

# Radiação de baixa frequência e possível influência nociva a sistemas biológicos

Low frequency radiation and possible harmful influence on biological systems

F.G.F. Rodrigues<sup>\*1</sup>, A. Brizola<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Física, Ouro Preto, MG, Brasil

Recebido em 18 de Outubro, 2018. Revisado em 19 de Dezembro, 2018. Aceito em 11 de Janeiro, 2019.

Neste trabalho apresenta-se um estudo teórico que mostra a influência de radiações de baixa frequência, principalmente as provenientes de dispositivos celulares ou Smartphones, e os possíveis danos associados a doenças que esse tipo de radiação pode causar. Indica-se o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio que a radiação não ionizante pode gerar a sistemas biológicos. Esse tipo de radiação pode ocasionar variação na bioatividade, podendo ser considerada um agente externo potencialmente nocivo às pessoas.

**Palavras-chave:** Radiação não ionizante, dispositivos celulares, bioatividade, espécies reativas de oxigênio, agente externo.

In this paper we present a theoretical study that shows the influence of low frequency radiation, mainly from mobile devices or Smartphones, and the possible damages associated with diseases caused by these kind of radiation. We indicate that the rise of reactive oxygen species, caused by non-ionizing radiation, can generate biological influence on the bioactivity. We argue that this type of radiation can, occasionally, be harmful and thus a potentially danger external agent.

**Keywords:** Non-ionizing radiation, cellular devices, bioactivity, reactive oxygen species, external agent.

## 1. Introdução

A necessidade de comunicação interpessoal é um dos fatores que define as sociedades humanas. Nesse contexto, nas últimas décadas tem-se observado o surgimento dos mais diversos tipos de dispositivos móveis de comunicação, um fator notório e determinante a facilitar a comunicação atual. Dispositivos celulares, ou Smartphones, são bens comumente usados por praticamente todas as pessoas, sendo um item importante na vida moderna.

Smartphones utilizam um tipo de frequência específica para o seu funcionamento, que se localiza em uma determinada região do espectro eletromagnético, podendo ser tratada e definida como radiação não ionizante (RNI) [1]. No Brasil existe uma resolução que trata dos limites à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos para esse tipo de radiação [2]. Os limites estabelecidos por tal resolução são especificados pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP-International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) [3], que define e quantifica a absorção específica de radiação por quantidade de tecido biológico, ou SAR (Specific Absorption Rate). Baseados nessa resolução, e analisando os dados fornecidos pelos fabricantes de modelos de celulares atuais, pode-se dizer que tais dispositivos estão em conformidade com os limites estabelecidos por tal resolução, ou seja, apa-

relhos em funcionamento no Brasil, que possuem o selo da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), respeitam os níveis de SAR estabelecidos. Considera-se que a SAR restringe-se a garantir um limite máximo com relação à variação térmica de um determinado composto ou tecido biológico sobre o qual incide RNI [3]. Do fato de uma RNI não possuir energia suficiente para ionizar a matéria, devido à baixa energia transportada [1] quando comparadas a altas energias [4]<sup>1</sup>, pode-se a princípio inferir que celulares são equipamentos seguros no seu uso por pessoas.

Porém, estudos sugerem que a RNI pode estar associada a alterações fisiológicas e metabólicas que ocorrem em sistemas biológicos [5–9]. Para compreender por qual motivo pode-se associar uma RNI a possíveis malefícios às pessoas, contextualizamos e evidenciamos os possíveis danos que a radiação de baixa frequência (RBF) pode causar.

Nesse artigo usamos modelos físicos e biológicos simples e, quando possível, uma abordagem por primeiros princípios. Essa estratégia tem como objetivos permitir uma fácil leitura e interpretação, proporcionando um texto informativo e didático, sem no entanto comprometer sua qualidade científica. Os resultados obtidos nos modelos considerados indicam uma relação simples entre a frequência de uma RNI e a bioatividade de um sistema

\*Endereço de correspondência: fernandonrufop@hotmail.com.

<sup>1</sup>ver capítulo 6 e 15 especificamente.

biológico. As conclusões obtidas no contexto da presente abordagem são os destaques desse trabalho.

## 2. Referencial teórico

### 2.1. Ondas

Uma onda é uma perturbação que é transmitida de uma região do espaço a outra, preservando sua velocidade de acordo com o meio em que se propaga, sem haver, no entanto, transporte de matéria. Na natureza existem dois modos nos quais as ondas podem oscilar: na direção longitudinal e na direção transversal. Dizemos que uma onda é longitudinal se ela se propaga no mesmo sentido da perturbação. Em uma onda transversal a direção de oscilação é diferente da direção de perturbação. Ondas sonoras e ondas eletromagnéticas são exemplos de ondas longitudinais e ondas transversais, respectivamente. Define-se a velocidade de propagação da onda por

$$V = \lambda \nu, \quad (1)$$

sendo  $V$  a velocidade da onda ( $m/s$ ),  $\nu$  a frequência ( $Hz$ ) e  $\lambda$  o comprimento de onda ( $m$ ) associado a ela.

Podemos generalizar uma equação que representa o deslocamento da onda por uma função  $y(x) = f(x, t)$ , que representa a posição da onda no ponto  $x$  em um determinado tempo  $t$ . Suponhamos que a cada instante de tempo  $t$  a onda se mova para a direita com uma velocidade  $v$ , conforme a figura 1. Então, para uma determinada posição  $x$  pode-se estabelecer a seguinte equação:

$$y(x) = f(x - vt). \quad (2)$$

A equação (2) é conhecida como a equação da onda (clássica) e descreve uma onda progressiva que se propaga com velocidade  $v$  para a direita [10].

Da equação (2) podemos inferir que uma variação temporal em  $x$  implica em uma variação em  $y$ .

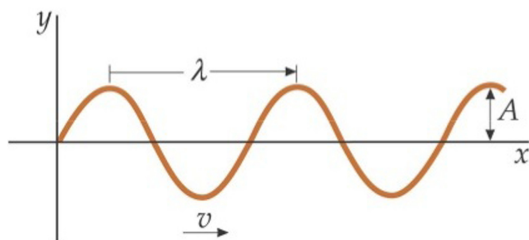
Extraindo primeiramente a velocidade com relação ao eixo  $y$ , temos [10]

$$\dot{y} = \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \left( \frac{\partial x'}{\partial t} \right) = -v \frac{\partial f}{\partial x'}, \quad (3)$$

sendo  $x' = x - vt$  e  $y(x) = f(x')$ .

Derivando novamente em relação a  $t$

$$\ddot{y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -v \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial f}{\partial x'} \right) \quad (4)$$



**Figura 1:** Velocidade, comprimento de onda e amplitude de uma onda - adaptado de [21].

$$\ddot{y} = \frac{\partial}{\partial x'} \left( \frac{\partial f}{\partial x'} \right) \frac{\partial x'}{\partial t} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}, \quad (5)$$

de onde pode-se obter a velocidade e aceleração para o deslocamento vertical que ocorre para a perturbação na equação (2).

