

Radiações de microondas e radiofrequência

Efeitos biológicos

Claudia Condé Lamparelli¹
Antonio Alessio Filho²
Jesus Gonzalez Hernandez²

RESUMO A expansão do uso de ondas eletromagnéticas com diversas finalidades incrementa consideravelmente as fontes das radiações de microondas e radiofrequência no ambiente. Resulta daí a preocupação com possíveis efeitos biológicos causados por esse tipo de energia irradiante. Pesquisas mostram que esses efeitos podem ser térmicos e não-térmicos, induzindo alterações estruturais e funcionais em seres vivos. Os efeitos térmicos são responsáveis pela maior parte dessas alterações. Entre os efeitos biológicos estudados, os principais são aqueles produzidos nos olhos, nos testículos e os de ordem neurológica. Tornou-se, portanto, necessário o estabelecimento de padrões de segurança para a proteção à saúde, prevenindo efeitos prejudiciais.

Palavras-chave: efeitos biológicos, radiações não-ionizantes, microondas, radiofrequência, poluição eletromagnética, saúde ambiental.

ABSTRACT The expansion of electromagnetic waves utilization for many applications has increased the number of microwaves and radiofrequency sources in the environment. It gave rise to interest on biological effects generated by exposure to this kind of energy. Such effects are usually designated as thermal or non-thermal in nature and are reported to be able to induce structural and functional alterations in living organisms. The thermal ones are responsible for mostly of them. The main effects reported are those induced in eyes, testicles and in the nervous system. Therefore, there is a need to set protection standards to prevent injurious health effects.

Key words: biological effects, non-ionizing radiation, microwaves, radiofrequency, electromagnetic pollution, environmental health.

INTRODUÇÃO

As radiações eletromagnéticas ocorrem naturalmente, mas em intensidades muito baixas quando comparadas às radiações artificiais. O marcante desenvolvimento e a proliferação, nas últimas décadas, de aparelhos eletrônicos de uso industrial, militar, doméstico, ou para aplicações médicas, que emitem uma grande variedade de energia irradiante não-ionizante, aumentaram consideravelmente as fontes artificiais de radiações eletromagnéticas (Michaelson, 1972). Essas fontes podem ser de dois tipos: emissoras intencionais e não-intencionais (ou de radiação incidental). As emissoras intencionais típicas incluem as antenas transmissoras de rádio e televisão, instalações de radar e sistemas de telecomunicações. As fontes não-intencionais incluem os equipamentos elétricos e eletrônicos de uso industrial ou comercial, que podem de alguma maneira irradiar algum tipo de onda eletromagnética.

De acordo com McRee (1974), a possibilidade de exposição de um grande segmento da população a uma complexa radiação de multifrequência no ambiente é atualmente uma realidade. Incluem-se aqui as radiações de radiofrequência numa faixa de 300 KHz a 300 MHz e as microondas de 300 MHz até 300 GHz.

Lerner (1980), no entanto, afirma que até o momento apenas um setor relativamente pequeno da po-

¹ Bióloga da CETESB.

² Físicos da CETESB.

