

LINHAS DE ORIENTAÇÃO PARA OS LIMITES DE EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELÉCTRICOS E MAGNÉTICOS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO (FREQUÊNCIAS DE 1Hz a 100 kHz)

Comissão Internacional de Protecção Contra as Radiações Não Ionizantes*

INTRODUÇÃO

Neste documento são estabelecidas linhas de orientação com vista à protecção dos seres humanos expostos a campos eléctricos e magnéticos na gama de baixa frequência do espectro electromagnético. Os princípios gerais de desenvolvimento das linhas de orientação da ICNIRP encontram-se publicados noutro documento (ICNIRP 2002). Para efeitos do presente documento, a gama de baixa frequência varia entre 1 Hz e 100 kHz. Acima dos 100 kHz, têm de ser considerados efeitos como o aquecimento, que se encontram descritos noutras linhas de orientação da ICNIRP. Contudo, na gama de frequências entre 100 kHz e 10 MHz (aproximadamente), deverá ser tida em conta a protecção contra os efeitos das baixas frequências no sistema nervoso e a protecção contra os efeitos das altas frequências, dependendo das condições de exposição. Deste modo, algumas orientações deste documento estendem-se até aos 10 MHz de forma a abranger os efeitos sobre o sistema nervoso nesta gama de frequências. As linhas de orientação aplicadas aos campos magnéticos estáticos encontram-se descritas noutro documento (ICNIRP 2009). As linhas de orientação aplicáveis aos campos eléctricos induzidos pelo movimento ou aos campos magnéticos variáveis ao longo do tempo até 1 Hz serão publicadas em separado.

A presente publicação substitui a secção sobre baixas frequências incluída nas linhas de orientação de 1998 (ICNIRP 1998). A ICNIRP está actualmente a rever as linhas de orientação relacionadas com as altas frequências do espectro (acima de 100 kHz).

ÂMBITO E OBJECTIVO

O principal objectivo desta publicação é estabelecer linhas de orientação com vista a limitar a exposição a campos eléctricos e magnéticos (CEM) que irão ajudar a proteger contra todos os efeitos adversos comprovados para a saúde.

Foram avaliados estudos sobre os efeitos directos e indirectos dos CEM: os efeitos directos resultam de interacções directas dos campos com o corpo; os efeitos indirectos envolvem interacções com um objecto condutor em que o potencial eléctrico do objecto é diferente do potencial eléctrico do corpo.

O presente documento aborda os resultados de estudos laboratoriais e epidemiológicos, critérios básicos de avaliação da exposição e níveis de referência para avaliação prática dos riscos e as linhas de orientação apresentadas neste documento aplicam-se à exposição ocupacional e à exposição do público em geral.

As limitações descritas nas presentes linhas de orientação basearam-se em evidências comprovadas relacionadas com efeitos agudos; os conhecimentos actuais indicam que o cumprimento destas limitações protege os trabalhadores e a população de efeitos adversos para a saúde provocados pela exposição a CEM de baixa frequência. Os dados epidemiológicos e biológicos relativos a patologias crónicas foram cuidadosamente analisados e concluiu-se que não existem evidências convincentes de que estas estejam relacionadas com a exposição a CEM de baixa frequência.

As presentes linhas de orientação não têm em conta os níveis de desempenho do produto, que se destinam a limitar as emissões de CEM de equipamentos específicos em determinadas condições de teste, nem abordam as técnicas utilizadas para medir quaisquer grandezas físicas que caracterizam os campos eléctricos, magnéticos e electromagnéticos. Poderão ser encontradas noutro documento descrições mais pormenorizadas das técnicas de instrumentação e medição com vista ao apuramento preciso das referidas grandezas físicas (IEC 2004, 2005a; IEEE 1994, 2008).

O cumprimento das presentes linhas de orientação não exclui necessariamente a interferência com, ou os efeitos sobre, equipamentos médicos tais como próteses metálicas, *pacemakers* e desfibriladores implantados e implantes cocleares. Poderá ocorrer interferência com *pacemakers* a níveis abaixo dos níveis de referência recomendados. As recomendações sobre como evitar estes problemas não se enquadram no âmbito do presente documento, mas encontram-se descritas noutro documento (IEC 2005b).

As presentes linhas de orientação serão revistas periodicamente e actualizadas em paralelo com os avanços científicos relativos a quaisquer aspectos relevantes para a limitação da exposição a campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência variáveis ao longo do tempo.

QUANTIDADES E UNIDADES

Enquanto os campos eléctricos estão apenas associados à presença de carga eléctrica, os campos magnéticos resultam do movimento físico da carga eléctrica (corrente eléctrica).

* Este documento é uma tradução de ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz) publicado na Health Physics 99(6):818-836; 2010. Para qualquer informação relativa a esta tradução por favor contacte: Carolino Monteiro, Universidade de Lisboa, Portugal, cm@ff.ul.pt ou José Peralta, Redes Energéticas Nacionais, Portugal, jose.peralta@ren.pt.

Um campo eléctrico, E , exerce uma força sobre uma carga eléctrica e expressa-se em volts por metro ($V m^{-1}$). Do mesmo modo, os campos magnéticos podem exercer forças físicas sobre cargas eléctricas, mas apenas quando essas cargas estão em movimento e/ou o campo magnético varia ao longo do tempo. Os campos eléctricos e magnéticos possuem intensidade e direcção (ou seja, são grandezas vectoriais). Um campo magnético pode ser especificado de duas formas – como densidade do fluxo magnético, B , expresso em Tesla (T), ou como intensidade do campo magnético, H , expresso em ampere por metro ($A m^{-1}$). As duas grandezas estão relacionadas pela fórmula:

$$B = \mu H \quad (1)$$

em que μ corresponde à constante de proporcionalidade (permeabilidade magnética); no vácuo e no ar, bem como em materiais não magnéticos (incluindo biológicos) o μ tem o valor $4\pi \times 10^{-7}$ quando expresso em Henry por metro ($H m^{-1}$). Deste modo, na descrição de um campo magnético para efeitos de protecção, apenas será necessário especificar uma das grandezas B ou H .

A exposição a CEM variáveis ao longo do tempo resulta em campos eléctricos internos, em correntes eléctricas no corpo e em absorção de energia nos tecidos que variam consoante os mecanismos de acoplamento e a frequência em causa. O campo eléctrico interno E_i e a densidade de corrente J estão relacionados pela Lei de Ohm:

$$J = \sigma E_i \quad (2)$$

em que σ corresponde à condutividade eléctrica do material. As quantidades dosimétricas utilizadas nestas linhas de orientação são as seguintes:

- campo eléctrico E_i ; e
- Corrente I .

A Tabela 1 apresenta uma descrição geral dos CEM e das quantidades e unidades dosimétricas usadas nas presentes linhas de orientação.

BASE CIENTÍFICA PARA LIMITAR A EXPOSIÇÃO

As presentes linhas de orientação aplicadas aos limites de exposição foram desenvolvidas com base numa análise exaustiva da literatura científica publicada.

Tabela 1. Quantidades e respectivas unidades SI usadas nas presentes linhas de orientação.

Quantidade	Símbolo	Unidade
Condutividade	σ	Siemens por metro ($S m^{-1}$)
Corrente	I	Ampere (A)
Densidade da corrente	J	Ampere por metro quadrado ($A m^{-2}$)
Frequência	f	Hertz (Hz)
Intens. do campo eléctrico	E	Volt por metro ($V m^{-1}$)
Intens. do campo magnético	H	Ampere por metro ($A m^{-1}$)
Densid. do fluxo magnético	B	Tesla (T)
Permeabilidade magnética	μ	Henry por metro ($H m^{-1}$)
Permissividade	ϵ	Farad por metro ($F m^{-1}$)

Foram usados critérios devidamente comprovados para avaliar a credibilidade científica da metodologia, dos resultados e das conclusões das constatações registadas. Apenas foram utilizados os efeitos resultantes de evidências científicas fiáveis como base para as limitações de exposição.

Os efeitos biológicos da exposição a campos electromagnéticos de baixa frequência foram revistos pela Agência Internacional de Investigação do Cancro (IARC), ICNIRP, pela Organização Mundial de Saúde (OMS) (IARC 2002; ICNIRP 2003a; OMS 2007a) e por grupos de especialistas nacionais. Estas publicações forneceram a base científica para as presentes linhas de orientação.

Conforme abaixo indicado, a base para as linhas de orientação encontra-se dividida em duas partes: a exposição a campos eléctricos de baixa frequência poderá provocar respostas biológicas bem definidas, que vão desde a percepção até ao incómodo, através de efeitos de carga eléctrica superficial. Além disso, os únicos efeitos devidamente comprovados em voluntários expostos a campos magnéticos de baixa frequência são a estimulação dos tecidos do sistema nervoso central e periférico e a indução na retina de fosfenos, uma percepção visual de luz cintilante na periferia do campo visual. A retina faz parte do SNC e é considerada como um modelo adequado, embora conservador, para os efeitos do campo eléctrico induzido no circuito neuronal do SNC em geral.

Face às incertezas constantes dos dados científicos, foram aplicados factores de redução na definição das linhas de orientação aplicadas à exposição. Para informações detalhadas consulte o documento ICNIRP 2002.

Mecanismos de acoplamento entre os campos e o corpo

O corpo dos seres humanos e dos animais perturba, de forma significativa, a distribuição espacial de um campo eléctrico de baixa frequência. Em baixas frequências, o corpo é um bom condutor e as linhas de campo perturbadas externas ao corpo são quase perpendiculares à superfície do corpo. São induzidas cargas oscilantes na superfície do corpo exposto e estas produzem correntes no interior do corpo. As principais características da dosimetria para a exposição dos humanos a campos eléctricos de baixa frequência incluem:

- o campo eléctrico induzido no interior do corpo é significativamente inferior ao campo eléctrico externo, por ex. cinco a seis ordens de grandeza a 50–60 Hz;
- para um determinado campo eléctrico externo, os campos mais fortes são induzidos quando o corpo humano se encontra em contacto perfeito com o solo através dos pés (ligado à terra) e os campos induzidos mais fracos quando o corpo está isolado da terra (em “espaço livre”);
- a corrente total que flui num corpo em contacto perfeito com o solo é determinada pelo tamanho e pela forma do corpo (incluindo postura) e não pela condutividade do tecido;
- a distribuição de correntes induzidas ao longo dos vários órgãos e tecidos é determinada pela condutividade desses tecidos; e

- existe ainda um efeito indirecto, em que a corrente no corpo é produzida pelo contacto com um objecto condutor localizado num campo eléctrico.

Para campos magnéticos, a permeabilidade do tecido é a mesma do ar, pelo que o campo no tecido é o mesmo que no campo externo. O corpo dos humanos e dos animais não perturba o campo de forma significativa. A principal interacção dos campos magnéticos é a indução de Faraday de campos eléctricos e correntes associadas nos tecidos. Os campos magnéticos podem ainda ser induzidos pelo movimento num campo magnético estático. As principais características da dosimetria para a exposição dos humanos a campos magnéticos de baixa frequência incluem:

- para uma determinada intensidade e orientação do campo magnético são induzidos campos eléctricos superiores nos corpos de pessoas de maiores dimensões uma vez que os possíveis circuitos fechados condutores são maiores;
- o campo eléctrico e a corrente induzida dependem da orientação do campo magnético externo em relação ao corpo. Normalmente, os campos induzidos no corpo são maiores quando o campo se encontra alinhado entre a parte da frente e a parte de trás do corpo, mas para alguns órgãos, os valores mais elevados correspondem a alinhamentos diferentes do campo;
- os campos eléctricos mais fracos são induzidos por um campo magnético orientado ao longo do eixo principal do corpo; e
- a distribuição do campo eléctrico induzido é afectada pela condutividade dos vários órgãos e tecidos.