Analisando de forma análoga o comportamento com relação ao eixo coordenado  $x$ , obtemos

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (6)$$

e

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}. \quad (7)$$

Agora comparando (5) e (7) chegamos à seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \frac{1}{v^2} - \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0. \quad (8)$$

Essa é uma equação que descreve a propagação (unidimensional) de qualquer tipo de onda (longitudinal ou transversal) em qualquer meio e de qualquer natureza ondulatória. A equação (8) é chamada equação geral da onda [10,11] e mostra a variação temporal da posição com relação ao deslocamento vertical, bem como a direção de propagação dessa onda (deslocamento horizontal).

### 2.2. Ondas eletromagnéticas

O eletromagnetismo clássico é descrito pelas chamadas equações de Maxwell. Essas equações no vácuo assumem a seguinte representação vetorial [11]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (12)$$

Nota-se que nas equações acima não há a presença de fontes (cargas e/ou correntes) e, portanto, tratam da propagação de campos livres, que não sofrem a interferência de tais fontes.

Ao aplicarmos o operador rotacional na equação (11) usando identidades e teoremas vetoriais, não explicitados por brevidade, obtemos a expressão

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Procedendo da mesma forma para a equação (12) chegamos a

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \quad (14)$$

Maxwell deduz que campos elétricos ( $\vec{E}$ ) e magnéticos ( $\vec{B}$ ) satisfazem a equação geral da onda (8), contanto que

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (15)$$

seja a velocidade de propagação da luz no vácuo  $c$ . Esse valor encontrado por Maxwell estava em conformidade com os resultados obtidos experimentalmente na época (observações astronômicas e o experimento da roda de Fizeu), ao passo que os valores de  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  eram conhecidos dos experimentos eletromagnéticos realizados por Kohlrausch e Weber [12].

Ondas eletromagnéticas se propagam transversalmente no espaço de acordo com a figura 2.

Pode-se demonstrar que o transporte de energia de uma onda eletromagnética é dado pelo vetor de Poynting  $\vec{S}$

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}), \quad (16)$$

sendo a energia transportada por campos eletromagnéticos dada pelo produto vetorial entre o campo elétrico e o campo magnético, ambos ortogonais entre si [11].

Portanto, o fenômeno de interação de ondas eletromagnéticas com a matéria, no que se refere ao transporte de energia, é realizado pelo vetor de Poynting.

Pode-se, dessa forma, definir um espectro das energias transportadas como sendo o conjunto de frequências possíveis para ondas eletromagnéticas (figura 3).

Ondas que se localizam a esquerda do espectro visível possuem baixa frequência (ou baixa energia), ondas que se localizam a direita do espectro visível possuem alta frequência (ou alta energia). A partir dessa diferenciação por regiões pode-se definir o conceito de radiação ionizante e não ionizante. Uma radiação ionizante (RI) é

capaz de ionizar a matéria (e.g., arrancar elétrons de um tecido biológico) pois possui energia superior à energia de ligação entre átomos e moléculas que constituem o meio [4, 13]. Já as RNI não possuem energia suficiente para que ocorra o processo de quebra de ligação entre átomos e moléculas [1]. No presente trabalho daremos enfoque a campos que possuem baixas frequências, ou seja, as RNI.

### 2.3. Mecanismos de absorção de energia e taxa de absorção específica

Ao incidir uma RBF sobre uma superfície, como por exemplo a pele humana, devido ao fato de transportar energia, a radiação exercerá sobre a superfície uma certa pressão, chamada pressão de radiação. De fato, essa pressão possui uma magnitude desprezível, pois não a percebemos sensorialmente em nosso corpo. No entanto pode-se afirmar que existe um processo de transferência de energia de origem eletromagnética para o tecido. Ao contrário do que ocorre com uma radiação ionizante, por exemplo a ultra-violeta, na qual percebe-se um aquecimento da pele podendo resultar em prejuízos instantâneos (vermelhidão, queimaduras) ou tardios (câncer de pele) [14], a RBF não possui essa potencialidade específica devido a sua baixa energia [1]. Sendo transportada por uma onda, essa quantidade de energia interagente da RNI obedecerá aos processos físicos de reflexão, absorção e transmissão (Figura 4).

De acordo com [15] a SAR é o parâmetro do qual são definidas as recomendações de segurança e que leva em consideração o aumento térmico de  $1^\circ\text{C}$  produzido pelo depósito de energia em qualquer unidade de massa de 1 g ou 10 g de tecido biológico. Assim a SAR é a quantidade de energia ( $dp$ ) transferida a uma determinada porção de massa ( $dm$ ), definida pela razão

$$SAR = \frac{dp}{dm}. \quad (17)$$

A unidade que representa a SAR é o W/kg. Os dados apresentados na tabela 1 mostram os limites estabelecidos para os valores de SAR a baixa frequência [2]. De acordo

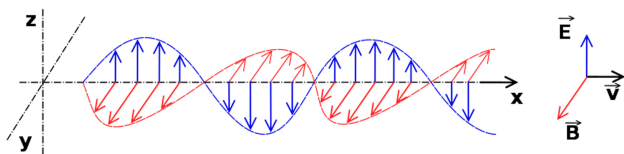


Figura 2: Propagação de uma onda eletromagnética - Adaptado de [22].

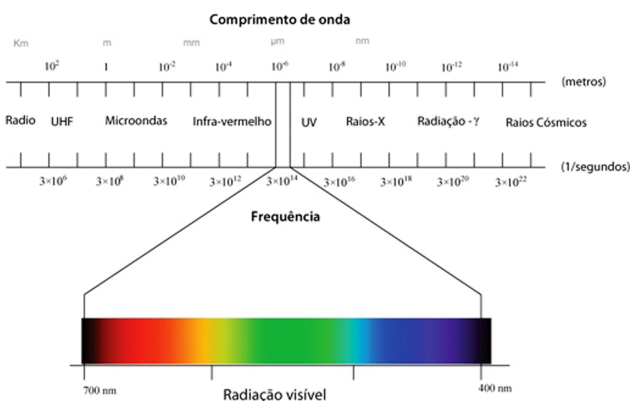


Figura 3: Espectro eletromagnético - Adaptado de [23].

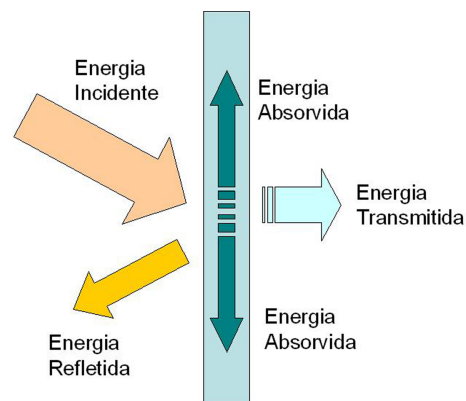


Figura 4: Processo de incidência, absorção e transmissão [24].