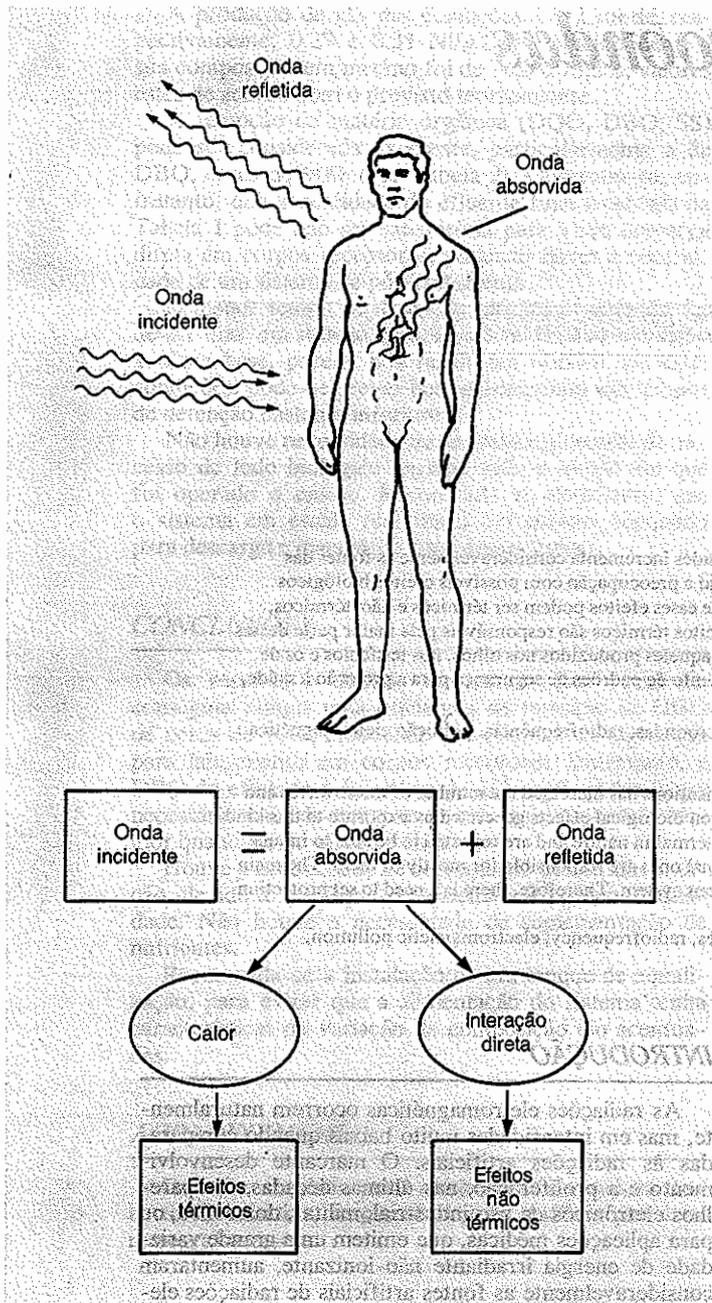


Figura 1 - Interação da energia radiante e material biológico.

Tabela 1 - Relação entre a frequência e os efeitos biológicos em função da penetração no tecido.

| Frequência (MHz) | λ (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 3.300 | 3 a 10 | Camadas superficiais da pele Lentes dos olhos | Lentes dos olhos e testículos são particularmente sensíveis |
| 10.000 a 1.000 | 3 a 30 | Lentes dos olhos | λ crítico para a formação de cataratas e danos aos testículos |
| 1.200 a 150 | 25 a 200 | Órgãos internos | Prejuízo aos órgãos internos por sobreaquecimento |
| < 150 | > 200 | | O corpo é transparente |

(Fonte: McRee, 1974).

pulação, constituído por pessoas que moram na vizinhança imediata de estações comerciais de transmissão e de poderosas instalações de radar (aeroportos), e certos grupos ocupacionais recebem uma exposição significativa. Portanto, a maioria da população não está exposta a esse tipo de radiação em níveis preocupantes, mesmo considerando-se os padrões de segurança soviéticos, que são mais rigorosos que os americanos.

De qualquer forma, juntamente com o aumento da utilização das ondas eletromagnéticas, surge também a preocupação com relação aos efeitos biológicos que possam ser causados por tal tipo de energia. A pesquisa dos efeitos biológicos das radiações não-ionizantes tem revelado que tais radiações podem produzir alterações estruturais e funcionais nos organismos irradiados, e que essas alterações são devidas não apenas ao aquecimento, mas também a uma interação direta da energia com o sistema biológico.

INTERAÇÃO

Propagando-se através de um meio biológico, as ondas eletromagnéticas interagem com ele, ocorrendo uma transferência de energia. Nas radiações de microondas e radiofrequência, a principal troca de energia ocorre entre o campo elétrico e as moléculas polares de água. Consequentemente, tecidos, como músculos e pele (com alto conteúdo de água), absorvem relativamente maior quantidade de energia do que o tecido adiposo ou osso, de baixo conteúdo de água (Michaelson, 1971).