Conclusões da literatura científica actual

Neurocomportamento. A exposição a campos eléctricos de baixa frequência provoca respostas biológicas bem definidas, que vão desde a percepção até ao incómodo, através de efeitos de cargas eléctricas superficiais (Reilly 1998, 1999). Os limiares para a percepção directa em 10% dos voluntários mais sensíveis a 50–60 Hz situaram-se entre os 2 e os 5 kV m⁻¹ e 5% considerou 15–20 kV m⁻¹ incomodativo. A descarga de uma faísca de uma pessoa à terra é considerada dolorosa em 7% dos voluntários num campo de 5 kV m⁻¹, ao mesmo tempo que seria dolorosa para cerca de 50% num campo de 10 kV m⁻¹. Os limiares para a descarga de uma faísca a partir de um objecto carregado através de uma pessoa ligada à terra dependem do tamanho do objecto e, consequentemente, exigem uma avaliação individual.

Já há muitos anos foi devidamente comprovada a resposta dos tecidos musculares e dos nervos electricamente excitáveis aos estímulos eléctricos, incluindo as respostas induzidas por exposição a CEM de baixa frequência (ex., Reilly 2002; Saunders e Jefferys 2007). Estima-se que as fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso periférico humano possuam um limiar mínimo perto de 6 V_{pico} m⁻¹ (Reilly 1998, 2002), com base em cálculos teóricos usando um modelo de nervo. No entanto, a estimulação do sistema nervoso periférico induzida durante a exposição do

voluntário aos campos magnéticos variáveis em ressonâncias magnéticas (RM) sugeriu que o limiar da percepção poderá ser tão baixo como 2 V m⁻¹ (Nyenhuys et al. 2001), com base em cálculos sobre um modelo humano homogéneo do tipo “fantasma”. Um cálculo mais preciso dos campos eléctricos induzidos nos tecidos de um modelo humano heterogéneo com base nos dados do estudo de RM acima indicado foi executado por So et al. (2004). Estes autores estimaram o limiar mínimo para a estimulação do sistema nervoso periférico entre cerca de 4–6 V m⁻¹, com base na suposição de que a estimulação ocorreu na pele ou na gordura subcutânea. Com uma estimulação mais intensa, ocorre desconforto e, posteriormente, dor; o percentil mais baixo para a estimulação intolerável é de cerca de 20% acima do limiar médio da percepção (ICNIRP 2004). As fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso central (SNC) podem ser estimuladas por campos magnéticos induzidos durante a estimulação magnética transcraniana (TMS); os campos pulsantes induzidos no tecido cortical durante a TMS são muito elevados (> 100 V m⁻¹_{pico}), apesar do cálculo teórico sugerir que o limiar da estimulação poderá ser tão baixo como ~10 V m⁻¹_{pico} (Reilly 1998, 2002). Em ambos os conjuntos de nervos, os limiares atingem superiormente cerca de 1–3 kHz devido à disponibilidade de tempo cada vez menor para a acumulação de carga eléctrica na membrana dos nervos e inferiormente cerca de 10 Hz devido à acomodação dos nervos a um estímulo de despolarização lenta.[†]

De um modo geral, as células musculares são menos sensíveis à estimulação directa que o tecido nervoso (Reilly 1998). O tecido do músculo cardíaco merece uma atenção especial pois um funcionamento anormal poderá pôr a vida em perigo. Contudo, os limiares de fibrilhação ventricular excedem os de estimulação do músculo cardíaco num factor igual ou superior a 50 (Reilly 2002), apesar de este valor baixar muito quando o coração é repetidamente estimulado durante o período vulnerável do ciclo cardíaco. Os limiares sobem até cerca de 120 Hz devido a uma maior constante de tempo das fibras musculares em comparação com as fibras nervosas mielínicas.

O efeito mais solidamente comprovado dos campos eléctricos abaixo do limiar de excitação directa dos nervos ou dos músculos é a indução de fosfenos magnéticos, a percepção visual de uma cintilação fraca na periferia do campo visual, nas retinas dos voluntários expostos a campos magnéticos de baixa frequência. O limiar mínimo de densidade do fluxo é de cerca de 5 mT a 20 Hz, aumentando em frequências superiores e inferiores. Nestes estudos, pensa-se que os fosfenos resultam da interacção do campo eléctrico induzido com células electricamente excitáveis da retina.

[†] A acomodação não ocorre, por exemplo, em resposta à componente de baixa frequência de impulsos trapezoidais ou rectangulares com tempos de crescimento rápidos mas frequências de baixa repetição como as que se encontram nos campos variáveis em sistemas de ressonância magnética.

Isto sucede em resultado de processos no cérebro anterior e pode ser considerado como um modelo bom mas conservador para os processos que ocorrem no tecido do SNC (Sistema Nervoso Central) em geral (Attwell 2003). Estima-se que o limiar para as forças do campo eléctrico induzido na retina seja entre 50 e 100 mV m⁻¹ a 20 Hz, aumentando em frequências superiores e inferiores (Saunders e Jefferys 2007) apesar de existir uma incerteza significativa em relação a estes valores.

As propriedades integrantes do tecido nervoso do SNC poderão torná-lo sensível aos efeitos desses campos eléctricos fisiologicamente fracos, assim como as funções de processos cognitivos tais como a memória. Saunders e Jefferys (2002) sugeriram que a polarização eléctrica dos neurónios no SNC por parte desses campos eléctricos fracos poderia melhorar a sincronização de grupos activos de neurónios e afectar o restabelecimento de neurónios não activos adjacentes, o que influenciaria a excitabilidade e actividade gerais das células nervosas. Evidências *in vitro* de estudos que usaram culturas de tecidos cerebrais sugerem que os limiares mínimos para estes efeitos ficam abaixo de frequências de ~100 Hz e podem ser tão baixos como 100 mV m⁻¹ (Saunders e Jefferys 2007).

Dois grupos de investigação analisaram os efeitos dos campos eléctricos fracos aplicados directamente na cabeça através de eléctrodos[‡]. Esta pesquisa investigou os efeitos na actividade e função eléctrica do cérebro em seres humanos. Um dos grupos (Kanai et al. 2008) verificou que a estimulação do córtex visual induziu a percepção de fosfenos corticais (de aspecto semelhante aos fosfenos induzidos na retina) quando a frequência do estímulo era característica da actividade cortical visual em condições sem luz (cerca de 10 Hz) ou com luz (cerca de 20 Hz), mas não a frequências superiores ou inferiores. O outro grupo (Pogosyan et al. 2009) aplicou um sinal de 20 Hz no córtex motor dos voluntários durante a realização de uma tarefa visual-motora e constatou um pequeno mas estatisticamente significativo abrandamento do movimento da mão durante a realização da tarefa, o que era consistente com uma maior sincronização da actividade do córtex motor de 20 Hz. Não foi observado qualquer efeito com uma frequência de estímulo inferior. Em síntese, ambos os grupos de autores constataram que os campos eléctricos de 10–20 Hz, acima do limiar de fosfenos retiniais, conseguem interagir com a actividade eléctrica rítmica em curso nos córtices visual e motor e afectam ligeiramente o processamento visual e a coordenação motora, o que poderá significar que os campos eléctricos induzidos por CEM de 10–20 Hz com grandeza suficiente poderão produzir efeitos semelhantes.

Contudo, é muito menos clara a evidência de efeitos neuro-comportamentais sobre a actividade eléctrica, a cognição, o sono e a disposição geral em voluntários expostos a CEM de baixa frequência (Cook et al. 2002, 2006; Crasson 2003; ICNIRP 2003a; Barth et al. 2010).

[‡] A estimulação transcraniana por CA, ou tACS, é aplicada a níveis abaixo dos limiares de percepção local da pele.

De um modo geral, estes estudos foram levados a cabo com níveis de exposição iguais ou inferiores a 1–2 mT; ou seja, abaixo dos níveis necessários para induzir os efeitos acima descritos, e conduziram a evidências com efeitos subtis e passageiros, quando muito. As condições necessárias para obter estas respostas não estão ainda bem definidas.

Algumas pessoas afirmam ser hipersensíveis aos CEM em geral. Contudo, as evidências de estudos duplamente cegos sugerem que os sintomas registados não estão relacionados com a exposição a CEM (Rubin et al. 2005; OMS 2007a).

Existem apenas evidências não consistentes e inconclusivas de que a exposição a campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência cause sintomas depressivos ou suicídio (OMS 2007a).

Em animais, a possibilidade de a exposição a campos de baixa frequência poder afectar as funções neuro-comportamentais foi explorada sob várias perspectivas e numa vasta gama de condições de exposição. Poucos efeitos foram comprovados. Existem evidências convincentes de que os campos eléctricos de baixa frequência conseguem ser detectados por animais, muito provavelmente devido aos efeitos da carga superficial e poderão provocar uma excitação temporária ou stress moderado. Outras possíveis alterações dependentes dos campos não se encontram bem definidas (OMS 2007a).

Nestes termos, a percepção da carga eléctrica superficial, a estimulação directa dos nervos e do tecido muscular e a indução de fosfenos na retina são efeitos adversos devidamente comprovados e que podem servir de base de orientação. Além disso, existem evidências científicas indirectas de que as funções do cérebro, como por exemplo o processamento e a coordenação motora, podem ser afectados de forma temporária por campos eléctricos induzidos. Contudo, as evidências de outras investigações ao nível neuro-comportamental em voluntários expostos a campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência não são suficientemente fiáveis para fornecer uma base para a definição dos limites de exposição humana.

Sistema neuroendócrino. Os resultados de estudos em voluntários e estudos epidemiológicos residenciais e ocupacionais sugerem que o sistema neuroendócrino não é afectado de forma adversa pela exposição a campos eléctricos ou magnéticos de 50–60 Hz. Isto aplica-se sobretudo aos níveis circulantes de hormonas específicas, incluindo a melatonina libertada pela glândula pineal, e a algumas hormonas envolvidas no controlo do metabolismo e da fisiologia do organismo libertadas pela glândula pituitária. A maioria dos estudos laboratoriais dos efeitos da exposição a 50–60 Hz sobre os níveis de melatonina durante a noite em voluntários não demonstrou qualquer efeito em situações onde se controlaram os possíveis factores de confusão (OMS 2007a).

De entre o vasto número de estudos em animais no âmbito dos efeitos de campos eléctricos e magnéticos de 50–60 Hz nos níveis de melatonina no plasma sanguíneo e na glândula pineal em ratos, alguns constataram que a exposição resultou na supressão de melatonina durante a noite, ao passo que em outros estudos isso não aconteceu. No caso de animais reprodutores sazonais, as evidências de ocorrência de efeitos após exposição a campos de 50–60 Hz nos níveis de melatonina e no estado reprodutivo são, predominantemente, negativas (ICNIRP 2003a; OMS 2007a). Não foram observados efeitos convincentes num estudo de primatas não humanos cronicamente expostos a campos de 50–60 Hz.