**Tabela 1:** Níveis de SAR permitidos - Adaptado de [2].

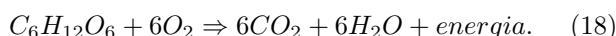
População em geral	cabeça e corpo(w/kg)	membros(w/kg)
10MHz-10GHz	2	4

com essa referência todos os valores de SAR devem ter sua média temporal avaliada ao longo de qualquer período de 6 (seis) minutos, devendo ser inferiores aos valores máximos de SAR estabelecidos na tabela 1.

Uma análise dos índices de SAR fornecidos por vários fabricantes de dispositivos móveis comercializados no Brasil mostram que os mesmos respeitam a resolução em vigor [2]. A SAR tem por finalidade informar aos usuário a magnitude da radiação absorvida, afim de alerta-los para um índice de segurança do aparelho. No entanto, a SAR quantifica apenas efeitos térmicos (aumento de temperatura do tecido), não considerando efeitos de biotividade que por ventura possam ocorrer. Destaca-se também que o tempo limitado de exposição (6 minutos), considerado para o cálculo da SAR, não ocorre em termos práticos, sendo usual um tempo de exposição maior.

### 3. Estresse oxidativo e consequência para as células

Para que reações químicas ocorram em uma célula é necessário que exista um determinado gasto de energia. Segundo a primeira lei da Termodinâmica, os fenômenos físicos ocorrem de forma a manter constante o balanço energético de um meio. Então, para manter suas atividades, sintetizar componentes e promover transportes iônicos, as células realizam trabalho, ou seja, gastam energia. De acordo com [16], organismos celulares obtêm energia do meio de duas formas: (1) absorvendo combustíveis químicos (como glicose) do seu meio e extraindo energia pela oxidação desses combustíveis ou, (2) absorvendo energia da luz solar (fotossíntese, realizada por plantas). O processo de obtenção de energia através da quebra da molécula de glicose é mostrado abaixo [16]:



A obtenção de energia por uma célula baseia-se no transporte ou fluxo de elétrons dado pela reação química (18). Nesse caso a glicose sofre oxidação (processo de perda de elétrons) e o oxigênio é reduzido (processo de ganho de elétrons). Juntos, formam o que chamamos de oxirredução.

Células não formam um sistema isolado, mantendo-se em constante interação com o seu meio, seja na forma de troca de matéria ou de energia. No processo bioquímico de obtenção de energia pelas células o balanço energético é definido pela energia livre de Gibbs [16]. Ela correlaciona a temperatura  $T$  à variação de entalpia  $\Delta H$  (que expressa a energia de ligação entre os componentes químicos) e a variação de entropia  $\Delta S$ , que por sua vez quantifica o grau de desordem de um sistema (segunda lei da Termodinâmica). A energia livre de Gibbs é dada

pela expressão [16]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (19)$$

Se o  $\Delta G$  for negativo a reação química é dita exotérmica (libera calor para o meio); caso contrário é denominada de endotérmica (absorve calor). A segunda lei da Termodinâmica estabelece que a medida de variação de entropia para um sistema será sempre maior que zero ( $\Delta S > 0$ ). Ou seja, o grau de desordem de um sistema físico ou químico sempre tenderá a aumentar.

A nível celular, a organização produzida dentro das células, à medida que elas crescem e dividem, é mais do que compensada pela desordem gerada no meio. Ou seja, os organismos vivos preservam sua organização interna ao captarem a energia livre do meio, na forma de nutrientes ou luz solar, e devolverem a ele uma quantidade de energia igual, na forma de calor e entropia [16]. Em outras palavras, a entropia de um ser vivo pode diminuir, aumentar ou manter-se constante enquanto ocorre uma compensação de forma que a entropia do seu sistema biológico, como um todo, aumenta, preservando assim a segunda lei da Termodinâmica ( $\Delta S > 0$ ) [16].

#### 3.1. Fosforilação oxidativa

A fosforilação oxidativa é uma fase existente no metabolismo de respiração celular que se passa nas mitocôndrias. Por causa da energia liberada durante mecanismos de oxidação, que ocorrem em outras vias metabólicas (degradação de carboidratos, gorduras e aminoácidos), resulta desse processo a síntese de moléculas de ATP (trifosfato de adenosina), moléculas que armazenam energia [16].

O processo, basicamente, resume-se ao fluxo de elétrons que ocorre nas mitocôndrias. Esse processo faz uso de um composto transportador denominado de NAD (dinucleotídeo de nicotinamida e adenina), que participa intimamente no processo de oxirredução ocorrido na membrana mitocondrial. O processo resulta em  $NAD^+$  (oxidado) e NADH (reduzido), esse último é o responsável pelo transporte de elétrons das reações catabólicas até seu ponto de entrada na cadeia respiratória [16].

De forma sintetizada podemos enunciar, a partir da figura 5, o processo de oxirredução como se segue: na fase (1), uma molécula sofre a redução (doadora de elétrons) e outra recebe esses elétrons doados ( $O_2$ , dioxigênio); em (2), a energia envolvida no processo de oxirredução é utilizada para transportar íons  $H^+$  para o ambiente de menor concentração (meio externo); em (3), o fluxo, que ocorre entre o interior e o exterior das membranas devido ao surgimento de uma diferença de concentração iônica, irá fornecer energia necessária para que ocorra a síntese de ATP; em (4), a energia gerada no processo de bombeamento de íons  $H^+$  é usada pela ATP - sintase e, estando presentes no meio ADP (adenosina difosfato) e o fosfato (P), promovem a síntese de ATP.

A cadeia transportadora de elétrons é de suma importância para o funcionamento e manutenção do sistema celular. A vantagem dos organismos em realizar a fosforilação oxidativa na respiração celular está na quantidade

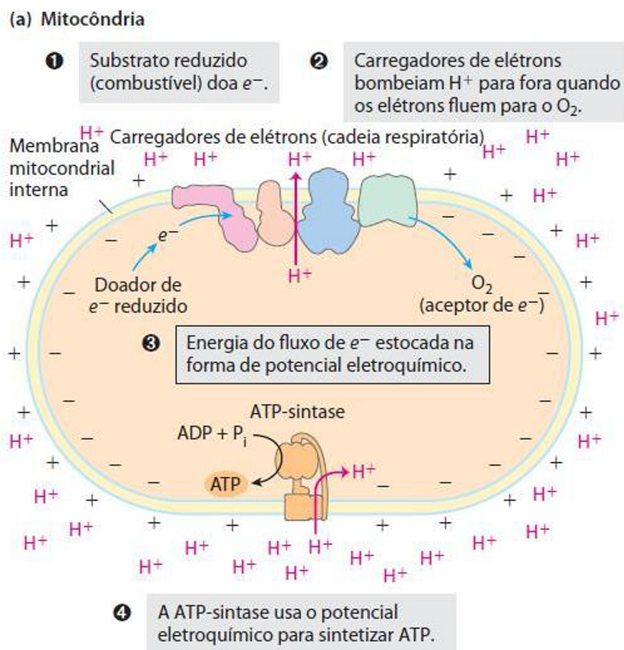


Figura 5: Fosforilação oxidativa - [16].