A energia da radiação absorvida pelo material biológico transforma-se em energia cinética das moléculas, produzindo o seu aquecimento (Figura 1). O aumento de temperatura pode ser difuso ou limitar-se a um determinado sítio anatómico específico.

A consequência da distribuição e absorção não uniformes do campo é a produção de focos de calor no interior do material biológico. A existência desses focos, particularmente nas regiões com mecanismos menos eficientes de transferência de calor, pode levar a alterações específicas do tecido, mesmo que a temperatura do corpo, como um todo, não cresça significativamente.

A absorção e a reflexão de um campo eletromagnético por um corpo dependem de suas dimensões e do comprimento de onda da radiação (Cleary, 1977). Com relação a este último, sabe-se que, para uma mesma densidade de potência, quanto maior o comprimento de onda da radiação incidente, maior sua profundidade de penetração no tecido biológico (Lara Duca, 1984) (Tabela 1).

Portanto, 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.

Durante os últimos anos, foi desenvolvido o conceito de taxa de absorção específica (SAR – Specific Absorption Rate) para quantificar efeitos das radiações de microondas e radiofrequências. A SAR é definida como a taxa de absorção de energia por unidade de massa do objeto exposto, e é a medida da energia absorvida, que pode ou não ser dissipada em forma de calor (Michaelson, 1982). Esse mesmo autor afirma que a irradiação de sistemas biológicos por microondas e radiofrequência acarreta uma elevação de temperatura, quando a taxa de energia absorvida excede a taxa de dissipação da energia.

Concluindo, a interação da onda eletromagnética com o sistema biológico depende das características de ambos, principalmente do comprimento de onda e da intensidade do campo e das constantes elétricas do tecido que determinam o grau de absorção e a profundidade de penetração. O resultado dessa interação pode ser um aumento de temperatura generalizado ou localizado, em função da distribuição não-uniforme da energia eletromagnética nos sistemas biológicos.

EFITOS BIOLÓGICOS

A pesquisa dos efeitos biológicos das radiações não-ionizantes tem revelado que órgãos e sistemas orgânicos afetados por microondas e radiofrequência são suscetíveis de distúrbios funcionais ou alterações estruturais. Algumas reações a microondas ou radiofrequência podem levar a efeitos biológicos mensuráveis, os quais permanecem dentro das compensações fisiológicas normais, pois um efeito não constitui necessariamente um prejuízo. Outras reações, no entanto, podem produzir efeitos que sejam de fato prejuízos reais ou potenciais (Michaelson, 1982).

Conforme já descrito, a maior parte da energia da radiação de microondas ou radiofrequência absorvida por um sistema biológico se converte em calor, causando interferência no funcionamento do sistema vivo. Contudo, nem todos os efeitos das radiações de microondas e radiofrequência podem ser explicados pelos mecanismos biofísicos de absorção de energia e conversão em calor. Já foi demonstrado, tanto teórica quanto experimentalmente, que outros tipos de conversão de energia são possíveis (WHO, 1981).

Os efeitos biológicos causados pela exposição a radiações eletromagnéticas são usualmente designados como térmicos e não-térmicos. Os efeitos térmicos são aqueles cujas alterações são causadas pelo aquecimento do organismo e podem ser obtidos usando-se técnicas convencionais de aquecimento. Os efeitos não-térmicos são os devidos à interação direta do campo eletromagnético da radiação com o organismo (Figura 1).

De acordo com as evidências disponíveis, o efeito mais significativo da absorção de radiação eletromagnética é a conversão de energia absorvida em calor (Michaelson, 1971).

Prejuízos resultantes de exposições a altos níveis de radiação foram estudados em animais, notando-se variações de lesões locais e necrose, até intensos estresses

por hipertermia.

Além disso, lesões foram encontradas nos órgãos internos de animais expostos por prolongados períodos de tempo, durante os quais não se constatou nenhum aumento significativo da temperatura corporal nem foram observados sinais de desconforto (WHO, 1981).

Atualmente há evidências comprovadas de efeitos biológicos causados por campos eletromagnéticos, de intensidade suficientemente baixa que não justificam um possível aumento significativo de temperatura (Senise, 1983).