Não foram observados efeitos consistentes nas hormonas associadas ao stress do eixo hipotálamo-pituitária-adrenal (HPA) numa variedade de espécies mamíferas com a possível excepção do stress de curta duração que sucede à exposição a campos eléctricos de baixa frequência a níveis suficientemente elevados para serem percebidos (ICNIRP 2003a; OMS 2007a). Igualmente, nos poucos estudos realizados, observaram-se, na sua maioria, efeitos negativos ou inconsistentes sobre os níveis da hormona de crescimento e sobre as hormonas responsáveis pelo controlo da actividade metabólica ou associadas ao controlo da reprodução e desenvolvimento sexual.

De um modo geral, estes dados não indicam que a forma como os campos eléctricos e/ou magnéticos de baixa frequência afectam o sistema neuroendócrino tenha um impacto adverso na saúde humana.

Doenças neurodegenerativas. Foi considerada a hipótese de a exposição a campos de baixa frequência se encontrar associada a diversas doenças neurodegenerativas. No caso da doença de Parkinson e esclerose múltipla, o número de estudos é reduzido e não existem evidências para a associação entre a exposição a campos de baixa frequência e essas doenças. Existem mais estudos publicados para a doença de Alzheimer e esclerose lateral amiotrófica (ELA). Alguns destes estudos sugerem que as pessoas que trabalham nos sectores relacionados com a energia eléctrica poderão ter um risco mais elevado de sofrer de ELA (Kheifets et al. 2009). Até ao momento, não foi comprovado nenhum mecanismo biológico que possa explicar esta associação, podendo esta, no entanto, ter surgido em virtude de factores de confusão relacionados com a actividade laboral na energia eléctrica, como por exemplo choques eléctricos. Além disso, estudos com métodos de avaliação da exposição mais avançados, como por exemplo matrizes de exposição ocupacional, não detectaram, de um modo geral, um aumento dos riscos (Kheifets et al. 2009). No caso da doença de Alzheimer, os resultados são inconsistentes. As associações mais fortes foram observadas em estudos clínicos com um elevado potencial de enviesamento na selecção, mas foram também observados maiores riscos em alguns, embora não todos, dos estudos demográficos. A análise de subgrupos no âmbito dos estudos reforça a ideia da inconsistência dos dados (Kheifets et al. 2009). A heterogeneidade estatística entre os resultados disponíveis não é favorável à sua agregação, apesar de terem sido feitas tentativas nesse sentido (Garcia et al. 2008). Além disso, existem algumas evidências de viés de publicação. Não foi em geral efectuado o controlo de

possíveis factores de confusão resultantes de outras exposições ocupacionais. Até ao presente, apenas se encontra disponível um estudo residencial que indica um maior risco de doença de Alzheimer após exposição prolongada, mas este baseia-se num número muito reduzido de casos (Huss et al. 2009).

Os estudos que investigaram a associação entre a exposição a baixas frequências e a doença de Alzheimer são inconsistentes. De um modo geral, é inconclusiva a existência de qualquer evidência de uma associação entre a exposição a baixas frequências e a doença de Alzheimer tal como com a ELA.

Doenças cardiovasculares. Estudos experimentais da exposição a curto e longo prazo indicam que, enquanto o choque eléctrico constitui um risco óbvio para a saúde, outros efeitos de risco cardiovascular associados a campos de baixa frequência têm uma probabilidade de ocorrência muito reduzida sob níveis de exposição que normalmente encontramos a nível ambiental ou ocupacional (OMS 2007a). Apesar de a literatura apresentar várias alterações cardiovasculares, a maioria dos efeitos são reduzidos e os resultados não são consistentes *intra* ou *inter* estudos (McNamee et al. 2009). Na maioria dos estudos de morbilidade e mortalidade por doença cardiovascular não foi demonstrada qualquer associação à exposição (Kheifets et al. 2007). A eventual existência de uma associação específica entre a exposição e alteração do controlo autónomo do coração, é algo que ainda não foi demonstrado. De um modo geral, as evidências não sugerem uma associação entre a exposição a baixa frequência e as doenças cardiovasculares.

Reprodução e desenvolvimento humano. De um modo geral, estudos epidemiológicos não demonstraram uma associação entre resultados adversos no aparelho reprodutor humano e a exposição materna ou paterna a campos de baixa frequência. Existem algumas evidências limitadas para um maior risco de aborto associado à exposição materna a campos magnéticos, mas esta associação reportada não se encontra descrita noutros estudos e, de um modo geral, as evidências que apontam para esta associação são fracas.

As exposições a campos eléctricos de baixa frequência até 150 kV m⁻¹ foram avaliadas em diversas espécies mamíferas, incluindo estudos com grupos alargados e exposição ao longo de várias gerações; os resultados demonstram, de forma consistente, a inexistência de efeitos adversos no desenvolvimento humano (ICNIRP 2003a; OMS 2007a).

A exposição de mamíferos a campos magnéticos de baixa frequência não resulta em deformações externas, viscerais ou esqueléticas graves numa exposição em campos até 20 mT (Juutilainen 2003, 2005; OMS 2007a). De um modo geral, é muito fraca a associação entre a baixa frequência e os efeitos na reprodução e no desenvolvimento humano.

Cancro. Um número considerável de relatórios epidemiológicos, realizados sobretudo nos anos 80 e 90, indicaram que a exposição a longo prazo a campos magnéticos de 50–60 Hz, com ordens de grandeza abaixo dos limites das linhas de orientação da ICNIRP de 1998, poderia estar associada ao cancro.

Ao passo que os primeiros estudos observaram a relação entre o cancro infantil e os campos magnéticos, pesquisas posteriores investigaram também o cancro em adultos. Em geral, as associações observadas inicialmente entre os campos magnéticos de 50–60 Hz e vários tipos de cancro não foram confirmadas em estudos destinados a verificar se as observações iniciais poderiam ser replicadas. Contudo, no caso da leucemia infantil, a situação é diferente. A investigação que se seguiu ao primeiro estudo sugeriu que poderá existir uma associação fraca entre os níveis mais elevados de exposição a campos magnéticos residenciais de 50–60 Hz e o risco de leucemia infantil, apesar de existirem dúvidas quanto ao facto de a sua relação ser causal: uma combinação de enviesamento na selecção, algum grau de factores de confusão e o acaso poderão explicar os resultados alcançados (OMS 2007a). Duas análises agregadas (Ahlbom et al. 2000; Greenland et al. 2000) indicam que poderá existir um risco acrescido para exposições com uma média que exceda 0,3–0,4 μ T, apesar de os autores dessas análises alertarem fortemente para o facto de os seus resultados não poderem ser interpretados como demonstração de uma relação causal entre os campos magnéticos e a leucemia infantil.

Acresce que não foi identificado qualquer mecanismo biofísico e que os resultados experimentais dos estudos laboratoriais celulares e em animais não sustentam a ideia de que a exposição a campos magnéticos de 50-60 Hz seja uma causa de leucemia infantil.

Deverá considerar-se que, actualmente, não existe um modelo animal adequado para a forma mais comum de leucemia infantil, a leucemia linfoblástica aguda. A maior parte dos estudos registou a inexistência de efeitos derivados da exposição a campos magnéticos de 50–60 Hz na leucemia ou linfoma em roedores (ICNIRP 2003a; OMS 2007a). Vários estudos em larga escala e a longo prazo em roedores não demonstraram qualquer aumento consistente em nenhum tipo de cancro, nomeadamente tumores hematopoiéticos, mamários, cerebrais ou cutâneos.

Um número significativo de estudos analisou os efeitos derivados da exposição a campos magnéticos de 50–60Hz nos tumores mamários quimicamente induzidos em ratos (ICNIRP 2003a; OMS 2007a). Foram obtidos resultados inconsistentes que se poderão dever, total ou parcialmente, a diferenças nos protocolos experimentais, como por exemplo a utilização de sub-estirpes específicas. A maioria dos estudos no âmbito dos efeitos derivados da exposição a campos magnéticos de 50–60Hz na leucemia/linfoma quimicamente induzida ou induzida através de radiação registaram resultados negativos. Os estudos de lesões pré-neoplásicas no fígado, tumores cutâneos quimicamente induzidos, e tumores cerebrais registaram resultados predominantemente negativos.

De um modo geral, os estudos relativos aos efeitos da exposição de células a campos de baixa frequência não demonstraram qualquer indução de genotoxicidade em campos abaixo de 50 mT (Crumpton and Collins 2004; OMS 2007a). Em comparação com as evidências epidemiológicas de uma associação entre a leucemia infantil e a exposição prolongada a campos magnéticos à frequência industrial, os dados relativos ao cancro em

animais, sobretudo os dados de estudos em larga escala e de longa duração, são quase universalmente negativos. Os dados resultantes de estudos em células estão, geralmente, em concordância com os estudos em animais, embora sejam mais equívocos.

Fundamentação para as presentes linhas de orientação recomendadas para as baixas frequências

Nas presentes linhas de orientação a ICNIRP trata dos efeitos agudos e crónicos sobre a saúde e tem em conta os desenvolvimentos dosimétricos mais recentes.

Efeitos agudos. Existem vários efeitos agudos devidamente comprovados em resultado da exposição do sistema nervoso a campos electromagnéticos (CEM) de baixa frequência: a estimulação directa dos nervos e do tecido muscular e a indução de fosfenos na retina. Existem igualmente evidências científicas indirectas de que as funções cerebrais como o processamento visual e a coordenação motora podem ser temporariamente afectadas por campos electricamente induzidos. Todos estes efeitos possuem limites abaixo dos quais não ocorrem e podem ser evitados se forem respeitadas as limitações básicas sobre campos eléctricos induzidos no corpo.

Na sequência das recomendações efectuadas relativas às linhas de orientação sobre limites de exposição a campos electromagnéticos estáticos (ICNIRP 2009), a ICNIRP considera que existem circunstâncias profissionais nas quais, com o aconselhamento e a formação adequados, é razoável que trabalhadores devidamente informados e que aceitem essa situação, sintam efeitos temporários como fosfenos na retina e a possibilidades de alteração reduzidas em algumas funções cerebrais, uma vez que se pensa que estas alterações não originam efeitos para a saúde patológicos ou de longo prazo. A exposição de todas as partes do corpo nestas circunstâncias deverá ser limitada de forma a evitar estimulação das fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso central e periférico. A ICNIRP faz notar a margem relativamente estreita entre o limiar de percepção dos nervos periféricos e o limiar de dor; ver supra. Para ambos os tipos de nervos, os limiares atingem superiormente 1 a 3 kHz devido às constantes de tempo muito pequenas das membranas resultantes da mielinização e inferiormente cerca de 10 Hz devido à adaptação a estímulos de despolarização lenta.

Evitar os fosfenos da retina deverá proteger contra quaisquer possíveis efeitos sobre a função cerebral. Os limiares dos fosfenos estão no mínimo em torno dos 20Hz e aumentam rapidamente sob frequências mais elevadas e mais baixas, cruzando-se com os limiares de estimulação do sistema nervoso periférico e central, no ponto em que os limiares à estimulação do sistema nervoso periférico se aplicam. Para os trabalhadores que não possuem a formação adequada, que podem não estar informados sobre esta questão e que não controlam o seu nível de exposição, a limitação básica é definida no limiar dos fosfenos, de forma a evitar os efeitos transitórios mas potencialmente perturbadores da exposição. Para os membros do público em geral aplica-se ao limite de fosfenos um factor de redução de 5.

A exposição a campos eléctricos de baixa frequência causa respostas biológicas bem definidas através dos efeitos de cargas eléctricas superficiais. A prevenção dos efeitos dolorosos das cargas eléctricas superficiais induzidas no corpo por essa mesma exposição é efectuada através dos níveis de referência.

