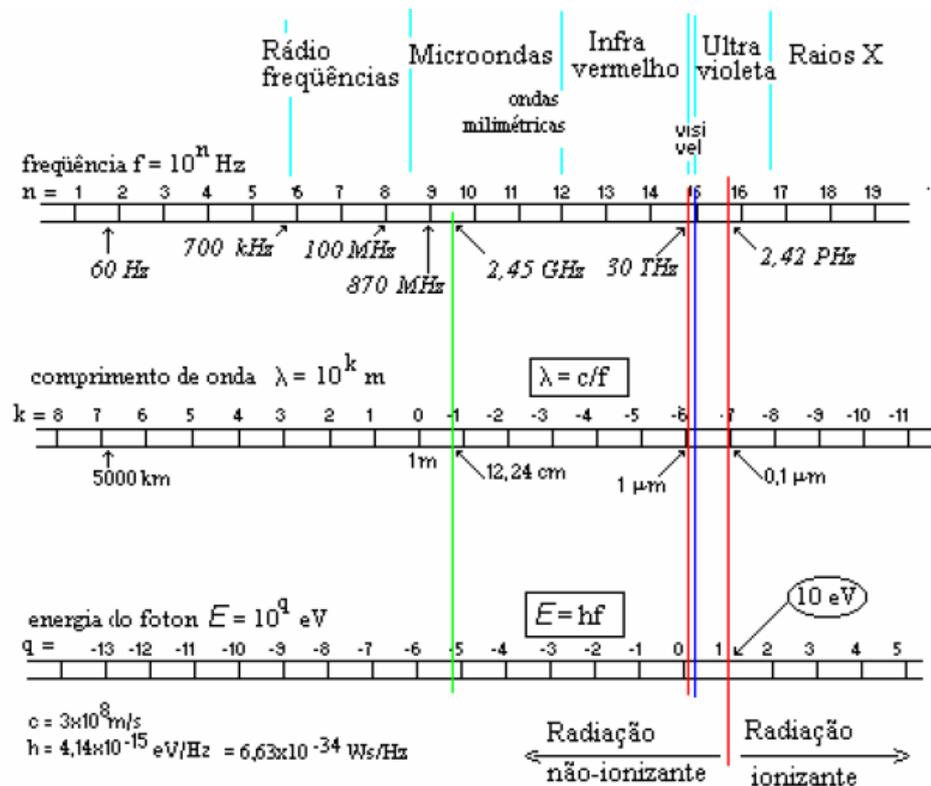


Figura 23 - Espectro eletromagnético e suas aplicações

A radiação ionizante corresponde a campos em frequências mais elevadas que as das emissões de luz, como por exemplo, os raios X e os raios gama, cujos comprimentos de ondas são micrométricos. Este tipo de radiação possui energia suficiente para quebrar ligações químicas por ionização. Desta forma o material genético das células pode ser danificado, levando a doenças como o câncer, por exemplo.

As células quando expostas à radiação sofrem ação de fenômenos físicos, químicos e biológicos. A radiação causa a ionização de átomos e moléculas, que poderão afetar células, que podem afetar os tecidos, que poderão afetar os órgãos e, portanto, poderão afetar todo o corpo.

Um organismo complexo como o corpo humano, constituído por cerca de 5 trilhões de células, quando exposto a radiações, sofre determinados efeitos somáticos, restritos ao próprio corpo e, também, efeitos genéticos que são transmissíveis às gerações seguintes.

Os fenômenos físicos responsáveis pelo compartilhamento da energia entre as células devido à irradiação são a Ionização e excitação dos átomos.

Os fenômenos químicos surgem em seguida e provocam a ruptura das ligações entre os átomos ou moléculas formando radicais livres num intervalo de tempo muito pequeno e, como consequência, surgem os fenômenos biológicos. Estes últimos alteram as funções específicas das células e são responsáveis pela diminuição da atividade da substância viva do organismo. Poderíamos especificar os músculos que perderiam algumas propriedades características como sendo as primeiras reações do organismo às radiações.