Os efeitos não-térmicos ou específicos são mais difíceis de serem detectados que os térmicos. Essa dificuldade se deve à natureza da resposta do organismo e à falta de explicações sobre o mecanismo causador do efeito. Os efeitos desse tipo mais frequentemente relatados são de ordem neurológica. Em animais, incluem mudanças nos reflexos condicionados, alterações da sensibilidade à luz, som e estímulo olfativo, alterações nas biocorrentes do córtex cerebral e mudanças de comportamento. Muitos sintomas subjetivos foram descritos em trabalhadores que lidam com equipamentos de microondas, por pesquisadores da União Soviética e Europa do Leste.

Uma revisão crítica da literatura sobre os efeitos biológicos da radiação de microondas revela de imediato as limitações e a inadequação de muitos trabalhos. Em muitos casos, isso é devido à grande dificuldade de se realizar experimentos quantitativos nessa área de estudo (McRae, 1974).

Michaelson (1982) ressalta que a maioria das informações sobre efeitos na saúde se restringe à faixa de microondas e que, mesmo assim, a compreensão dos efeitos biológicos ainda não está completa. No que se refere à radiação de radiofrequência, o conhecimento a respeito dos efeitos biológicos e suas implicações na saúde são muito limitados.

Analisando os trabalhos citados na bibliografia sobre o assunto, foi possível dividir os efeitos biológicos das radiações eletromagnéticas não-ionizantes em dois grupos. O primeiro, formado por aqueles apresentados em praticamente todos os artigos e que, em vista disso, foram considerados como principais: os efeitos nos olhos, nos testículos e os neurológicos. O segundo, o grupo constituído por outros efeitos biológicos sobre os quais ainda não se tem informações muito precisas, sendo estes os efeitos genéticos, hematopoéticos, neuroendócrinos e cardiovasculares.

Efeitos Oculares

O olho é considerado um dos órgãos críticos, com relação ao efeito das radiações não-ionizantes, sendo bastante suscetível 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 muito sujeito a alterações provocadas por radiações eletromagnéticas, pois apresenta algumas características que o tornam particularmente sensível a esse tipo de energia: posição superficial em relação ao corpo; está envolvido por

meio aquoso; reduzida vascularização; e suas células germinativas estão 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.

Cataratas foram produzidas em experimentos com animais. Vários pesquisadores, usando olho de coelho (pela sua grande semelhança com o olho humano), tentaram estabelecer um limite de exposição para o início da catarata e concluíram que esse tempo é função da frequência da radiação. Também foram relatados diversos casos de catarata no homem que se seguiram a exposições acidentais (Lerner, 1980). Cataratas podem ser produzidas por repetidas exposições a níveis de densidade de potência inferiores ao limite. Para que esse efeito cumulativo ocorra, os níveis devem ser suficientes para produzir um pequeno grau de dano que não seja reparado antes que outra exposição aconteça. Entretanto, se o tempo entre as exposições for suficientemente longo para que o reparo ocorra, o dano cumulativo não é observado. Acima de 500 MHz a opacificação dos olhos pode ser produzida quando a densidade de potência exceder 150 mW/m, isso se a duração da exposição for suficientemente longa (WHO, 1981).

A maioria dos pesquisadores concorda que existe uma temperatura ocular crítica que precisa ser atingida para que a opacificação se desenvolva. Muitos trabalhos mostram que o limite para a produção de cataratas é de 1 kW/m² para 100 min e os dados sugerem que a temperatura intra-ocular deve chegar a pelo menos 43°C para que o processo seja induzido (Michaelson, 1982).

Efeitos nos Testículos

Os testículos 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. Estas situam-se numa faixa de temperatura inferior à temperatura corporal ($\pm 33^{\circ}\text{C}$) e apresentam uma velocidade de redução celular, já em temperaturas de 37°C. O aumento da temperatura ocasiona também uma diminuição das células intersticiais, podendo levar à esterilidade (Romero, 1980).

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 espermatozoides. Essa redução da função testicular é devida ao aquecimento, e parece ser temporária e provavelmente reversível (McRee, 1974).