de ATP produzido quando comparado com outros mecanismos de produção de energia. O processo aeróbico de oxidação da glicose (equação 18) pode gerar até 32 ATP, uma quantidade muito maior que a obtenção de energia por anabolismo, por exemplo na fermentação láctica, que pode produzir até 2 ATP por molécula de glicose [16]

### 3.2. Espécies reativas de oxigênio e o estresse oxidativo

O mecanismo de obtenção de energia via fosforilação oxidativa pode resultar na produção de radicais livres. Radicais livres são átomos ou moléculas que não são estáveis (apresentam um elétron a menos em seu último nível energético) [13]. Essas espécies podem associar-se a um outro conjunto de moléculas em busca de estabilidade. Moléculas reagentes com radicais livres podem perder estabilidade, tornando-se, por consequência, radicais livres também.

Espécies reativas de oxigênio (ERO) são moléculas que resultam do processo de oxiredução ocorrido durante a fosforilação oxidativa. A produção de ERO está intimamente ligada ao metabolismo celular, ocorrendo em várias vias metabólicas, dentre as quais podemos destacar: a produção de energia (ATP), o crescimento celular e a síntese de diversas substâncias, sendo um processo natural em organismos vivos [16]. O próprio sistema celular, fazendo o uso de enzimas antioxidantes, possui a capacidade de catalisar espécies reativas produzidas pela fosforilação oxidativa, diminuindo o impacto negativo que as ERO podem causar. Entretanto, quando há uma produção de ERO maior que aquela que o sistema biológico consegue metabolizar naturalmente, ocorre o chamado estresse oxidativo no sistema celular. Devido à grande

presença de ERO no meio, e dado que essas moléculas possuem facilidade em associar-se a outras moléculas (lipídios de membranas, enzimas e ácidos nucleicos), podem ocorrer danos à fisiologia celular [16]. A tabela 2 mostra as principais espécies reativas de oxigênio (radicalares e não radicalares) e seu meio de ação.

De acordo com [17] podemos dizer que o radical superóxido ( $O_2^-$ ) é pouco reativo, porém ele sofre dismutação (reação de oxiredução que ocorre em uma mesma molécula) resultando em uma molécula de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). O radical  $O_2^-$  participa também do processo de produção do radical hidroxila ( $HO\cdot$ ). O  $HO\cdot$ , por sua vez, é o mais reativo e pode gerar danos ao DNA, RNA, proteínas, lipídios e membranas celulares da matriz mitocondrial, possuindo capacidade de associar-se rapidamente a outras moléculas. O peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), mesmo não sendo um radical livre, atravessa as membranas celulares e participa ativamente no estresse oxidativo, produzindo o radical  $HO\cdot$ . O oxigênio singleto ( $^1O_2$ ) é uma espécie excitada do oxigênio molecular, que reagindo quimicamente ou através da transferência de energia de excitação, possui a capacidade de oxidar lipídios, proteínas, aminoácidos, carboidratos e ácidos nucleicos. O  $^1O_2$  pode ser obtido a nível celular por peroxidases (enzimas que catalizam reações de oxiredução na presença de peróxidos). Entretanto, a produção natural de ERO pelo funcionamento fisiológico de um organismo vivo atua de forma a beneficiá-lo e é extremamente importante para o sistema celular. Sua produção pode ser utilizada pelo metabolismo celular para criar substâncias que auxiliam no combate a vírus e bactérias, fungos e processos inflamatórios. A produção natural de ERO é fundamental para a manutenção vital de organismos celulares [16].

A respiração celular é a via metabólica em maior destaque no que se refere à produção de ERO, sendo que o sistema mitocondrial sofre maior influência desse grupo de moléculas. Mutações que podem ocorrer no DNA mitocondrial (DNAm) comprometem a geração de ATP pela célula, podendo resultar em doenças. Em animais, caso ocorra alguma lesão no DNAm materno, gerando alguma

Tabela 2: Algumas espécies reativas de oxigênio - adaptado de [17].

Espécie	Estrutura	Descrição	Ação
superóx.	( $O_2^-$ )	Maior influência na indução ao dano celular	Na maioria das reações atua como agente redutor
Hidroxila	( $HO\cdot$ )	Altamente reativo	DNA, proteínas, carboidratos e lipídeos
Peróx. de hidrogênio	( $H_2O_2$ )	Não é um radical livre	Proteínas e lipídeos
Oxigênio Singleto	( $^1O_2$ )	Molécula de oxigênio excitada	Mutações no DNA

mutação, o herdeiro da herança genética mitocondrial poderá apresentar algum tipo de anomalia. Especula-se que, nas mudanças progressivas que acompanham o envelhecimento, o acúmulo de mutações no DNAm durante uma vida de exposição a agentes capazes de danificar o DNA, como  $O_2^-$ , resulta em mitocôndrias que não podem suprir ATP suficiente para o funcionamento celular normal. Além disso, doenças mitocondriais podem resultar de mutações em quaisquer dos cerca de 1.100 genes nucleares que codificam proteínas mitocondriais [16].

### 3.3. Efeitos da exposição à RBF e o estresse oxidativo

Segundo [5], a exposição à RBF é um agente externo expressivo correlacionado ao aumento de ERO, resultando no estresse oxidativo a nível celular e pode estar associada a causa de doenças. Dentre os estudos apresentados por essa referência, destacam-se:

1) NADH oxidase foi sugerido como sendo mediador da interação entre células vivas. Usando membranas de células, os autores observaram experimentalmente que a exposição à radiação de 875 MHz,  $200 \mu W/cm^2$  por 5 ou 10 minutos, aumentou em quase três vezes a atividade de NADH oxidase. NADH oxidases são acopladas a enzimas que catalisam a redução do oxigênio. O processo se resume na transferência de elétrons do NADH para o oxigênio, produzindo o radical superóxido  $O_2^-$ .

2) A produção de ERO em espermatozoides devido à exposição à RBF em humanos, sendo esse aumento causado pela ativação do metabolismo mitocondrial, resultando na produção de  $O_2^-$ . O estudo foi realizado utilizando uma dose de radiação de 1.8GHz e uma SAR de  $1W/kg$ . Nota-se que a taxa de SAR está abaixo dos valores da tabela 1.