Efeitos crónicos. A literatura sobre os efeitos crónicos dos campos de baixa frequência foi avaliada de forma detalhada por cientistas e painéis científicos. O organismo da OMS para a investigação do cancro, a IARC (Agência Internacional de Investigação do Cancro) avaliou os campos magnéticos de baixa frequência em 2002 e classificou-os na categoria 2 B, o que significa “possivelmente cancerígenos para os seres humanos”. A fundamentação para esta classificação resultou dos resultados epidemiológicos sobre a leucemia infantil.

É opinião da ICNIRP que as evidências científicas actualmente existentes de que a exposição prolongada a campos magnéticos de baixa frequência está causalmente relacionada com o aumento do risco de leucemia são demasiado fracas para poderem constituir um elemento de fundamentação das linhas de orientação básicas sobre a exposição. Em especial, se a relação não é causal, a redução da exposição não proporciona qualquer benefício para a saúde.

Dosimetria. Historicamente, a modelização dos campos magnéticos considerou que o corpo possui uma condutividade homogénea e isotrópica e aplicou modelos constituídos por circuitos condutores fechados simples para estimarem as correntes induzidas nos diferentes órgãos e zonas do corpo. Os campos eléctricos induzidos por campos electromagnéticos variáveis ao longo do tempo foram calculados utilizando modelos elipsoidais homogéneos simples. Nos últimos anos, cálculos mais realistas baseados em modelos heterogéneos mais apurados em termos anatómicos e eléctricos (Xi e Stuchly 1994; Dimbylow 2005, 2006; Bahr et al. 2007) deram origem a um conhecimento muito mais aprofundado dos campos eléctricos internos no corpo resultantes da exposição a campos eléctricos e magnéticos.

Os resultados dosimétricos mais úteis para os objectivos das presentes linhas de orientação foram obtidos a partir de cálculos de alta resolução do campo eléctrico induzido com dimensões de voxel abaixo de 4 mm (Dimbylow 2005; Bahr et al. 2007; Hirata et al. 2009; Nagaoka et al. 2004). O campo eléctrico máximo é induzido no corpo quando os campos externos são homogéneos e têm uma direcção paralela (campo-E) ou perpendicular (campo H) ao eixo do corpo. De acordo com esses cálculos, o pico máximo do campo eléctrico induzido por um campo magnético de 50 Hz no cérebro é de aproximadamente 23–33 mV m⁻¹ por mT, dependendo da orientação do campo e do modelo do corpo. No presente não está disponível qualquer factor de conversão para o tecido nervoso periférico. Assim, a pele, que contém terminações do tecido nervoso periférico, foi escolhida como o tecido alvo representativo da situação mais desfavorável. O campo

eléctrico induzido na pele por um tal campo é aproximadamente de 20–60 mV m⁻¹ por mT. O campo eléctrico local máximo induzido no cérebro por um campo eléctrico de 50 Hz é de, aproximadamente, 1,7–2,6 mV m⁻¹ por kV m⁻¹, enquanto que na pele é de, aproximadamente, 12–33 mV m⁻¹ por kV m⁻¹.

Tendo em conta as incertezas na dosimetria disponível bem como a influência dos parâmetros corporais na dedução dos níveis de referência, a ICNIRP assume uma abordagem conservadora na determinação dos níveis de referência a partir das limitações básicas.

LINHAS DE ORIENTAÇÃO PARA LIMITAR A EXPOSIÇÃO A CEM

É apresentada uma orientação separada para a exposição ocupacional e para a exposição do grande público. Nestas linhas de orientação a exposição ocupacional refere-se a adultos expostos, nos seus locais de trabalho, a campos magnéticos e eléctricos, variáveis ao longo do tempo, entre 1 Hz e 10 MHz, normalmente sob condições conhecidas, e em resultado da execução das suas tarefas e funções profissionais habituais. Em contraste, a expressão população em geral, refere-se às pessoas de todas as idades e com um estado de saúde variado que pode aumentar a variabilidade das susceptibilidades individuais. Em muitos casos, os membros do público não estão cientes da sua exposição a CEM. Estas considerações sublinham a necessidade da adopção de limitações à exposição mais exigentes para o público que para os trabalhadores quando estão expostos num enquadramento profissional.

Tratamento da incerteza científica

Todos os dados científicos e a respectiva interpretação estão sujeitos a algum grau de incerteza. São exemplos desse facto a variabilidade metodológica e as diferenças inter-indivíduos, inter-espécies e inter-estirpes. Essas incertezas no conhecimento são compensadas através de factores de redução.

Existe, no entanto, informação insuficiente sobre todas as fontes de incerteza que nos impede de ter uma base rigorosa para definir factores de redução em toda a gama de frequências e para todos os padrões de modulação. Dessa forma, o grau de ponderação a aplicar na interpretação da base de dados disponível e na definição dos factores de redução é, em grande medida, uma questão de avaliação pericial.

Limitações básicas e níveis de referência

As limitações à exposição que se baseiam nas grandezas físicas directamente relacionadas com os efeitos estabelecidos sobre a saúde são designadas limitações básicas. Nestas linhas de orientação, a grandeza física utilizada para especificar a limitação básica à exposição a CEM é a intensidade do campo eléctrico interno E_i , uma vez que é o campo eléctrico que afecta as células nervosas e outras células electricamente sensíveis.

A intensidade do campo eléctrico interno é difícil de avaliar. Portanto, para o efeito prático de avaliação da exposição, são fornecidos níveis de referência de exposição.

A maior parte dos níveis de referência resulta das limitações básicas aplicáveis utilizando técnicas de medição e/ou computacionais mas alguns envolvem a percepção (campo eléctrico) e efeitos adversos indirectos da exposição a CEM. As grandezas resultantes são a intensidade do campo eléctrico (E), a intensidade do campo magnético (H), a densidade do fluxo magnético (B) e as correntes que circulam através dos membros (I_L). A grandeza que trata os efeitos indirectos é a corrente de contacto (I_C). Em qualquer situação particular de exposição, os valores medidos ou calculados de qualquer uma destas grandezas podem ser comparados com o nível de referência adequado. O cumprimento do nível de referência irá garantir o cumprimento da limitação básica em causa. Se o valor medido ou calculado ultrapassar o nível de referência, não se infere daí necessariamente que a limitação básica será ultrapassada. No entanto, sempre que um nível de referência é ultrapassado é necessário testar o cumprimento da limitação básica aplicável e apurar se é necessário tomar medidas adicionais de protecção.

LIMITAÇÕES BÁSICAS

O principal objectivo desta publicação é estabelecer linhas de orientação para limitar a exposição a campos eléctricos e magnéticos (CEM) de forma a garantir protecção contra efeitos adversos para a saúde. Tal como se refere acima, os riscos têm origem na resposta transitória do sistema nervoso, incluindo a estimulação do sistema nervoso periférico (SNP) e do sistema nervoso central (SNC), a indução de fosfenos na retina e possíveis efeitos sobre alguns aspectos da actividade cerebral.

Tendo em conta as considerações apresentadas supra para a gama de frequências de 10 Hz a 25 Hz a exposição ocupacional deverá ser limitada aos campos que induzem intensidades de campos eléctricos no tecido do SNC na cabeça (ou seja, no cérebro e na retina) inferiores a 50 mV m^{-1} de forma a evitar a indução de fosfenos na retina. Estas limitações deverão igualmente evitar quaisquer possíveis efeitos temporários sobre a função cerebral. Estes efeitos não são considerados efeitos adversos para a saúde; no entanto a ICNIRP reconhece que podem ser perturbadores em algumas circunstâncias profissionais e deverão ser evitados mas não é aplicado nenhum factor adicional de redução. Os limiares para os fosfenos aumentam rapidamente em frequências mais elevadas e mais baixas, cruzando-se com os limiares para a estimulação das fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso central e periférico a 400 Hz. Em frequências acima dos 400 Hz, os limites sobre a estimulação dos nervos periféricos aplicam-se em todas as zonas do corpo.

A exposição em ambientes controlados, nos quais os trabalhadores são informados sobre a possibilidade de verificação de efeitos transitórios dessa mesma exposição, deverá ser limitada aos campos que induzem campos eléctricos na cabeça e no corpo inferiores a 800 mV m^{-1} de forma a evitar estimulação das fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso central e periférico. Foi aplicado um factor de redução de 5 ao limite de fosfenos de 4 V m^{-1} de forma a ter em conta as incertezas acima descritas. Estas limitações aumentam acima dos 3 kHz.

Para o tecido do SNC da cabeça no público em geral

é aplicado um factor de redução de 5, o que resulta numa limitação básica de 10 mV m^{-1} entre 10 e 25 Hz. Acima e abaixo destes valores, as limitações básicas aumentam. A 1.000 Hz cruza-se com as limitações básicas que protegem contra a estimulação das fibras nervosas mielínicas do sistema nervoso central e periférico. Aqui, o factor de redução de 10 origina uma limitação básica de 400 mV m^{-1} , que deverá ser aplicada aos tecidos de todas as partes do corpo.

As limitações básicas são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 1.

Determinação da média ao longo do tempo

A ICNIRP recomenda que as limitações aos campos eléctricos internos induzidos por campos eléctricos ou magnéticos incluindo campos de “pico” transitórios ou de duração muito curta sejam vistos como valores instantâneos que não devem ser objecto de conversão para valores médios ao longo do tempo (ver também o capítulo sobre exposição não-sinusoidal).

Determinação da média espacial dos campos eléctricos induzidos

Ao limitar os efeitos adversos dos campos eléctricos induzidos às células e redes do sistema nervoso, é importante definir a distância ou o volume ao longo dos quais têm de ser calculados os valores médios do campo eléctrico induzido. Como um compromisso prático, satisfazendo os requisitos para uma base biológica correcta e tendo em conta as restrições computacionais, a ICNIRP recomenda a determinação do campo eléctrico induzido como uma média vectorial do campo eléctrico num pequeno volume de tecido contíguo de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. Para um tecido específico, um percentil de 99% do campo eléctrico é o valor a ter em conta para ser comparado com a limitação básica.

Tabela 2. Limitações básicas para exposição de seres humanos a campos magnéticos e eléctricos variáveis ao longo do tempo.

Características da exposição	Gama de frequências	Campo eléctrico interno (V m^{-1})
Exposição ocupacional		
Tecido do SNC da cabeça	1-10 Hz	0,5/f
	10 Hz-25 Hz	0,05
	25 Hz-400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
	400 Hz-3 kHz	0,8
Todos os tecidos da cabeça e do corpo	3 kHz-10 MHz	$2,7 \times 10^{-4}f$
	1 Hz-3 kHz	0,8
Exposição do público em geral		
Tecido do SNC da cabeça	1-10 Hz	0,1/f
	10 Hz-25 Hz	0,01
	25 Hz-1000 Hz	$4 \times 10^{-4}f$
	1000 Hz-3 kHz	0,4
	3 kHz-10 MHz	$1,35 \times 10^{-4}f$
Todos os tecidos da cabeça e do corpo	1 Hz-3 kHz	0,4
	3 kHz-10 MHz	$1,35 \times 10^{-4}f$

Notas:

- f é a frequência em Hz.
- Todos os valores são rms.
- Na gama de frequências acima dos 100 kHz, as restrições básicas específicas de RF têm de ser tidas em conta adicionalmente.