Os efeitos biológicos caracterizam-se, também, pelas variações morfológicas, que são alterações em certas funções essenciais da célula ou então a morte imediata da célula.

Nem todas as células vivas têm a mesma sensibilidade à radiação. As células que têm mais atividade são mais sensíveis, pois a divisão celular requer que o DNA seja corretamente reproduzido para que a nova célula possa sobreviver [20].

Em frequências mais baixas que as das emissões de luz, incluindo as faixas de microondas, os campos eletromagnéticos não possuem energia suficiente (10eV) para provocar a quebra das ligações químicas como no caso anterior e, portanto, esta irradiação é chamada de não-ionizante [14].

Na seção 3.1 será mostrado, respectivamente, o processo de interação das ondas eletromagnéticas com o corpo humano e na seção 3.2, outros tipos de efeitos.

3.1 Mecanismos de interação dos campos eletromagnéticos

A maioria dos efeitos biológicos conhecidos está associada aos efeitos térmicos como resultado da interação dos campos eletromagnéticos. Este processo de interação é mostrado na figura 24.

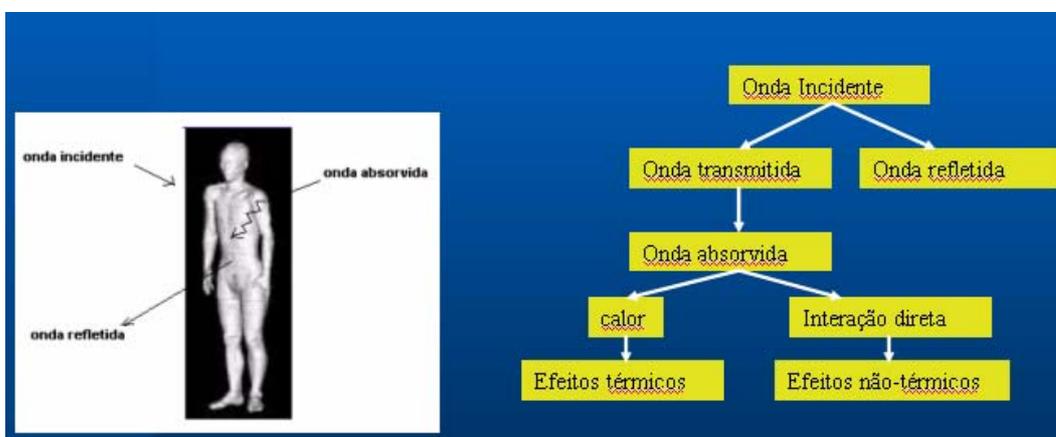


Figura 24 - Processo de interação das ondas eletromagnéticas com o corpo humano

Os efeitos térmicos são aqueles cujas alterações são causadas pelo aquecimento do organismo como consequência da absorção de parte da onda incidente. Os efeitos não-térmicos são devidos à interação direta do campo eletromagnético com o organismo [15].

A tabela 4 relaciona a frequência e os principais efeitos biológicos em função da penetração das ondas eletromagnéticas no tecido humano [27].

FREQÜÊNCIA (MHz)	COMPRIMENTO DE ONDA (cm)	LOCAL DE MAIOR EFEITO	PRINCIPAL EFEITO BIOLÓGICO
> 10.000	<3	Pele	A superfície da pele age como refletor ou absorvente, com efeito, de aquecimento.
10.000	3	Pele	Aquecimento da pele com sensação de calor
10.000 a 3.000	3 a 10	Camadas superficiais a pele Lentes dos olhos	Lentes dos olhos e testículos são particularmente sensíveis
10.000 a 1.000	3 a 30	Lentes dos olhos	Formação de cataratas e danos aos testículos
1.200 a 150	25 a 200	Órgãos internos	Prejuízos aos órgãos internos por sobre-aquecimento
< 150	>200		O corpo é transparente

(Fonte: McRee, 1974).