3) Os autores demonstraram que a exposição à RBF de ovos de codorna (GSM 900MHz,  $0, 25 \mu W/cm^2$ ), durante os dias iniciais de embriogênese, resultou em uma superprodução de  $O_2^-$  nas mitocôndrias dos embriões. A relação existente pode se dar por dois fenômenos interligados: a produção de ERO gerando danos à membrana mitocondrial e o dano causado à membrana mitocondrial resultando em aumento da produção de ERO.

As mitocôndrias possuem um papel importante na produção de energia para as células e também no processo de morte celular programada (apoptose), sendo esses processos naturais no metabolismo celular [16]. No entanto, estudos indicam a ativação de apoptose devido à exposição à RNI [5]. No câncer de epiderme humano, células expostas a uma frequência de 1950MHz resultaram no aumento da apoptose (45% após 3 horas). Neurônios, em cultura primária, foram expostos ao sinal GSM de 1900MHz durante 2 horas e foi observada a regulação crescente de caspases (substâncias que participam do processo de apoptose). A regulação crescente de caspases foi observada estando o celular em posição "stand-by"<sup>2</sup> ou

em posição "on"<sup>3</sup>, ressaltando ainda a alta biosensibilidade à exposição com relação ao modo "stand-by" (centesimos de  $\mu W/cm^2$ ) [5].

Estudos mostram também que a infertilidade masculina pode estar associada ao uso de dispositivos móveis na proximidade de estruturas reprodutivas. Uma vez que aparelhos celulares emitem ondas eletromagnéticas de radiofrequência, essas podem alterar a qualidade dos espermatozoides, afetando negativamente a espermatogênese [6]. Outros estudos indicam que radiações eletromagnéticas de celulares podem alterar a estrutura e função testiculares, assim como propriedades do esperma e, conseqüentemente, a fertilidade masculina. Por fim, há evidências significativas de que a radiação eletromagnética dos dispositivos móveis pode provocar alterações a nível de ERO, estresse oxidativo, homeostase do cálcio, proteína cinase c, atividade proliferativa, ciclo celular, proteínas de choque térmico, apoptose, barreira hemato-testicular, anticorpos antiespermáticos e dano no DNA [7].

Em alguns estudos apresentados por [5] mostra-se a produção de radicais livres ( $O_2^-$  e óxido de nitrogênio-NO) como sendo uma reação primária à exposição à RNI. Um aumento significativo de NO pode resultar em peroxidação e repressão de enzimas antioxidantes. Registra-se também o papel fundamental de substâncias antioxidantes (vitamina C, E e selênio) para combater os efeitos causados por RBF. Em um experimento descrito em [5], utilizando ovos de codorna embrionados expostos a uma frequência de GSM 900MHz  $0, 25 \mu W/cm^2$ , evidenciou-se a presença do radical  $O_2^-$  mas que não possui a capacidade de lesar o DNA. Porém, o aumento da concentração de NO, em adição ao  $O_2^-$  nas células expostas à RBF pode levar à formação de outra forma agressiva de ERO, peroxinitrito ( $ONOO^-$ ), que pode causar danos ao DNA. Infere-se em [5] que a exposição à RBF induz a superprodução de radicais livres e ERO no sistema celular e, conseqüentemente, pode produzir efeitos nocivos por danos diretos devido à oxidação de macromoléculas biológicas.

Em um experimento realizado por [8], cobaias foram submetidas à exposição de radiação de microondas a 2,45 GHz e  $1,6 mW/cm^2$ , sendo observadas alterações comportamentais quando comparados o grupo exposto e o não exposto. Observou-se, nesse experimento, que a radiação eletromagnética afetou a aprendizagem das cobaias da espécie *Rattus Norvegicus*. Atribui-se o termo eletro-hipersensibilidade (EHS) a indivíduos que manifestam alguns sintomas devido à exposição à RBF. Dentre os sintomas observados estão comichão, dor, irritação e sensação de calor. De fato, uma reação de alergia à RBF em seres humanos foi confirmada por um aumento significativo no nível de mastócitos na pele de pessoas sob exposição a dispositivos eletromagnéticos [5]. Os mastócitos são células de defesa contendo uma substância denominada de histamina, responsável por atuar em pro-

<sup>2</sup>O celular permanecer em modo de espera, não recebendo chamadas.

<sup>3</sup>O celular encontra-se recebendo uma chamada.

cessos de reações alérgicas, podendo também participar ativamente na produção de ERO.

Doenças psicofísicas e pré-clínicas (fadiga, dor de cabeça, irritação, perturbação do sono, desequilíbrios hormonais) foram observadas em pessoas que moram nas proximidades de estações de transmissão de ondas de rádio (ERB). Ainda, segundo [5], parece plausível que as condições de EHS possam ser atribuídas (ao menos parcialmente) à superprodução de ERO em células devido a exposições de radiofrequência. Da mesma forma, em [9] investiga-se a associação entre exposição à RNI decorrentes das estações de rádio base (ERB) de telefonia celular e efeitos à saúde em Salvador/BA, concluindo que existe uma correlação entre a RNI e doenças como cefaléia, sonolência, fadiga, lapsos de memória, tontura, insônia, dificuldade de concentração, irritabilidade, palpitação e ansiedade. Essa mesma pesquisa aponta que o aparelho celular atua com maior significância que as radiações de ERB no que se refere a potenciais danos a sistemas biológicos. Finalmente, pontua que as razões que deveriam ser de maior preocupação da população estão relacionadas à duração das chamadas, ao uso do aparelho com sinal de cobertura fraco e a proximidade do aparelho ao crânio, dentre outros modos inadequados de uso.

Por fim, os resultados citados apontam para a potencialidade cancerígena da exposição à RBF em pessoas que utilizam constantemente telefones celulares, podendo ser considerado um fator exógeno. Há indícios de maior risco de desenvolvimento de tumores cerebrais, neuroma acústico, tumores de parótida, glândulas, seminomas, melanomas e linfomas. Conclui-se que as RBF podem se configurar como um fator externo expressivo a contribuir para o aumento do estresse oxidativo celular, que por sua vez, induz a um potencial cancerígeno de acordo com o nível de exposição sofrido [5].