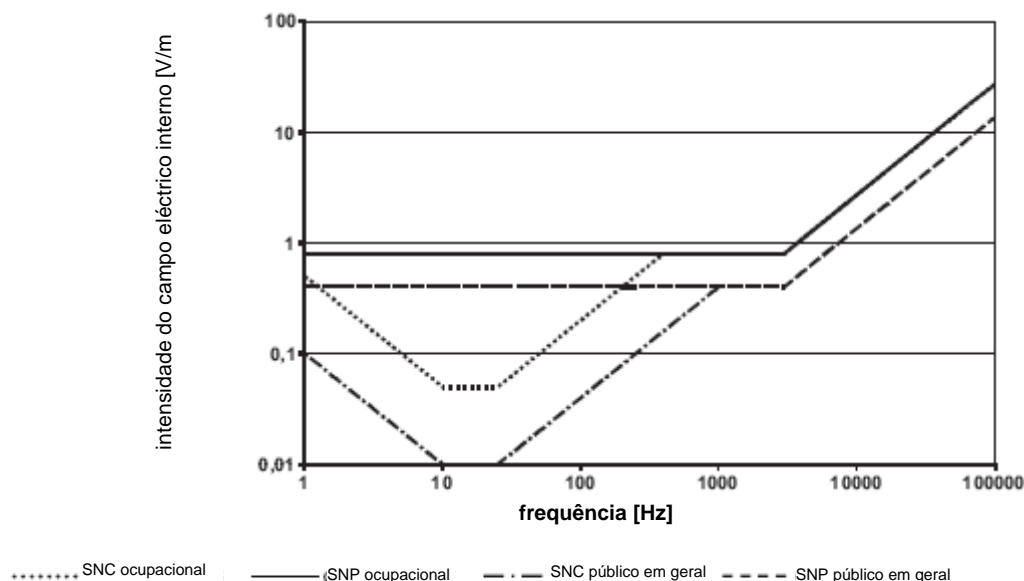


Fig. 1 Limitações básicas para o público em geral e para a exposição ocupacional em termos de intensidade do campo eléctrico interno relativamente aos efeitos sobre o sistema nervoso central (SNC) e o sistema nervoso periférico (SNP).

Basicamente os efeitos do campo eléctrico sobre os neurónios e sobre outras células electricamente excitáveis são efeitos locais, mas existem factores electrofisiológicos e dosimétricos práticos que limitam o volume ou distância mínimos. O principal factor físico que perturba o funcionamento dos neurónios e das redes neuronais é a tensão gerada pelo campo eléctrico induzido sobre a membrana da célula. Para as fibras nervosas alinhadas ao longo das linhas de força do campo eléctrico (acoplamento máximo) esta tensão é integrada a partir do campo eléctrico ao longo da distância eletrotónica que varia entre 2 e 7 milímetros para os nervos dos invertebrados (Reilly 1998; Reilly e Diamant 2003). Para as células nervosas miélicas uma boa base para a distância de integração é cerca de 2mm, que é a distância internodal máxima entre os nós de Ranvier. Estas distâncias são relevantes na análise dos limiares de estimulação para células nervosas isoladas. No caso dos efeitos dos campos eléctricos fracos abaixo do limiar, como os fosfenos na retina, tem de ser tido em conta o efeito colectivo “de rede” resultante da interacção de numerosas células nervosas. O limiar do efeito é consideravelmente inferior ao limiar de estimulação de células nervosas isoladas, o que se deve à soma e integração de pequenas tensões induzidas nas sinapses. Foi sugerido que o volume médio do campo eléctrico induzido deveria basear-se num número mínimo de 1.000 células em interacção, o que é cerca de 1 mm³ na maior parte do tecido nervoso (Jefferys 1994). Assim, uma distância para a definição da média que seja biologicamente razoável poderia ir de 1 a 7 mm. De um ponto de vista prático, é difícil alcançar uma precisão satisfatória no cálculo do campo eléctrico induzido com

uma resolução milimétrica, e é ainda mais difícil medi-lo. Os valores máximos de um voxel num tecido específico são propensos a grandes erros resultantes da discretização, associados aos cantos angulosos no voxel cúbico. Uma solução para obter aproximações mais estáveis aos valores de pico baseia-se na escolha de um valor dentro do percentil de 99% do campo induzido num tecido específico para o valor de pico. No entanto, do ponto de vista biológico, esta é uma opção de certa forma arbitrária porque o valor de pico depende da resolução. Uma outra opção para a determinação da média espacial consiste na definição do campo eléctrico local como uma média num pequeno volume ou ao longo de um segmento linear (Reilly e Diamant 2003).

Regra geral, o volume para determinação da média não se deverá alargar para além dos limites do tecido excepto para tecidos como a retina e a pele, que são demasiado finos para cobrirem todo o cubo de cálculo da média. Para a pele pode ser assumido o mesmo volume médio de 2 × 2 × 2 mm³, e pode ser alargado para o tecido subcutâneo. Para a retina o volume para determinação da média pode ser alargado para os tecidos em frente e por detrás da retina.

NÍVEIS DE REFERÊNCIA

Os níveis de referência são obtidos a partir das limitações básicas através de modelação matemática utilizando dados publicados (Dimbylow 2005, 2006). São calculados para uma situação de acoplamento máximo do campo ao indivíduo exposto, proporcionando deste modo uma protecção máxima. Foram tidas em conta a dependência da frequência e as incertezas dosimétricas.

Os níveis de referência apresentados têm em conta dois efeitos distintos e aproximam uma combinação dos campos eléctricos induzidos no cérebro, relevante para efeitos no SNC, e os campos eléctricos induzidos em tecidos não pertencentes ao SNC em qualquer parte do corpo, relevante para efeitos no SNP (i.e., a 50 Hz, o factor utilizado para converter a limitação básica para os efeitos sobre o SNC de uma exposição a um campo magnético externo é de 33 V m^{-1} por T, e para os efeitos sobre o SNP é de 60 V m^{-1} por T. Foi aplicado um factor de redução adicional de 3 aos valores assim calculados para ter em conta a incerteza dosimétrica).

Adicionalmente, o nível de referência do campo eléctrico para a exposição ocupacional até 25 Hz inclui uma margem suficiente para evitar os efeitos da estimulação por correntes de contacto para a maior parte das condições práticas verificadas. Entre 25 Hz e 10 MHz os níveis de referência são baseados exclusivamente na limitação básica sobre campos eléctricos induzidos e poderá, pois, não fornecer uma margem suficiente para evitar os efeitos da estimulação provocada por correntes de contacto sob todas as condições possíveis nessa banda de frequências.

Os níveis de referência para campos eléctricos para a exposição do público em geral até 10 MHz evitam efeitos indirectos adversos (choques e queimaduras) para mais de 90% das pessoas expostas. Adicionalmente, os níveis de referência dos campos eléctricos para a exposição ao público em geral até 50 Hz incluem uma margem suficiente para evitar na maior parte das pessoas os efeitos de cargas eléctricas superficiais tais como a percepção.

As Tabelas 3 e 4 resumem os níveis de referência para a exposição ocupacional e para o grande público, respectivamente, e os níveis de referências são ilustrados nas Figuras 2 e 3. Os níveis de referência assumem uma exposição por um campo uniforme (homogéneo) relativamente à extensão espacial do corpo humano.

Determinação da média espacial de campos electromagnéticos externos

Os níveis de referência foram determinados para as condições de exposição em que a variação do campo eléctrico ou magnético no espaço ocupado pelo corpo é relativamente pequena.

Tabela 3. Níveis de referência para a exposição ocupacional a campos electromagnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado).

Gama de frequências	Intensidade do campo eléctrico E (kV m ⁻¹)	Intensidade do campo magnético H (A m ⁻¹)	Densidade do fluxo magnético B (T)
1 Hz–8 Hz	20	$1,63 \times 10^3/f^2$	$0,2/f^2$
8 Hz–25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz–3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2,4 \times 10^5/f$	$0,3/f$
3 kHz–10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	1×10^{-4}

Notas:

- f é a frequência em Hz.
- Ver secções separadas abaixo para aconselhamento sobre exposição não sinusoidal e exposição a frequências múltiplas.
- Para evitar efeitos indirectos, especialmente em campos eléctricos intensos, ver capítulo sobre "Medidas de protecção".

- Na gama de frequências acima dos 100 kHz, os níveis de referência específicos de RF têm de ser tidos em conta adicionalmente.

Tabela 4. Níveis de referência para a exposição do público em geral a campos eléctricos e magnéticos variáveis ao longo do tempo (valores rms de campo não perturbado).

Gama de frequências	Intensidade do campo eléctrico E (kV m ⁻¹)	Intensidade do campo magnético H (Am ⁻¹)	Densidade do fluxo magnético B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
50 Hz–400 Hz	$2,5 \times 10^2/f$	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
400 Hz–3 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$6,4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz–10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

Notas:

- f é a frequência em Hz.
- Ver secções separadas abaixo para aconselhamento sobre exposição não sinusoidal e exposição a frequências múltiplas.
- Na gama de frequências acima dos 100 kHz, os níveis de referência específicos de RF têm de ser tidos em conta adicionalmente.

No entanto, na maior parte dos casos, a distância até à fonte do campo é tão reduzida que a distribuição do campo é não uniforme ou localizada numa pequena parte do corpo. Nesses casos, a medida da intensidade máxima do campo na posição espacial ocupada pelo corpo resulta sempre numa avaliação da exposição segura, apesar de muito conservadora.

Para uma fonte muito localizada a uma distância de poucos centímetros do corpo, a única opção realista para a avaliação da exposição é determinar dosimetricamente o campo eléctrico induzido, caso a caso. Quando a distância ultrapassa os 20 cm, a distribuição do campo torna-se menos localizada mas continua a ser não uniforme, caso em que é possível determinar a média espacial ao longo do corpo ou parte do mesmo (Stuchly e Dawson 2002; Jokela 2007). A média espacial não deverá ultrapassar o nível de referência. A exposição local pode ultrapassar o nível de referência mas, e este é um ponto muito importante, a limitação básica não poderá ser ultrapassada. É uma competência dos organismos de normalização fornecer normas adicionais sobre situações de exposição específicas em que a determinação da média espacial pode ser aplicada. Esta orientação terá de ser baseada numa dosimetria bem estabelecida. Os organismos de normalização podem igualmente apresentar novos níveis de referência para tipos especiais de exposição não uniforme.

Cumulatividade da exposição a campos eléctricos e a campos magnéticos

Cada um dos campos eléctricos e magnéticos induz uma componente de campo eléctrico no tecido, as quais se somam vectorialmente. No caso da análise da exposição baseada nos campos eléctricos e magnéticos externos, uma abordagem conservadora seria assumir que tanto as componentes do campo magnético como do campo eléctrico induzidos atingem o valor máximo no mesmo ponto crítico e em fase. Isto implicaria que as exposições aos campos eléctricos e magnéticos externos seriam cumulativas (Cech et al. 2008).