O efeito das microondas nos testículos foi amplamente estudado. A exposição da área escrotal a densidades de potência maiores que 500 W/cm² resulta em vários graus de dano. Embora esses estudos indiquem que altas densidades de potência possam afetar os testículos, sendo as respostas relacionadas com o aquecimento dos órgãos, existem relatos de que as exposições crônicas de baixa densidade de potência podem resultar num enfraquecimento da espermatogênese e da função reprodutiva, sem aumento de temperatura mensurável

nos testículos (Michaelson, 1982).

Em resumo, exposições a microondas em densidades de potência que causam um aumento de temperatura resultam em lesões testiculares e afetam particularmente a espermatogênese, em experimentos com animais. Há indícios de que as lesões sejam facilmente reversíveis, se não ocorrer necrose.

Numa revisão sobre o assunto, conclui-se que efeitos mais sérios não são esperados em densidades de potência abaixo de 10 mW/cm². Embora se trate de órgãos particularmente sensíveis ao estresse térmico, os efeitos não atribuíveis ao aquecimento não podem ser descartados (WHO, 1981).

Efeitos Neurológicos

Os efeitos da radiação de microondas no sistema nervoso central constituem um dos pontos mais controvertidos nesse campo de bioefeitos. A base original da preocupação com a exposição de seres humanos a baixas intensidades de radiação deriva de pesquisas epidemiológicas realizadas com trabalhadores sujeitos a exposição ocupacional na União Soviética e em países do Leste europeu. Essas investigações sugerem vários tipos de alterações reversíveis do sistema nervoso central. A asserção básica dessas pesquisas é de que a exposição à microonda, mesmo em baixas densidades de potência, resulta em distúrbios nervosos. Queixas subjetivas, como dor de cabeça, fadiga, fraqueza, tontura e insônia foram relatadas. Em experimentos com pequenos animais, exposições crônicas e repetidas em densidades de potência de 10 mW/cm², ou menos, levaram a distúrbios nos reflexos condicionados e alterações comportamentais (WHO, 1981).

Resultados de estudos recentes sobre os efeitos da radiação de microondas no sistema nervoso central de mamíferos podem ser resumidos como indicativos de que os campos de baixa intensidade podem induzir mudanças detectáveis. A possibilidade de que as microondas interajam com o sistema nervoso central, sem aquecimento significativo, foi sugerida por vários pesquisadores soviéticos.

A falta de compreensão da relação entre efeitos térmicos provocados por baixas intensidades, no sistema nervoso de mamíferos, e as respostas fisiológicas e psicológicas torna difícil determinar verdadeiramente até onde os efeitos das microondas e da radiação de radiofrequência são causados por perturbações térmicas.

PADRÕES DE SEGURANÇA

Em função do crescente número de fontes de energia eletromagnética não-ionizante no ambiente, tornou-se necessária a determinação de um nível de exposição seguro para a população em geral, no sentido de prevenir qualquer ocorrência de efeitos prejudiciais, sem contudo restringir excessivamente os usos benéficos dessa radiação.

Para tanto, deve ser feita uma diferenciação entre o efeito em si e o dano propriamente dito. Isso porque um efeito é uma alteração que pode não representar um prejuízo, se o organismo for capaz de compensá-la mantendo seu equilíbrio e funcionamento normais, já que o dano prejudica de fato a atividade normal do corpo. Outro ponto importante dos fundamentos para o estabelecimento de padrões é a definição da população a

ser protegida. Padrões ocupacionais são feitos para proteger adultos saudáveis expostos sob condições controladas. Padrões para a população em geral devem ser baseados em considerações mais amplas, incluindo as diferentes faixas etárias presentes e os vários estados de saúde.

Como muitas dessas considerações envolvem interações não suficientemente exploradas, os padrões para a população devem envolver fatores de segurança adequados, considerando-se também a possibilidade de uma exposição de 24 horas, superior à ocupacional, que é de oito horas (WHO, 1981). Por isso, exposições do público em geral devem ser mantidas em níveis os mais baixos possíveis. E os limites devem ser inferiores aos destinados à exposição de caráter ocupacional.