Tabela 4 - Freqüências e os principais efeitos biológicos

A partir das características elétricas e geométricas do corpo irradiado e das condições de exposição, é possível, a princípio, calcular o campo resultante internamente e a taxa através da qual a energia é absorvida pelo tecido irradiado, (Taxa de Absorção Específica – SAR) [15] utilizando as expressões abaixo:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \quad [W/kg]$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon'' \quad [S/m]$$

$$Pa = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad [W/m^2]$$

Onde:

σ = condutividade da parte específica do tecido sob análise $[S/m]$

ρ = densidade de massa do tecido $[Kg/m^3]$

f = freqüência de operação [MHz]

ε'' = parte imaginária da permissividade complexa ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) $[F/m]$

Pa = potência por unidade de área $[W / m^2]$

E = amplitude do campo elétrico interno ao ponto de análise $[V/m]$

Particularmente em altas frequências (na faixa de microondas) a condutividade é alta, já que o corpo possui grande quantidade de água, que apresenta ressonância naquela faixa.

O aquecimento é resultado da absorção do campo eletromagnético em um meio dissipativo, onde parte da potência é refletida pela pele e parte penetra dissipando-se rapidamente com a profundidade [16]. A absorção acontece principalmente em função do movimento dos dipolos da água e de íons dissolvidos. A proporção de água é, portanto, um parâmetro importante quando se determinam as propriedades dielétricas do tecido. Valores de condutividade para partes específicas do corpo (σ) e de densidades (ρ) são dados para diferentes partes do corpo e para diferentes frequências [17, 18].

A taxa com que o corpo humano absorve energia eletromagnética varia com a frequência e é baixa na faixa dos celulares. Entretanto, a resposta térmica do corpo humano depende de alguns fatores tais como:

- ✓ Taxa de absorção específica (SAR), definida como sendo a taxa de absorção de energia por unidade de massa do objeto exposto. É uma medida de energia absorvida que pode ou não ser dissipada em forma de calor [19];
- ✓ Cobertura do corpo (roupas);
- ✓ Sistema termo-regulatório;
- ✓ Condição fisiológica;
- ✓ Meio ambiente;
- ✓ Da parte específica do corpo e da vascularização nesta região, em se tratando apenas de radiação.

Em situações normais, os vasos sanguíneos se dilatam e o aquecimento é reduzido e /ou removido pela corrente sanguínea. Desta forma o principal risco de dano térmico se concentra nas áreas de baixa vascularização, como por exemplo, os olhos e a têmpora [15]. Os olhos são considerados órgãos bastante críticos com relação ao efeito das radiações não-ionizantes, sendo bastante suscetíveis ao

efeito térmico. Quantidades relativamente pequenas de energia eletromagnética podem elevar a temperatura das lentes oculares, pelo fato destas não possuírem sistema vascular adequado para as trocas térmicas, o que reduz sua capacidade de dissipação de calor. Por isso, a possibilidade de danos aos olhos constitui um aspecto muito sério das radiações de microondas e radiofrequência. O cristalino (lente interna do olho) está sujeito a alterações provocadas por radiações eletromagnéticas, pois apresenta algumas características que o tornam particularmente sensível a esse tipo de energia, tais como:

- ✓ Posição superficial em relação ao corpo;
- ✓ Estar envolvido por meio aquoso;
- ✓ Reduzida vascularização;
- ✓ Suas células germinárias estarem situadas na região mais equatorial e superficial.

O prejuízo de um tecido é, portanto, mais provável em áreas onde ocorra proporcionalmente um maior aumento de temperatura. Essa elevação térmica do cristalino pode levar à sua opacificação, conhecida como catarata.

Efeito como este é de particular interesse para os operadores e usuários de transceptores portáteis em que as antenas normalmente ficam próximas aos olhos [15]. Alguns pesquisadores médicos concordam que a catarata poderia surgir em função de algum aquecimento se uma taxa de absorção específica (SAR) de 100 W /kg fosse medida continuamente por um período mínimo de 100 minutos [14, 20].