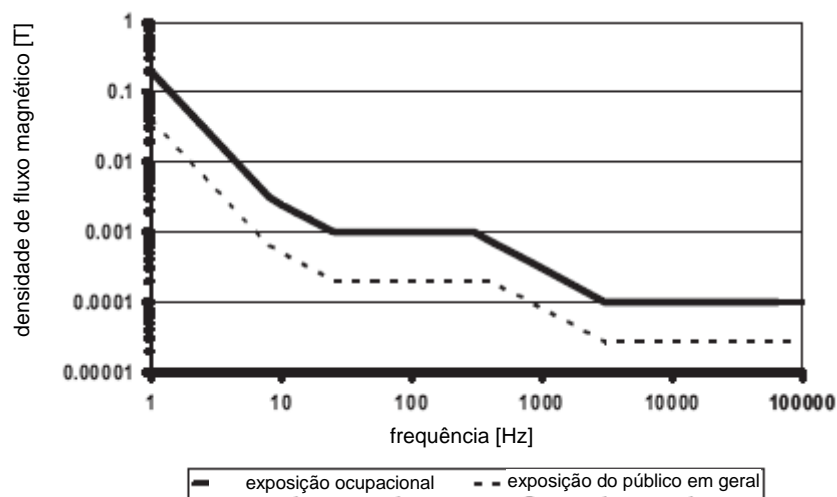


Figura 2. Níveis de referência para a exposição a campos magnéticos variáveis ao longo do tempo (compare com as Tabelas 3 e 4).

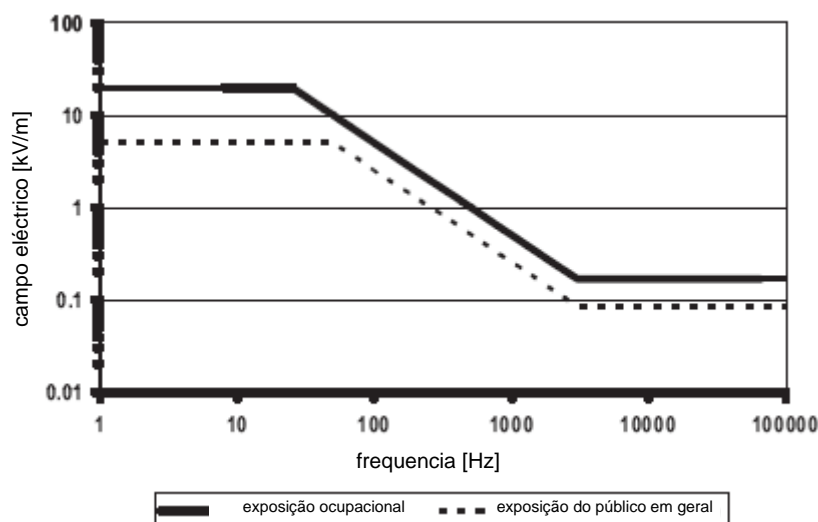


Figura 3. Níveis de referência para a exposição a campos eléctricos variáveis ao longo do tempo (compare com as Tabelas 3 e 4).

Pensa-se, no entanto, que estas situações, são muito pouco frequentes tendo em conta a grande diferença na distribuição dos campos eléctricos induzidos eléctrica e magneticamente.

NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA CORRENTES DE CONTACTO

São apresentados os níveis de referência para a corrente de contacto até aos 10 MHz com a finalidade de evitar o risco de choque eléctrico e de queimaduras. Os níveis de referência para o ponto de contacto são apresentados na tabela 5. Uma vez que os limiares para as correntes de contacto que desencadeiam respostas biológicas em crianças são aproximadamente metade dos limiares para os homens adultos, os níveis de referência para a corrente de contacto para o público em geral foram reduzidos por um factor de 2, face aos valores da exposição ocupacional. Deveremos notar que os níveis de referência não se destinam a evitar a percepção mas sim a evitar choques eléctricos dolorosos.

Tabela 5. Níveis de referência para correntes de contacto variáveis ao longo do tempo em objectos condutores.

Características da exposição	Gama de frequência	Corrente máxima de contacto (mA)
Exposição ocupacional	Até 2,5 kHz	1.0
	2,5–100 kHz	$0,4f$
	100 kHz–10 MHz	40
Exposição para o público em geral	Até 2,5 kHz	0.5
	2,5–100 kHz	$0,2f$
	100 kHz–10 MHz	20

Nota: f é a frequência em kHz.

A percepção da corrente de contacto não é por si só perigosa mas pode ser considerada um incómodo. É possível efectuar a prevenção de correntes de contacto excessivas através de meios técnicos.

EXPOSIÇÃO SIMULTÂNEA A CAMPOS DE FREQUÊNCIA MÚLTIPLA

É importante determinar se, em situações de exposição simultânea a campos de diferentes frequências, estas exposições são cumulativas em termos de efeitos. As fórmulas abaixo aplicam-se a frequências relevantes em situações de exposição práticas. No que respeita à estimulação eléctrica, relevante para frequências até 10 MHz, os campos eléctricos internos devem ser adicionados de acordo com a seguinte fórmula:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

em que E_{ij} corresponde à intensidade do campo eléctrico interno induzida à frequência j , e $E_{L,j}$ corresponde à restrição da intensidade do campo eléctrico induzido à frequência j conforme indicado na Tabela 2.

Para a aplicação prática das limitações básicas, devem aplicar-se os seguintes critérios relativos aos níveis de referência das intensidades dos campos:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

e

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

em que

E_j = intensidade do campo eléctrico à frequência j ;
 $E_{R,j}$ = nível de referência da intensidade do campo eléctrico à frequência j conforme indicado nas Tabelas 3 e 4;
 H_j = intensidade do campo magnético à frequência j ;
 $H_{R,j}$ = nível de referência da intensidade do campo magnético à frequência j conforme indicado nas Tabelas 3 e 4.

Para a corrente nos membros e para a corrente de contacto, devem aplicar-se, respectivamente, os seguintes requisitos:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_j}{I_{L,j}} \leq 1 \quad (6)$$

em que I_j corresponde à componente da corrente de contacto à frequência j , e $I_{L,j}$ ao nível de referência da corrente de contacto à frequência j conforme indicado na Tabela 5.

EXPOSIÇÃO NÃO SINUSOIDAL

A baixas frequências, abaixo dos 100 kHz, os campos eléctricos e, sobretudo, os magnéticos são, na maioria dos casos, distorcidos por componentes harmónicas distribuídas ao longo de uma banda de frequência ampla. Consequentemente, as formas de onda dos campos mostram padrões complexos e constituídos, muitas vezes, por impulsos. É sempre possível decompor um campo desse tipo em componentes espectrais discretas através de, por exemplo, técnicas de

Transformada de Fourier (TF) e da aplicação da regra de frequência múltipla acima descrita. Este procedimento baseia-se na suposição de que as componentes espectrais se somam em fase, ou seja, todos os máximos coincidem ao mesmo tempo o que resulta num pico pronunciado. Trata-se de uma suposição realista quando o número de componentes espectrais é limitado e as suas fases não são coerentes, ou seja, variam aleatoriamente. No caso de fases coerentes fixas, a suposição poderá ser desnecessariamente conservadora. Além disso, a amostragem e filtragem na análise espectral por TF poderá criar frequências espúrias, o que poderá aumentar, de forma artificial, o rácio de exposição obtido por soma linear.

Uma opção alternativa ao método espectral consiste na ponderação dos campos eléctricos e magnéticos exteriores, do campo eléctrico induzido e da corrente induzida com uma função de filtro que está relacionada com a restrição básica ou com o nível de referência (ICNIRP 2003b; Jokela 2000). No caso de um campo de banda larga constituído por componentes harmónicos, a restrição imposta pela filtragem pode traduzir-se matematicamente da seguinte forma:

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \phi_i) \right| \leq 1 \quad (7)$$

em que t corresponde ao tempo e EL_i corresponde ao limite de exposição na i -ésima frequência harmónica f_i , sendo A_i , θ_i , ϕ_i , as amplitudes do campo, ângulos de fase do campo e ângulos de fase do filtro nas frequências harmónicas. À excepção dos ângulos de fase, a equação é semelhante aos somatórios (3), (4) e (5). No anexo informativo (Anexo) encontrará mais informações relativas à implementação prática da ponderação (definição do pico ponderado de exposição).

MEDIDAS DE PROTECÇÃO

A ICNIRP salienta que a protecção das pessoas expostas a campos eléctricos e magnéticos pode ser garantida se forem cumpridos todos os aspectos destas linhas de orientação.

As medidas que visam a protecção dos trabalhadores incluem o controlo de engenharia, controlo administrativo e programas de protecção pessoal. Devem ser implementadas medidas de protecção adequadas quando os resultados da exposição no local de trabalho determinarem que os limites básicos estão a ser ultrapassados. Como primeiro passo, e sempre que possível, devem ser levados a cabo controlos de engenharia com vista a reduzir as emissões de campos nos equipamentos para níveis aceitáveis. Esses controlos incluem um bom *design* de segurança e, quando necessário, a utilização de enclavamentos ou mecanismos semelhantes tendo em vista a protecção da saúde.

Os controlos administrativos, tais como a limitação de acessos e a utilização de avisos sonoros e visuais, devem ser usados em conjunto com os controlos de engenharia. As medidas de protecção pessoal, tais como vestuário de protecção, apesar de útil em algumas situações, devem ser consideradas como um último recurso para garantir a segurança do trabalhador, devendo a prioridade ser dada, sempre que possível, aos controlos de engenharia e aos controlos administrativos.

Além disso, quando se utilizam determinados artigos, tais como luvas isoladas, para proteger os trabalhadores do risco de choque, não se deverão ignorar as restrições básicas, uma vez que o isolamento protege apenas contra os efeitos indirectos dos campos.

À excepção do vestuário de protecção e de outros equipamentos de protecção pessoal, as mesmas medidas podem ser aplicadas à população em geral, sempre que exista a possibilidade de os níveis de referência aplicáveis serem ultrapassados. É também essencial definir e implementar regras que evitem:

- a interferência com equipamentos e instrumentos médicos electrónicos (incluindo *pacemakers* cardíacos),
- a detonação de aparelhos electro-explosivos (detonadores); e
- incêndios e explosões resultantes da ignição de materiais inflamáveis por faíscas causadas por campos induzidos, correntes de contacto ou descargas eléctricas.

CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A POSSÍVEIS EFEITOS A LONGO PRAZO

Tal como foi indicado acima, os estudos epidemiológicos demonstraram, de forma consistente, que a exposição quotidiana crónica de baixa intensidade (acima de 0,3–0,4 μT) a campos magnéticos à frequência industrial está associada a um aumento do risco de leucemia infantil. A IARC classificou estes campos como possivelmente cancerígenos. Contudo, não foi comprovada uma relação causal entre os campos magnéticos e a leucemia infantil nem foram comprovados quaisquer outros efeitos a longo prazo. A ausência de causalidade comprovada significa que este efeito não pode ser tratado pelas limitações básicas. Ainda assim, entidades como a Organização Mundial de Saúde (2007a e b) e outras têm vindo a emitir pareceres e recomendações adicionais sobre a gestão de riscos, incluindo considerações sobre medidas de precaução.

Agradecimentos - Agradecemos o apoio que a ICNIRP recebeu da Associação Internacional de Protecção contra Radiações, da Organização Mundial de Saúde, da Organização internacional do Trabalho, da Comissão Europeia e do Ministério Federal Alemão do Ambiente, da Protecção da Natureza e da Segurança Nuclear. A ICNIRP agradece ainda aos peritos consultores da ICNIRP e a todos os restantes revisores pelo seu contributo, recebido através da consulta aberta online.