#### 4. Legislação vigente

Telefones móveis funcionam em regiões específicas do espectro eletromagnético. Sempre que necessitamos fazer ou receber chamadas ou simplesmente enviar mensagens, é necessário que uma quantidade de energia seja transmitida na forma de onda eletromagnética. Atualmente no Brasil existem quatro faixas de frequência nas quais os telefones celulares operam:

- 850 MHz, (GSM- Global System for Mobile Communications)
- 900 MHz, (GSM e 3G- Terceira Geração)
- 1700 e 1800 MHz, (GSM e 3G)
- 1900 e 2100 MHz (3G)
- 2500 MHz e 2700 MHz 4G (LTE- Long Term Evolution)

O uso desse tipo específico de radiofrequência segue a resolução estabelecida por [2], que regulamenta os limites de exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de 9 kHz a 300 GHz. Os artigos 1 e 2

dessa resolução estabelecem:

*”Art. 1º Este regulamento tem por objetivo estabelecer limites para a exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, associados a operação de estações transmissoras de radiocomunicação de serviços de telecomunicações, bem como definir métodos de avaliação e procedimentos a serem observados quando do licenciamento de estações de radiocomunicação, no que diz respeito a aspectos relacionados a exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na referida faixa de radiofrequências;*

*Art. 2º Este regulamento se aplica a todos que utilizem estações transmissoras que exponham seres humanos a campos elétricos, magnéticos ou eletromagnéticos na faixa de rádio frequências indicada no artigo 1º” [2].*

A ANATEL, órgão responsável pela fiscalização e mediação da telefonia móvel e fixa no Brasil, segue as orientações da ICNIRP [3] para estabelecer os limites com relação à exposição à RBF. Já a ICNIRP é uma organização que visa orientar e recomendar quanto aos valores e limites de exposição das RNI sobre as pessoas. A atuação dessa organização não se limita ao estudo de radiações de dispositivos celulares, mas inclui toda a região correspondente ao espectro eletromagnético da região de baixa frequência [3].

No entanto a legislação atual não considera os parâmetros apresentados na seção 3, ou seja, mesmo que a radiação não possua potencial de ionização ela poderá causar algum comprometimento ou efeito secundário ao sistema celular [5–9]. Consequentemente uma RNI tem potencial para aumentar a bioatividade do meio, gerando alterações para o sistema metabólico como um todo. Essa possibilidade deveria ser informada aos usuários.

A ampliação e revisão da legislação, no que se refere ao uso da RBF, é aconselhável. A revisão da legislação atual implicaria em uma maior transparência, alertando e informando aos usuários sobre os potenciais riscos da RNI, até então omitidos. Ao contrário do que ocorre com aparelhos que utilizam radiações ionizantes (aceleradores lineares, equipamento médicos de raios x), nos quais o uso é restrito, muito bem controlado e identificado, as RNI ocorrem em praticamente todos os ambientes sociais e não se faz o mesmo alerta e identificação para as pessoas.

Portanto, torna-se necessário que, para todo equipamento que utiliza RNI (tablets, smartphones, roteadores, etc), haja informações de forma clara e objetiva acerca dos potenciais riscos que por ventura aqueles aparelhos poderão causar aos usuários.

#### 5. Modelo teórico para um íon livre sob influência de um campo elétrico constante

A partir de um modelo de interação da RBF com o meio celular, proposto por [18] e [19], podemos analisar teoricamente como a RNI influencia um sistema metabólico,

afetando o funcionamento celular como um todo. O modelo parte do fato de que a oscilação de um campo elétrico ou magnético externo acelera as cargas, induzindo uma vibração forçada em cada íon livre do meio celular.

Um campo elétrico, variável no tempo  $t$ , é dado por  $\vec{E} = \vec{E}_0 \text{Sen}(wt)$ , sendo  $w$  a frequência de oscilação ( $w = 2\pi\nu$ ). Esse campo exercerá uma força em cada íon livre<sup>4</sup> dada pela equação  $\vec{F} = q_e \vec{E}$ . Portanto, a força  $\vec{F}_1$  que o meio irá sofrer devido à presença desse campo será

$$\vec{F}_1 = \vec{E}_0 n q_e \text{Sen}(wt), \tag{20}$$

sendo  $n$  o número de íons livres. A força  $\vec{F}_1$  irá deslocar os íons da sua posição de equilíbrio por uma distância  $\vec{x}$ . Então, no modelo em estudo, uma força  $\vec{F}_2$  irá surgir de forma a manter a configuração em seu estado de equilíbrio.  $\vec{F}_2$  é dada pela equação

$$\vec{F}_2 = -\beta \vec{x}, \tag{21}$$

na qual  $\beta$  representa a constante de restauração devido ao deslocamento  $\vec{x}$  sofrido pelo íon. A linearidade da equação (21) permite relacionar o valor de  $\beta$  à frequência natural de oscilação  $w_0$  do íon:  $\beta = m_i w_0^2$ , sendo  $m_i$  a massa do íon.

Ao se deslocar, o íon adquire velocidade  $\vec{v}$  e, estando imerso em um meio, como por exemplo o citoplasma, surgirá uma força  $\vec{F}_3$  que atua de forma a amortecer o movimento. A força  $\vec{F}_3$  é dada pela equação

$$\vec{F}_3 = -\mu \vec{v}, \tag{22}$$

sendo  $\mu$  uma constante de amortecimento.

A força na equação (22) é denominada de força de Stokes e pode ser escrita na forma  $\vec{F}_3 = -6\pi\alpha\eta\vec{v}$  [18, 19]. Essa fórmula descreve a força atuando em objetos esféricos, de raio iônico  $\alpha$ , que se movimentam com velocidade  $\vec{v}$  em um meio cuja viscosidade é  $\eta$ .

A resultante das forças  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$  faz com que o íon esteja sujeito a uma aceleração  $\vec{a}$

$$\vec{F}_R = m_i \vec{a} \tag{23}$$

ou

$$\vec{E}_0 n q_e \text{Sen}(wt) - \mu \vec{v} - \beta \vec{x} = m_i \vec{a}. \tag{24}$$

Considerando, por brevidade, somente o caso unidimensional, a equação (24) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E_0 n q_e \text{Sen}(wt) = m_i \frac{d^2x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + m_i w_0^2 x. \tag{25}$$

A equação (25) é diferencial de segunda ordem, não homogênea, com coeficientes constantes, que descreve o movimento dos íons existentes no meio celular devido à existência de um campo elétrico externo oscilante.

A solução geral para a equação (25) é dada pela solução da equação homogênea mais a solução da equação particular ( $X(t) = X_H + X_p$ ) [20]. Resolvendo primeiramente a equação homogênea ( $X_H$ ) teremos

$$m_i x'' + \mu x' + m_i w_0^2 = 0, \tag{26}$$

cujas equações características são:

$$m_i r^2 + \mu r + m_i w_0^2 = 0. \tag{27}$$

Definindo  $\Delta = \mu^2 - 4m_i^2 w_0^2$ , existem três situações possíveis [20]: para  $\Delta > 0$ , o sistema sofre superamortecimento, decaindo mais lentamente para a posição de equilíbrio que para o caso de  $\Delta < 0$ , no qual ocorre o amortecimento crítico e o sistema decai rapidamente. Para  $\Delta = 0$ , o sistema encontra-se subamortecido e pode oscilar algumas vezes até o decaimento para a posição de equilíbrio.