Outros efeitos térmicos pesquisados e conhecidos, tais como queimaduras externas ou internas, exaustão e choque térmico ocorrem apenas sob exposições de alta intensidade [2].

Os usuários de telefones celulares são submetidos a uma SAR cujos valores estão abaixo do especificado pelas normas de segurança, seja quanto à irradiação emitida pelos aparelhos ou pelas Estações Rádio-Base (ERB). A irradiação emitida em ambos os casos tem provocado inúmeros questionamentos quanto aos possíveis efeitos sobre a saúde da população [12, 20]. Primeiro em relação aos efeitos locais da irradiação sobre a cabeça de um usuário com o seu terminal portátil em conversação e em seguida os efeitos sobre todo o corpo de qualquer

peessoa que esteja no raio de cobertura da ERB, principalmente na direção de irradiação do lóbulo principal da antena, conforme ilustrado na figura 25.

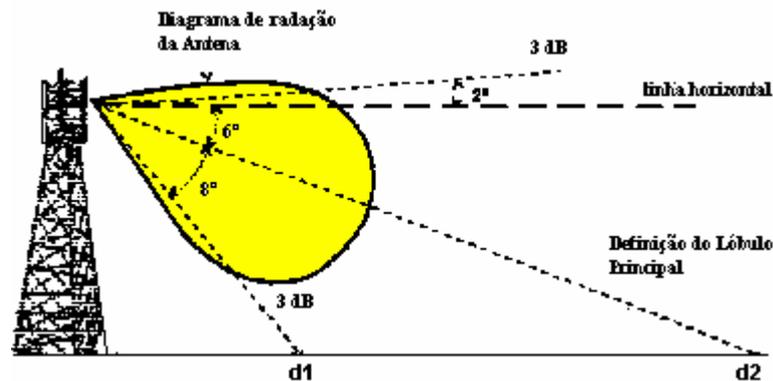


Figura 25 - Cobertura do feixe da antena de uma ERB

Está comprovado que, na grande maioria dos casos, a taxa de absorção para os usuários de celulares é bem maior que a taxa para as pessoas que se situam próximas às Estações Rádio-Base. Isto explica a existência de um número maior de estudos em relação aos usuários de telefones celulares. No capítulo 4 serão mostrados os limites de exposição à radiação a campos eletromagnéticos considerados seguros segundo as Normas nacionais e internacionais, tanto para exposição ocupacional quanto para a população em geral.

3.2 Efeitos não-térmicos

Além dos efeitos térmicos existem ainda outros efeitos que podem ser caracterizados como fisiológicos e comportamentais. Existe uma série de estudos, muitos deles controversos, que destacam o risco efetivo dos níveis de radiação emitidos pelos sistemas celulares.

O ponto central de tais pesquisas é de que à exposição às microondas, mesmo em baixas intensidades, resulta em distúrbios nervosos, dentre os quais podemos exemplificar as dores de cabeça, fadiga, tontura, perda de memória e insônia. Embora não haja evidências científicas relacionando estes efeitos com irradiações emitidas pelas ERBs, cujos níveis irradiados são muito baixos, não oferecendo risco à saúde humana. Entretanto, surgiram estudos que direcionam a dor de cabeça como sendo um efeito nos usuários de aparelhos celulares

indicando alguma evidência de mudança comportamental ou fisiológica ainda não confirmada cientificamente. Segundo Moulder existe a probabilidade, mesmo que pequena, de haver tais efeitos [12, 20] por não haver estudos com uma sólida base científica. Dentre eles podemos destacar:

- ✓ O aumento da pressão sanguínea;
- ✓ Alteração da atividade elétrica do cérebro;
- ✓ Pequenas mudanças no padrão de sono;
- ✓ Pequenas alterações em exames de eletroencefalogramas.