Ao longo da preparação das presentes linhas de orientação, a composição da ICNIRP e do Grupo de Trabalho para as FEB no ICNIRP foi a seguinte:

ICNIRP

P. Vecchia, Presidente (Itália)
 M. Hietanen, Vice-Presidente até 2008 (Finlândia)
 R. Matthes, Vice-Presidente desde 2008 (Alemanha)
 A. Ahlbom até 2008 (Suécia)
 E. Breitbart até 2008 (Alemanha)
 F. R. de Gruijl até 2008 (Holanda)
 M. Feychting (Suécia)
 A. Green (Austrália)
 K. Jokela (Finlândia)
 J. Lin (EUA)

R. Saunders (Reino Unido)
 K. Schulmeister (Áustria)
 P. Söderberg (Suécia)
 B. Stuck (EUA)
 A. Swerdlow (Reino Unido)
 M. Taki até 2008 (Japão)
 B. Veyret (França)
 G. Ziegelberger, Secretário de Assuntos Científicos (Áustria)
 M. H. Repacholi, Presidente Emérito (Suíça)
Grupo de Trabalho para as FEB no ICNIRP
 R. Matthes (Alemanha), Presidente do Grupo de Trabalho
 A. Ahlbom (Suécia)
 K. Jokela (Finlândia)
 C. Roy (Austrália)
 R. Saunders (Reino Unido)

BIBLIOGRAFIA

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83:692–698; 2000.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system. *Radiat Protect Dosim* 106:341–348; 2003.
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. *Health Phys* 92:521–530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics* 31:173–179; 2010.
- Cech R, Leitgeb N, Padiaditis M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure. *Phys Med Biol* 53:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144–157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613–627; 2006.
- Crasson M. 50–60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crumpton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.
- Dimbylow PJ. Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 37:329–340; 2008.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. *Radiat Protect Dosim* 135:272–275; 2009.

- Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösl M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.
- International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. Lyon, France: IARC; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494–522; 1998.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys* 82:540–548; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100 kHz). In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B, eds. Review of the scientific evidence and health consequences. Munich: ICNIRP; 2003a.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys* 84:383–387; 2003b.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Phys* 87:197–216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96:504–514; 2009.
- International Electrotechnical Commission. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range—methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. Geneva: IEC 62226; 2004.
- International Electrotechnical Commission. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. IEC 62233; 2005a.
- International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment—part 1: general requirements for safety; 2: collateral standard: electromagnetic compatibility—requirements and tests. Geneva: IEC 60601-1-2; 2005b.
- IEEE. IEEE 1308 Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz. IEEE, Piscataway; 1994.
- IEEE. IEEE 644-1994 (Reaff 2008). IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines; IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG. Experimental neurobiology of epilepsies. *Curr Opin Neurol* 7:113–122; 1994.
- Jokela K. Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields. *Health Phys* 79:373–388; 2000.
- Jokela K. Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution. *Health Phys* 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Protect Dosim* 106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 7:107–115; 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W. Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex. *Curr Biol* 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scand J Work Environ Health* 33:5–12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. *Occup Environ Med* 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health* 82:919–933; 2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys Med Biol* 49:1–15; 2004.
- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. Health effects and safety of intense gradient fields. In: Shellock F, ed. Magnetic resonance procedures: Health effects and safety. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. *Curr Biol* 19:1–5; 2009.
- Reilly J. Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology. New York: Springer-Verlag; 1998.
- Reilly JP. Comments concerning “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 76:314–315; 1999.
- Reilly JP. Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines—part I: sinusoidal waveforms. *Health Phys* 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. Spatial relationships in electrostimulation: application to electromagnetic field standards. *IEEE Trans on Biomed Eng* 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. Weak electric field interactions in the central nervous system. *Health Phys* 83:366–375; 2002. Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Phys* 92:596–603; 2007.
- So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. *IEEE Trans on Biomed Eng* 51:1907–1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field. *Health Phys* 83:333–340; 2002.
- World Health Organization. Environmental Health Criteria 238. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva: World Health Organization; 2007a.
- World Health Organization. Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No 322. Geneva: World Health Organization; 2007b.
- Xi W, Stuchly MA. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl Comput Electromagn Soc J* 9:127–134; 1994.

ANEXO
Anexo informativo

Definição do pico ponderado de exposição. A ponderação poderá ser implementada pelo cálculo, primeiro do espectro da forma de onda e depois pela aplicação da equação (7). Contudo, em várias aplicações, é mais conveniente utilizar uma filtragem analógica ou digital da forma de onda no domínio do tempo. O ganho do filtro (rácio entre o sinal de saída e o sinal de entrada) deverá variar em função da frequência na proporção directa do limite de exposição $G = EL(f_{ref})/EL(f)$, em que EL corresponde ao limite à frequência f e f_{ref} corresponde a uma frequência de referência arbitrária entre 1 Hz e 100 kHz. O valor de pico da forma de onda filtrada não deverá ultrapassar o limite de exposição (restrição básica ou nível de referência) convertido para o valor de pico (amplitude) à frequência de referência. A Tabela 6 apresenta um exemplo de limites de pico resultantes. Além da amplitude, os filtros físicos influenciam sempre a fase do campo, o que altera o valor de pico do campo filtrado. Conforme ilustrado nas Fig. 1, 2 e 3, os limites encontram-se divididos em gamas de frequências em que o limite varia de forma directamente proporcional a $1/f^2$, $1/f$, f^0 (constante), ou f . Nas gamas $1/f^2$, $1/f$, f^0 e f , o ângulo de fase do filtro ϕ_i (ver equação 7) é de 180, 90, 0 e -90° , respectivamente. O filtro de ponderação pode ser aproximado por um filtro electrónico ou digital, em que a atenuação não se deverá desviar-se mais que 3 dB e a fase mais que 90° da resposta linear exacta (por partes) no domínio da frequência. A título de exemplo, a Fig. A1 apresenta a atenuação e fase em função da frequência para o filtro usado para a ponderação do campo eléctrico induzido. As curvas aproximadas baseiam-se numa aproximação simples com uma função de filtro do tipo RC (resistência/condensador). A abordagem de pico ponderado pode ser usada tanto em campos coerentes como não coerentes. No último caso, o tempo de medição deve ser suficientemente longo para permitir a detecção do valor de pico (pior caso) com razoável probabilidade. No caso de campos não coerentes, compostos por poucas frequências, a abordagem de pico ponderado é idêntica à soma espectral.

Tabela 6. Limites de pico resultantes para campos eléctricos e magnéticos não sinusoidais. A frequência de referência é de 50 Hz.

	$E_{induzido}$ ($mV\ m^{-1}$)	Tecido do corpo	$E_{externo}$ ($V\ m^{-1}$)	B μT
Ocupacional	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10,000$	$\sqrt{2} \times 1,000$
Público em geral	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5,000$	$\sqrt{2} \times 200$

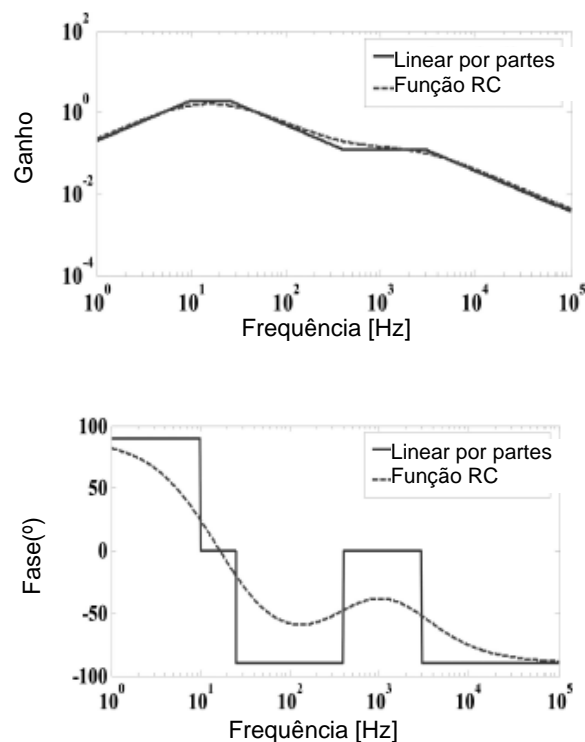


Fig. A1. Resposta em amplitude e fase para a ponderação do campo eléctrico induzido.

GLOSSÁRIO¹
Efeito adverso

Um efeito negativo para a saúde de uma pessoa devido à exposição a um campo eléctrico ou magnético, ou a uma corrente de contacto.

Distância para a definição da média

A distância ao longo da qual se determina o valor médio do campo eléctrico *interno* quando se verifica o cumprimento das limitações básicas.

Limitações básicas

As limitações obrigatórias relativamente às grandezas que correspondem directamente a todos os mecanismos conhecidos de interacção biofísica com os tecidos, os quais podem dar origem a efeitos adversos para a saúde.

Cancro

Doenças que se caracterizam por uma divisão anormal e não controlada das células eucarióticas e pela propagação da doença (metástases) por diferentes pontos do organismo.

Sistema nervoso central (SNC)

A parte do sistema nervoso dos vertebrados que consiste no cérebro e na espinal medula, mas não inclui os nervos periféricos.

¹ NT: Na presente tradução manteve-se no Glossário a ordem alfabética do texto original em inglês.

Características

Propriedades físicas detalhadas dos campos magnéticos ou eléctricos, como por exemplo a grandeza, espectro de frequências, polarização, modulação, etc.

Condutividade

Uma propriedade dos materiais que determina a grandeza da densidade da corrente eléctrica quando um material é sujeito a um campo eléctrico, expressa em unidades de siemens por metro ($S\ m^{-1}$); é o inverso da resistividade.

Corrente de contacto

A corrente transmitida para um meio biológico através de um eléctrodo de contacto ou de outra fonte de corrente.

Densidade de corrente

Um vector, cuja integral sobre uma superfície é igual à corrente que atravessa a superfície; a densidade média num condutor linear é igual à corrente dividida pela secção transversal do condutor. Exprime-se em Ampere por metro quadrado ($A\ m^{-2}$).

CC

Abreviatura para “corrente contínua”, mas utilizada também para indicar campos constantes, ver “Campo estático”.

Despolarização (celular)

A redução do potencial de repouso ao longo de uma membrana celular.

Efeito directo

Um efeito biológico resultante da interacção directa dos CEM com as estruturas biológicas.

Estimulação eléctrica directa

Estimulação através do campo eléctrico em meio biológico, induzida por um campo magnético ou eléctrico externo sem contacto directo com outros condutores ou correntes eléctricas.

DNA (ácido desoxirribonucleico)

Uma molécula polimérica constituída por blocos desoxirribonucleótidos que, sob uma forma de hélice dupla interligada, constituem o material genético da maior parte dos organismos.

Dosimetria

Medida, ou determinação por cálculo, da intensidade do campo eléctrico interno ou densidade da corrente induzida ou absorção específica (AE) ou taxa de absorção específica (TAE), em humanos ou animais expostos a campos electromagnéticos.

Campo eléctrico

Um campo vectorial **E** medido em volts por metro.

Intensidade do campo eléctrico (*E*)

Grandeza da força exercida por um campo eléctrico sobre uma carga eléctrica pontual, dividida pela carga eléctrica. A intensidade do campo eléctrico é expressa em newton por coulomb ou volts por metro ($N/C = V/m$).

Energia electromagnética

A energia armazenada num campo electromagnético. Expressa em joule (J).

Campos electromagnéticos

A combinação de campos eléctricos e magnéticos no ambiente. Este termo é muitas vezes confundido com “radiação electromagnética” e pode portanto ser enganador quando utilizado com frequências extremamente baixas nas quais a radiação é praticamente indetectável.