Para identificarmos a qual regime de amortecimento o modelo em estudo pertence faremos uma análise dimensional do parâmetro  $\mu = 6\pi\eta\alpha$ , definindo em (22). Para tanto, faremos uso dos dados utilizados em [19]. De acordo com essa referência, o meio no qual ocorre o deslocamento iônico é a água, cuja viscosidade é  $\eta = 7X10^{-4} \text{kg/m.s}$  a  $37^\circ\text{C}$ . Consideremos também que o raio iônico  $\alpha$  é da ordem de grandeza de  $10^{-10} \text{m}$ . Então  $\mu$  possuirá uma ordem de grandeza de aproximadamente  $10^{-12} \text{kg/s}$ . Por outro lado, a unidade de massa iônica, por exemplo do  $\text{Na}^+$ , é da ordem de  $10^{-26} \text{kg}$  e a frequência natural de oscilação  $\nu_0$ , para íons em meio celular, não excede o valor de  $1 \text{Hz}$  [18]. A partir dessa análise dimensional pode-se concluir que  $\mu \gg 2m_i w_0$ , o que caracteriza o resultado para  $\Delta > 0$ . Consequentemente as raízes da equação característica são negativas ( $r_{1,2} < 0$ ), o que nos remete ao caso de superamortecimento. Portanto, a solução para a equação homogênea será da forma [20]

$$r(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t}. \tag{28}$$

Analisaremos agora a solução da equação particular. Como a força perturbativa aplicada ao sistema é periódica,  $f(t) = E_0 n q_e \text{Sen}(wt)$ , devemos procurar uma solução particular que possua a forma [20]:

$$X_p = t^s [(A_0 + \dots A_n t^n) e^{\alpha t} \text{Cos}(wt) + \tag{29}$$

$$(B_0 + \dots B_n t^n) e^{\alpha t} \text{Sen}(wt)],$$

na qual  $S$  deverá ser o menor inteiro não negativo, garantindo que  $X_p$  não seja solução da equação homogênea, ou seja  $S = 0$ . Então, temos que

$$X_p = C_1 \text{Cos}(wt) + C_2 \text{Sen}(wt). \tag{30}$$

Os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  devem ser determinados. Para tanto calculamos as derivadas  $X'_p$  e  $X''_p$ , obtendo

$$X'_p = -C_1 w \text{Sen}(wt) + C_2 w \text{Cos}(wt) \tag{31}$$

$$X''_p = -C_1 w^2 \text{Cos}(wt) - C_2 w^2 \text{Sen}(wt). \tag{32}$$

<sup>4</sup>Por simplicidade consideramos que cada íon tem a carga do elétron ( $1,6X10^{-19} \text{C}$ ).



Em seguida substituímos  $X'_p$  e  $X''_p$  na equação (25), chegando a

$$\begin{aligned} \cos(wt)[m_i C_1(-w^2 + w_0^2) + C_2 \mu w] \\ + \sin(wt)[m_i C_2(-w^2 + w_0^2) \\ - C_1 \mu w] = E_0 n q_e \sin(wt), \end{aligned} \quad (33)$$

que resulta em

$$C_1 m_i (-w^2 + w_0^2) + C_2 \mu w = 0 \quad (34)$$

$$C_2 m_i (-w^2 + w_0^2) - C_1 \mu w = E_0 n q_e. \quad (35)$$

Resolvendo o sistema linear dado pelas equações (34) e (35) obtemos os valores

$$C_1 = \frac{E_0 \eta q_e \mu w}{m_i^2 (w^2 - w_0^2)^2 + (\mu w)^2} \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{E_0 \eta q_e \mu w (w^2 - w_0^2)}{m_i^2 (w^2 - w_0^2)^2 + (\mu w)^2}. \quad (37)$$

Podemos agora obter a equação geral  $X(t) = X_H + X_p$

$$\begin{aligned} X(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \\ \frac{E_0 \eta q_e \mu w}{m_i^2 (w^2 - w_0^2)^2 + (\mu w)^2} \cos(wt) + \\ \frac{E_0 \eta q_e \mu w (w^2 - w_0^2)}{m_i^2 (w^2 - w_0^2)^2 + (\mu w)^2} \sin(wt). \end{aligned} \quad (38)$$

Note que, de acordo com as aproximações feitas para  $m_i$  e  $\mu$ , o termo  $m_i^2 (w^2 - w_0^2)^2$  é muito menor que  $(\mu w)^2$ , podendo então ser desprezado na equação (38). No instante  $X_{t=0} = 0$  temos que

$$C_1 + C_2 = -\frac{E_0 n q_e}{\mu w}, \quad (39)$$

o que nos leva à expressão

$$X(t) = \frac{E_0 n q_e}{\mu w} \cos(wt) - \frac{E_0 n q_e}{\mu w}. \quad (40)$$

A equação (40) representa um modelo puramente teórico, que descreve o comportamento de um íon livre sob a influência de um campo elétrico externo. Note que o primeiro termo da equação (40) evidencia a oscilação que o íon está submetido no meio celular, enquanto o segundo termo nos mostra o deslocamento sofrido por esse íon devido à influência do campo elétrico externo. Observe também que, no modelo proposto, o deslocamento sofrido não possui dependência com a amplitude de oscilação  $A = \frac{E_0 n q_e}{\mu w}$  apresentando-se em fase. Observa-se que a amplitude do movimento iônico é inversamente proporcional à frequência angular do campo externo. Isso indica, no sistema em estudo, *uma maior influência de campos de baixa frequência na bioatividade de sistemas biológicos*.

Conforme argumentamos na seção 3, um sistema celular não funciona de forma isolada, os processos bioquímicos ocorrem por diversas vias metabólicas, mantendo-se

o equilíbrio químico em seu funcionamento. No mecanismo de obtenção de energia por uma célula ocorre o transporte de cargas elétricas (íons) pelas membranas, sendo este de extrema importância para o sistema celular. O balanço energético, que ocorre nesse processo, é definido pela energia livre de Gibbs (equação (19)), na qual se evidencia o aumento da entropia do sistema. Como sabemos, a entropia é uma grandeza definida positiva e mensura o grau de desordem ou aleatoriedade de um sistema. Ainda, segundo a análise realizada, uma influência externa pode perturbar os processos químicos e físicos do meio celular. A equação (40) mostra a influência de um campo externo atuando em um meio celular, causando a variação na posição de equilíbrio de um íon livre, indicando que campos que possuem baixa frequência (na faixa de RNI) influenciaram de forma mais significativa o sistema celular do que campos de alta frequência.

Em uma análise qualitativa podemos correlacionar a variação que ocorre na posição  $x$  de um íon, (equação (40)), a possíveis efeitos deletérios associados à exposição a RBF, conforme apresentamos na seção 3. O deslocamento forçado por um campo elétrico externo, ocorrido na posição de equilíbrio dos íons, poderá influenciar no processo de obtenção de energia que ocorre no interior da célula (fosforilação oxidativa), perturbando o equilíbrio químico que rege esse mecanismo de tal forma que o fluxo de elétrons entre as membranas seja comprometido. Como esse processo é realizado pelo transporte ativo regular de cargas, infere-se que qualquer perturbação externa, variando a oscilação e o transporte de íons entre as membranas, poderá resultar no aumento de entropia do sistema. Em particular quando os íons estão sob a influência de campos de baixa frequência, há um aumento da amplitude de seu deslocamento e, conseqüentemente, um aumento do fluxo de transporte entre membranas, ou seja, existirá uma maior produção de energia (ATP) durante a fosforilação oxidativa.