Padrões de segurança devem ser baseados em evidências científicas. Um valor numérico para um padrão implica o conhecimento do efeito produzido num determinado nível de estresse, onde tanto o efeito quanto o estresse sejam mensuráveis. Nesse ponto, a obtenção de dados para o embasamento de um padrão adequado esbarra nas dificuldades de se realizar experimentos quantitativos nessa área de estudo (Michaelson, 1972). Poucos países estabeleceram padrões de proteção à saúde com relação a microondas e radiofrequência. Os primeiros limites para exposição contínua foram introduzidos nos anos 50 nos Estados Unidos e União Soviética. Os níveis máximos permissíveis permaneceram substancialmente os mesmos: respectivamente 100 W/m² e 0,1 W/m². A maioria dos países que desenvolveu padrões nacionais baseou-se num dos dois. Subsequentemente, entretanto, alguns países propuseram padrões intermediários (Michaelson, 1982).

A base de muitos padrões, como o dos Estados Unidos e o do Reino Unido, é a proteção contra os efeitos térmicos. Eles surgiram, portanto, baseados na concordância de que o efeito mais significativo das microondas era devido exclusivamente ao aquecimento dos tecidos, e eram fundamentados na capacidade de resfriamento do corpo. Nesse sentido, utilizou-se o conceito de taxa de absorção específica (SAR) para o seu estabelecimento.

A última revisão do padrão americano foi feita pelo ANSI - American National Standard Institute, que propôs, dessa vez, níveis diferentes, levando em consideração as diversas frequências (Tabela 2 e Figuras 2 e 3).

Até hoje existem diferenças entre os níveis de segurança aceitos nos EUA e nos países da Europa ocidental, e na União Soviética e países do Leste europeu. A princípio, a diferença existente entre os padrões era da ordem de 1.000, e isso era o resultado do uso de premissas distintas na determinação e interpretação dos efeitos biológicos.

Deve-se ressaltar que, em alguns países, os padrões de proteção com relação a microondas e radiofrequência foram recentemente alterados, e existe uma tendência a se adotar limites de exposição menos divergentes em comparação com aqueles propostos há duas décadas atrás. Considerações teóricas, estudos experimentais com animais e alguns poucos dados de exposição humana ocupacional constituem atualmente a base para o estabelecimento dos padrões de proteção à saúde.

Mais dados sobre a relação entre os efeitos biológicos e as radiações são necessários para que um padrão de segurança possa ser mais precisamente estabelecido.

Tabela 2 - Padrões para Proteção à Saúde em Função da Frequência (ANSI C95.1-1982)

| Faixa de Frequência (MHz) | E ² (V ² /m ²) | H ² (A ² /m ²) | Densidade de potência (mw/cm ²) |
|---------------------------|--|--|---|
| 0,3 - 3 | 400.000 | 2,5 | 100 |
| 3 - 30 | 4.000 (900/f ²) | 0,025 (900/f ²) | 900/f ² |
| 30 - 300 | 4.000 | 0,025 | 1 |
| 300 - 1.500 | 4.000 (f/300) | 0,025 (f/300) | f/300 |
| 1.500 - 100.000 | 20.000 | 0,125 | 5,0 |

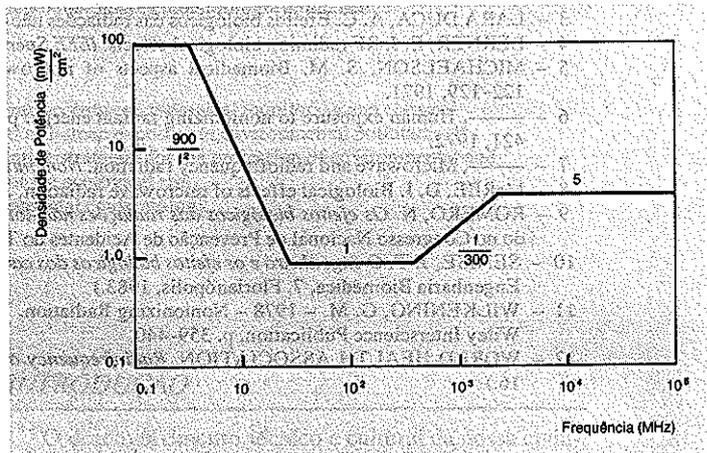


Figura 2 - Padrões americanos para proteção à saúde (ANSI C95.1 - 1982).