Electro-estimulação

Indução de um potencial de acção que se propaga em tecido excitável através da aplicação de um estímulo eléctrico; polarização eléctrica dos processos pré-sinápticos que conduzem a uma alteração na actividade celular pós-sináptica.

CEM

Campos eléctricos e magnéticos.

Mecanismo estabelecido

Um mecanismo bioeléctrico que possui as seguintes características: (a) pode ser utilizado para prognosticar um efeito biológico em seres humanos; (b) pode ser criado um modelo explícito utilizando equações ou relações paramétricas; (c) foi verificado em seres humanos, ou existem dados em modelos animais que podem ser extrapolados com confiança para seres humanos; (d) é suportado por evidências fortes; e (e) é generalizadamente aceite entre os peritos da comunidade científica.

Exposição

Aquilo que ocorre sempre que uma pessoa é sujeita à influência de um campo de baixa frequência ou uma corrente de contacto.

Exposição, longo prazo

Esta expressão indica a exposição durante uma grande parte de vida do sistema biológico em causa; pode, portanto, variar de algumas semanas a muitos anos de duração.

Avaliação de exposição

A avaliação da exposição de uma pessoa através de medições, modelação e informação sobre fontes ou através de outros meios.

Métrica de exposição

Um número único que representa a exposição a um campo eléctrico e/ou magnético. A métrica é normalmente determinada através de uma combinação do processamento das leituras dos instrumentos e da análise de dados efectuada após a medição.

Frequência

O número de ciclos sinusoidais de uma onda electromagnética durante 1 segundo; normalmente expresso em hertz (Hz).

Público em geral

O termo Público em Geral refere-se a toda a população. Inclui pessoas de todas as idades, e com variados estados de saúde, incluindo grupos ou pessoas particularmente vulneráveis como pessoas com saúde debilitada, idosos, trabalhadoras grávidas, bebés e crianças.

Exposição do público em geral

Toda a exposição a campos de baixa frequência recebida por membros do público em geral. Esta definição exclui a exposição ocupacional, e a exposição médica.

Harmónica (frequência)

Frequências que são múltiplos inteiros da frequência industrial ou de uma outra frequência de referência.

Batimento cardíaco

A medida do número de batimentos cardíacos por minuto.

Hertz (Hz)

A unidade para expressar frequência, (*f*). Um hertz equivale a um ciclo por segundo. 1 kHz = 1.000 Hz, 1 MHz = 1.000 kHz, 1 GHz = 1.000 MHz.

Indução

Um campo eléctrico ou magnético num meio condutor causado pela acção de um campo eléctrico ou magnético externo (ambiental) variável ao longo do tempo.

Instantâneo

Adjectivo utilizado para descrever parâmetros particulares que têm de ser medidos ou avaliados durante um intervalo de tempo muito curto (tipicamente 100 microssegundos ou menos).

Corrente de espasmo

O limiar de corrente a partir do qual a contracção muscular involuntária impede a libertação de um condutor energizado agarrado. (Let-go current: “Corrente que ainda permite soltar”).

Campo magnético

Uma grandeza vectorial, **H**, que especifica um campo magnético em qualquer ponto no espaço, e é expressa em ampere por metro ($A\ m^{-1}$). Ver também densidade de fluxo magnético.

Intensidade do campo magnético (*H*)

A grandeza do vector do campo magnético; expressa em unidades de ampere por metro (A/m).

Densidade de fluxo magnético (*B*)

Uma grandeza vectorial que determina a força sobre uma carga ou cargas em movimento (corrente eléctrica). A densidade de fluxo magnético é expressa em tesla (T). Um gauss (unidade abandonada) corresponde a 10^{-4} T.

Magnetofosfenos

A sensação visual de manchas luminosas causada por correntes eléctricas induzidas que estimulam a retina.

Média

A média aritmética de uma série de medições ou de outros dados.

Limiar mediano

O valor de limiar numa distribuição estatística na qual 50% dos sujeitos possuem limiares superiores e 50% possuem limiares inferiores.

Exposição médica

Exposição de uma pessoa a campos de baixa frequência recebidos enquanto doente sujeito a diagnóstico médico, ou a um tratamento médico reconhecido, ou como voluntário numa investigação médica.

Mutagénio

Uma substância com capacidade para causar uma mutação.

Mutação

Qualquer alteração detectável e hereditária do material genético não causada por recombinação genética.

Nervo

Um feixe de axónios.

Fibra nervosa

Um axónio singular.

Neurónio

Uma única unidade celular composta normalmente por um axónio, uma célula principal e árvore dendrítica.

Radiação Não Ionizante (RNI)

Inclui todas as radiações e campos do espectro electromagnético que normalmente não possuem energia suficiente para ionizar a matéria. Caracterizam-se por apresentarem energia por fóton inferior a cerca de 12 eV, o que equivale a comprimentos de onda superiores a 100 nm e frequências inferiores a 3×10^{15} Hz.

Campo não uniforme

Um campo que não é constante em amplitude, direcção e fase relativa ao longo das dimensões do corpo ou parte do corpo em causa. No caso dos campos eléctricos, a definição aplica-se ao campo ambiental não perturbado pela presença do corpo.

Exposição ocupacional

Todas as exposições a CEM de indivíduos em resultado da execução das suas actividades profissionais diárias.

Nervo periférico

Nervo que se encontra fora do sistema nervoso central mas que faz a ligação com o sistema nervoso central.

Permeabilidade

A grandeza escalar ou tensorial que, multiplicada pela intensidade do campo magnético é igual à densidade do fluxo magnético. Nota: Em meios isotrópicos, a permeabilidade é uma grandeza escalar; em meios anisotrópicos é uma grandeza tensorial. Sinónimo: permeabilidade absoluta. Se a permeabilidade de um material ou meio for dividida pela permeabilidade de vácuo (constante magnética) μ_0 , o resultado é denominado permeabilidade relativa (μ). Unidade: henry por metro ($H m^{-1}$).

Permissividade

Uma constante que define a influência de um meio isotrópico sobre as forças de atracção ou repulsão entre corpos electricamente carregados. Exprime-se em farad por metro (F/m); a *permissividade relativa* é a permissividade de um material ou meio dividida pela permissividade do vácuo.

Duração de fase (t_p)

O tempo entre as passagens por zero de uma forma de onda com média zero. Para uma onda sinusoidal de frequência f , $t_p = 1/(2f)$. Para uma forma de onda exponencial, t_p é interpretado como a duração medida do pico da forma de onda até um ponto em que desce para $0,37 (e^{-1})$ do seu valor de pico.

Fosfenos

Sensação visual causada por estímulos não fotónicos. Electro-fosfenos são aqueles induzidos por correntes eléctricas; magneto-fosfenos são aqueles induzidos magneticamente.

Membrana plasmática

Bicamada lipídica que circunda o citoplasma das células animais e vegetais.

Polarização (celular)

O potencial eléctrico através da membrana celular.

Frequência industrial

A frequência a que a electricidade em CA é gerada. As indústria de energia eléctrica gera à frequência de 60

Hz na América do Norte, Brasil e em algumas zonas do Japão e à frequência de 50 Hz na maior parte do resto do mundo.

Proteína

Elemento de um grupo de compostos orgânicos de peso molecular elevado e contendo nitrogénio, com uma forma e composição complexas.

Exposição do público em geral

Toda a exposição a CEM suportada por elementos do público em geral, excluindo exposição ocupacional e exposição durante intervenções médicas.

Radiofrequência (RF)

Energia electromagnética com frequências na gama de 3 kHz a 300 GHz.

Factor de redução

Redução do limiar de efeito, destinado a compensar pelas várias fontes de incerteza no processo de definição das linhas de orientação. Alguns exemplos de fontes de incerteza sobre os limiares de efeito da exposição incluem a extrapolação de dados de modelos animais para efeitos nos seres humanos, diferenças nas reservas fisiológicas das diferentes pessoas com reflexo em diferenças de tolerância, e incertezas estatísticas (intervalo de confiança) na resposta dosimétrica. Na opinião da ICNIRP, a incerteza nas medições utilizadas na aplicação das linhas de orientação é um problema que deve ser tido em conta pelas organizações responsáveis pelo desenvolvimento de métodos de normalização e de verificação de conformidade. Não é um elemento tido em conta pela ICNIRP no conjunto de factores de redução relevantes.

Níveis de referência

Os valores rms e de pico de campos eléctricos e magnéticos, e de correntes de contacto aos quais uma pessoa pode ser exposta sem sofrer qualquer efeito adverso e com factores de segurança aceitáveis. Os níveis de referência para a exposição eléctrica e magnética neste documento podem ser ultrapassados se for demonstrado que as limitações básicas não são ultrapassadas.

Assim, poderão ser utilizados parâmetros práticos ou marcadores para determinar a conformidade com as Limitações Básicas.

Permeabilidade relativa

Permeabilidade (Absoluta) (q.v.) dividida pela permeabilidade do vácuo. Um valor próximo de 1,0 significa que o material sofre apenas uma fraca magnetização por parte de um campo externo.

Fase relativa

Ângulo de fase de uma forma de onda sinusoidal relativamente ao ângulo de fase de outra forma de onda medida num ponto diferente do meio condutor ou relativamente a uma forma de onda de referência.

Risco relativo (RR)

O rácio entre a taxa de doença no grupo sob estudo e no grupo de comparação, se necessário com ajustamentos para factores de confusão, como por exemplo a idade. Para as doenças raras, o risco relativo é praticamente o mesmo que o rácio de probabilidade.

Valor eficaz (rms – root mean square)

A raiz quadrada da média do quadrado de uma função variável no tempo, $F(t)$, ao longo de um determinado período de tempo de $t1$ a $t2$. É apurado calculando a raiz quadrada da função e depois determinando o valor médio dos quadrados obtidos, e tomando a raiz quadrada desse valor médio, ou seja,

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t2 - t1} \int_{t1}^{t2} [F(t)]^2 dt}$$

S.I.

Abreviatura para o Sistema internacional de unidades.

Pico espacial

Expressão utilizada para descrever o nível mais elevado de uma grandeza particular cuja média é calculada para uma pequena massa ou área do corpo humano.

Descarga de uma faísca

A transferência de corrente através do ar na presença de uma tensão suficientemente forte para ionizar o ar, por contraste com um contacto directo com uma fonte.

Campo estático

Um campo que não varia ao longo do tempo. Na maior parte dos ambientes, os campos eléctricos e magnéticos variam ao longo do tempo, mas o seu espectro de frequências possui uma componente a 0 Hz. Esta componente “quase-estática” do campo pode ser medida calculando a média do sinal oscilante no intervalo de tempo da amostra.

Tesla (T)

Unidade de densidade de fluxo magnético no sistema internacional de unidades. 1 tesla = 10,000 gauss (q.v.).

Limiar

O nível de um estímulo que assinala o limite entre uma resposta e uma não resposta.

Fibrilhação ventricular

Arritmia dos ventrículos do coração caracterizada por contracções rápidas e descoordenadas.

Voxel

Um elemento computacional tridimensional. No âmbito do presente documento é utilizado para representar tecidos humanos e animais em modelos dosimétricos.

Forma de onda

A variação de uma amplitude eléctrica ao longo do tempo. Excepto quando indicado o contrário, no presente documento a expressão *forma de onda* refere-se aos valores (ou medições) no interior de um meio biológico.

Trabalhadores

Ver expressão do glossário *Exposição ocupacional*.