Esse aumento, conforme argumentamos na seção 3, levaria a uma superprodução de espécies reativas de oxigênio. De fato, há evidências de aumento do estresse oxidativo celular quando tecidos biológicos são expostos a RNI, resultando em prejuízo para organismos vivos [5–7, 9].

## 6. Conclusão

A RBF, especificamente a utilizada por aparelhos celulares, é considerada como não prejudicial aos seres vivos, não resultando em danos à saúde das pessoas. Baseados no fato da radiação de dispositivos celulares não possuir a capacidade de ionização e os índices de SAR estarem de acordo com as leis vigentes, conforme foi apresentado na seção 4, os fabricantes desses dispositivos afirmam que o único malefício que esse tipo de radiação pode ocasionar é a indução de efeitos térmicos sobre as pessoas. Porém, os resultados apresentados na seção 3 mostram que, além de efeitos térmicos, existe uma relação entre o potencial

de ação da RBF sobre sistemas biológicos e o aumento do estresse oxidativo no meio celular.

Nota-se que os efeitos do aumento do estresse oxidativo, causados por RNI em sistemas biológicos, não são levados em consideração pelas agências reguladoras na análise de segurança no uso de dispositivos celulares. Por outro lado, fazendo uso do princípio da precaução, as empresas fabricantes desses dispositivos alertam somente para que os usuários utilizem a função "viva voz", assim como fones de ouvido, para realizar chamadas sempre que possível.

No modelo teórico estudado, resultando na equação (40), mostra-se que campos de baixa frequência podem ser mais bioativos que campos de alta frequência (considerando RNI). Esse resultado foi derivado por primeiros princípios, usando um modelo simples e formulação básica, adequados a abordagem didática. A simplicidade no tratamento do tema, entretanto, não compromete a qualidade científica do resultado expresso pela equação (40). De fato, o tratamento do tema dessa forma e levando à conclusão que RBF pode ser potencialmente prejudicial a sistemas biológicos, em acordo com os resultados apresentados na seção 3, são as principais contribuições do presente trabalho.

Por fim, vale ressaltar que o presente estudo considera a influência de apenas uma fonte de radiação agindo sobre um sistema biológico. Entretanto, uma situação mais próxima da realidade seria considerar efeitos de superposição de várias fontes em um único agente passivo. Por exemplo, em uma sala de aulas, com pessoas localizadas em um plano cartesiano, uma pessoa em um dado ponto dessa rede recebe, em maior intensidade, radiação de até oito fontes primárias. Essa superposição de radiações poderia resultar em um aumento da amplitude do campo elétrico incidente sobre o agente passivo, potencializando os efeitos negativos da RBF.

## Referências

- [1] Review Of Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-Ionizing Radiation Protection, disponível em <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/INIRReview.pdf>.
- [2] ANATEL. Resolução nº 303, de 2 de julho de 2002. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>.
- [3] <https://www.icnirp.org>.
- [4] B.G. Saha, *Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine* (Springer, Berlim, 2013), 4ª ed.
- [5] I. Yakymenko, O. Tsybulin, E. Sidorik, D. Henshel, O. Kyrylenko e S. Kyrylenko, *Electromagn Biol Med.* **35**, 186 (2016).
- [6] A. Agarwal, A. Singh, A. Hamada e K. Kesari, *Int. Braz J Urol.* **37**, 432 (2011).
- [7] J.A.P. Ferreira, *Efeitos da Exposição a Radiação Eletromagnética na Função Testicular e Reprodutiva*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã (2013).
- [8] M. Gheyi, M.S. Alencar, J.M.P. Moreira, S. Nain, M.J. Pachy e G. Glionna, in *XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações* (Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Campinas, 2000).
- [9] D.F. Silva, *Exposição às radiações eletromagnéticas não ionizantes decorrentes da telefonia celular e efeitos à saúde*. Tese de Doutorado, Fundação Oswaldo Cruz, Salvador (2014).
- [10] H.M. Nusseszveig, *Curso de Física Básica* (Blucher, São Paulo, 1981), 3ª ed, v. 2.
- [11] D.J. Griffiths, *Eletrodinâmica* (Pearson, São Paulo, 2011), 3ª ed.
- [12] H.M. Nusseszveig, *Curso de Física Básica* (Blucher, São Paulo, 1997), 1ª ed, v. 3.
- [13] Y. Nouailhetas, Apostila educativa: Radiações Ionizantes e a vida, disponível em <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf>.
- [14] Icnirp Statement—Protection of Workers Against Ultraviolet Radiation, disponível em <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUVWorkersHP.pdf>.
- [15] C.P. Costa e G. Fontgalland, *Rev. Bras. Eng. Bioméd.* **27**, 52 (2011).
- [16] D.L. Nelson e M.M. Max, *Princípios de Bioquímica de Lehninger* (Artmed, Porto Alegre, 2014), 6ª ed.
- [17] N.C.B. Duda, *Estresse Oxidativo*, disponível em <https://www.ufrgs.br/lacvet/site/wp-content/uploads/2013/10/estresse-oxidativo-Naila.pdf>.
- [18] D.J. Panagopoulos, N. Messini, A. Karabarbounis, A.L. Philippetis e L.H. Margaritis, *Biochem Biophys Res Commun* **272**, 634 (2000).
- [19] D.J. Panagopoulos, A. Karabarbounis e L.H. Margaritis, *Biochem Biophys Res Commun* **298**, 95 (2002).
- [20] R.J. Santos, *Introdução as Equações Diferenciais Ordinárias* (Imprensa Universitaria da UFMG, Belo Horizonte, 2011).
- [21] <https://def.fe.up.pt/fisica3/ondas1/index.html>.
- [22] Radiação eletromagnética, disponível em [http://www.wikiwand.com/pt/Radia%C3%A7%C3%A3o\\_eletromagn%C3%A9tica](http://www.wikiwand.com/pt/Radia%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica).
- [23] Natureza dualística da radiação electromagnética, disponível em <http://e-escola.tecnico.ulisboa.pt/topico.asp?id=437>.
- [24] [https://moodle.pucgoias.edu.br/pluginfile.php/139101/mod\\_resource/content/1/0%20COMPORTAMENTO%20AC%C3%9ASTICO%20DOS%20MATERIAIS.pdf](https://moodle.pucgoias.edu.br/pluginfile.php/139101/mod_resource/content/1/0%20COMPORTAMENTO%20AC%C3%9ASTICO%20DOS%20MATERIAIS.pdf).