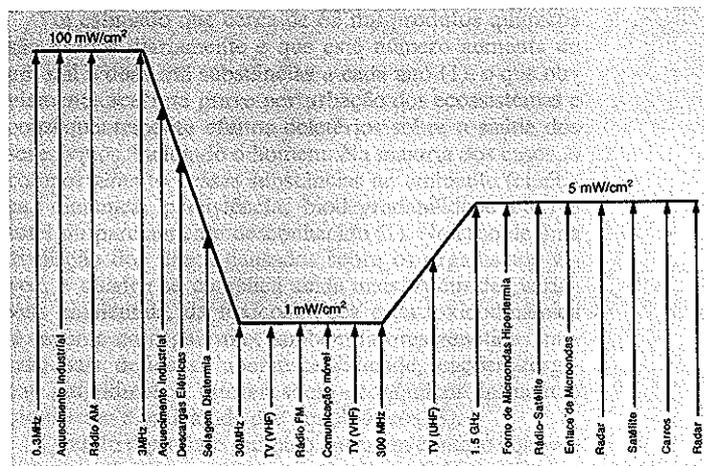


Figura 3 - Emissores típicos na faixa do espectro coberto pelos padrões ANSI.

CONCLUSÕES

Já foram comprovadas, experimentalmente, alterações em organismos vivos, induzidas pelas radiações de microondas e radiofrequência. O resultado da interação desse tipo de radiação e os sistemas biológicos depende principalmente das propriedades dos tecidos biológicos, da frequência e da densidade de potência da radiação e das condições de exposição.

A distribuição não-uniforme da energia irradiante no corpo também influi nos efeitos induzidos por ela. Os efeitos térmicos, provocados por um aumento de temperatura, são mais facilmente detectáveis e são responsáveis por grande parte dos efeitos biológicos descritos. Já existe a confirmação dos efeitos não-térmicos, e a possibilidade dessa interação direta ser a causa de muitas das alterações não pode ser descartada.

REFERÊNCIAS

- 1 - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *Safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic field, 300 KHz to 100 Gz*. ANSI, 1982. 26 p. (C 95-1).
- 2 - CLEARY, S. F. Biological effects of microwaves and radiofrequency radiation. CRC, 1977. In: *Critical Reviews in Environmental Control*, 121-43, jul. 1977.
- 3 - LARA DUCA, A. C. Efeitos biológicos das radiações não-ionizantes e medidas de proteção. *Engenharia* (446): 16-9, 1984.
- 4 - LERNER, E. J. RF radiation biological effects. *IEEE Spectrum*: 51-59, dez. 1980.
- 5 - MICHAELSON, S. M. Biomedical aspects of microwave radiation. *Journal of the Air-Pollution Control Association*, 24(2): 122-129, 1971.
- 6 - ———, Human exposure to nonionizing radiant energy: potential hazards and safety standards. *Proceedings of the IEEE* 60(4): 389-421, 1972.
- 7 - ———, Microwave and radiofrequency radiation. *Nonionizing radiation*, WHO, Copenhagen, 1982. 266 p. (Série Européia, 10).
- 8 - McREE, D. I. Biological effects of microwave radiation. *Journal Air Pollution Control Association*. 24(2): 122-129, 1974.
- 9 - ROMERO, N. *Os efeitos biológicos das radiações não-ionizantes e a portaria MTb nº 3214, de junho de 1978*. (Trabalho apresentado no Congresso Nacional de Prevenção de Acidentes do Trabalho, 17, 1980).
- 10 - SENISE, J. T. *O engenheiro e os efeitos biológicos dos campos eletromagnéticos*. (Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 7. Florianópolis, 1983.)
- 11 - WILKENING, G. M. - 1978 - Nonionizing Radiation. In: *Patty's industrial hygiene and toxicology: general principles*. New York, Wiley Interscience Publication, p. 359-440.
- 12 - WORLD HEALTH ASSOCIATION. *Radiofrequency and microwaves*. Genebra, 1981, 134 p. (Environmental Health Criteria, 16.)