Recentemente um estudo feito por N. Edelstyn e A. Oldershaw [21] mostrou que pessoas melhoraram o desempenho em avaliações de capacidade de atenção quando submetidas à irradiação de 900MHz. De forma controversa, sob as mesmas condições, observou-se que com ratos o efeito foi o contrário, ou seja, ocorreu uma perda de memória a longo prazo e também uma redução no tempo de reação [22]. Segundo J. Gonzalez [23] não houve qualquer indicativo de efeito sobre esse processo na frequência em questão e com uma SAR variando de 1 a 3,5 W/kg por um período de exposição diário de 45 minutos sobre a cabeça dos mesmos .

Já o pesquisador norte-americano W. Ross Adley tem dedicado os seus estudos há mais de 20 anos para a relação entre os efeitos da modulação e os efeitos biológicos. Em uma de suas pesquisas ele verificou que a irradiação modulada em amplitude (AM) nas faixas de frequências de 150 e 450 MHz poderia produzir mudanças na percepção de cálcio em células do sistema nervoso. Trabalhos posteriores de outros autores refutaram tais conclusões [16].

O biofísico G.J. Hyland é um especialista no mecanismo de interação da radiação não-ionizante com organismos vivos e um severo crítico às diretrizes de segurança adotadas mundialmente quanto aos níveis recomendados, que ele considera altos demais, e também quanto à filosofia de desenvolvimento daquelas diretrizes, que são baseadas principalmente nos efeitos térmicos e na premissa de que os efeitos não-térmicos, já reportados, ainda carecem de (fundamentação científica). É defensor, ainda, da teoria de que a modulação seria por si só responsável por alguns efeitos fisiológicos e comportamentais [24] podendo ocasionar danos ao funcionamento dos sistemas nervoso e imunológico de organismos vivos. Suas considerações sobre tais efeitos de modulação

empregadas nos celulares têm sido mencionadas no Brasil como uma das evidências em termos de perigo em relação às ERBs.

Entretanto H. Lai que é defensor, já há algum tempo, da importância dos efeitos não-térmicos em suas pesquisas com ratos e células mostra uma relação entre estes efeitos e o sistema nervoso, quando exposto a radiofrequência nos níveis limites das diretrizes de segurança. Tais efeitos são contestados por outros especialistas [20, 25].

Recentemente, em outro estudo [26], os especialistas tentaram associar os efeitos da radiação aos filamentos de platina dos materiais utilizados em implantes intracraniais para tratamento de aneurisma. Para reproduzir o ambiente eles utilizaram um filamento de tungstênio e outro de platina. Ambos foram expostos às ondas eletromagnéticas emitidas na frequência de 900MHz por um período de 99 horas para tentar reproduzir a exposição real de uma pessoa usando um telefone celular com tecnologia GSM regularmente, por meses. Após observações e medidas, concluiu-se que o filamento de platina não sofreu qualquer dano sendo, portanto, mais adequado aos implantes deste tipo.

Um outro efeito bastante discutido é o efeito da radiação nos testículos, já que estes também constituem órgãos críticos no que concerne aos efeitos das radiações eletromagnéticas. Isso porque são extremamente sensíveis a elevações de temperatura. Estão mais sujeitos à radiação por dois motivos:

- ✓ Localização superficial em relação ao corpo e;
- ✓ Grande sensibilidade ao calor por parte das células germinativas que se encontram numa faixa de temperatura inferior à temperatura corporal (aproximadamente 33°C) e apresentam uma velocidade de redução celular, já em temperaturas de 37°C.

Pesquisas com cães, coelhos e ratos, para determinar o limiar para o início de efeitos prejudiciais, mostraram que, a 10 mW/cm² de densidade de potência, os efeitos patológicos nos testículos incluem degeneração do epitélio que reveste os tubos seminíferos e uma acentuada redução da maturação de espermátócitos. Essa redução da função testicular é devida ao aquecimento, e parece ser temporária e provavelmente reversível [27].