monIT
monitorização
de radiação electromagnética
em comunicações móveis

Título	Medidas em Zonas Próximas de Antenas
Editor	Daniel Sebastião
Autores	Daniel Sebastião, Mónica Branco, Luís M. Correia
Data	2012/01/30
Versão	05
Distribuição	Operadores
Documento	monIT_1084_05_Ext_Tec_ReportNearFields
Sumário	Neste relatório analisa-se a questão da avaliação dos níveis de exposição a campo eletromagnéticos em zonas próximas de antenas. Existem limites de exposição, de forma a proteger a população da exposição à radiação eletromagnética. Na zona distante da antena, basta obter o valor de um dos campos (elétrico ou magnético), calculando-se facilmente o outro, ou a densidade de potência através de expressões simples, mas no caso dos sistemas de comunicações móveis, as distâncias de zona próxima podem ser da ordem das dezenas de metros. Com um erro desprezável, esta abordagem pode ser também tomada para a zona próxima radiante, que pode ser tomada a pelo menos 1 comprimento de onda de distância da antena. No caso dos sistemas de comunicações móveis em análise neste relatório (GSM, UMTS, LTE e WiFi), de um ponto de vista geral, e independentemente dos sistemas considerados, pode afirmar-se que para distâncias superiores a 0.4 m, basta medir um dos campos, elétrico ou magnético, para verificar a conformidade com os limites de exposição.

Historial do documento

Data	Versão	Comentário	Editor da versão
2011/11/15	01	Primeira versão.	Daniel Sebastião
2011/12/28	02	Correções à versão anterior	Luis M. Correia
2012/01/09	03	Atualização do Capítulo 4	Daniel Sebastião
2012/01/18	04	Atualização do Capítulo 4	Daniel Sebastião
2012/01/30	05	Correções à versão anterior	Luis M. Correia

monIT

monitorização
de radiação electromagnética
em comunicações móveis

Medidas em Zonas Próximas de Antenas

monIT

Índice

Índice 5

Lista de Figuras 6

Lista de Tabelas 7

Lista de Acrónimos 8

Lista de Símbolos 9

1. Introdução 11

2. Limites de Exposição 13

3. Campos Eletromagnéticos: Zonas Próximas e Zonas Distantes 15

4. Metodologia de Análise para avaliação dos níveis de exposição 19

5. Conclusões 23

Referências 25

Lista de Figuras

Figura 3.1. Regiões fronteira entre as diferentes zonas em redor da antena.....16
Figura 4.1. Variação dos campos com a distância, para uma dada antena (adaptado de [6]]. 20

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Restrições básicas para campos eletromagnéticos (0.1 – 10 000 MHz) (extraído de [5])....13
Tabela 2.2. Níveis de referência para campos eletromagnéticos na banda das radiofrequências (3 kHz – 300 GHz) (extraído de [5])....14
Tabela 3.1. Valores típicos para as distâncias das zonas próxima e distante das antenas utilizadas pelos sistemas de comunicações móveis....17
Tabela 4.1. Metodologias aplicáveis para avaliar os níveis de exposição em função da região em redor da antena (retirado de [6])....19

Lista de Acrónimos

CENELEC	*European Committee for Electrotechnical Standardization*
FCC	*Federal Communications Commission*
GSM	*Global System for Mobile Communications*
ICNIRP	*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
LTE	*Long Term Evolution*
SAR	Taxa de Absorção Específica
UMTS	*Universal Mobile Telecommunication System*

Lista de Símbolos

d	Distância à antena/elemento radiante
D	Maior dimensão linear da antena
E	Campo Elétrico
f	Frequência
H	Campo Magnético
S	Densidade de Potência
λ	Comprimento de onda

monIT

1. Introdução

A questão da exposição a campos eletromagnéticos é muito sensível na população, levantando sempre discussões sobre os possíveis efeitos na saúde que advêm da exposição aos referidos campos. No caso dos sistemas de comunicações móveis, esta questão é ainda mais premente, devido à sua grande expansão nos últimos anos, sendo omnipresentes na nossa sociedade.

A definição de limites de exposição aos campos eletromagnéticos tem como objetivo garantir que a população não é exposta a níveis de campos que sejam prejudiciais à saúde. Todos os operadores de sistemas de comunicações móveis são obrigados a garantir que as suas estações base cumprem os referidos limites em todas as instalações, e a colocar avisos e proteções junto dos mesmos.

Para garantir que os limites são cumpridos junto destas estações base, pode-se proceder a medidas no local, a simulações, e/ou a cálculos teóricos de exposição. Uma das grandes questões prende-se com a validade destes cálculos e medidas, e as distâncias à antena onde são válidos.

Este relatório aborda as medidas em zona próxima, analisando a validade das medidas nestas zonas. Os procedimentos de medida usualmente utilizados consideram sempre que basta medir uma das componentes (campos elétrico ou magnético) para se obter os níveis de exposição. Isto pode não ser verdade em zonas próximas das antenas, sendo este o assunto analisado neste documento.

Assim, no Capítulo 2, apresentam-se os limites de exposição à radiação eletromagnética em vigor em Portugal, seguindo-se, no Capítulo 3, as definições principais de zonas próximas e zonas distantes, analisando-se ainda os modelos de propagação adequados nestas zonas, no Capítulo 4. O relatório finaliza com as conclusões no Capítulo 5.

monIT

2. Limites de Exposição

Os limites de exposição estabelecem valores máximos para os níveis de radiação eletromagnética absorvidos pelo corpo humano. Estes limites são estabelecidos por vários organismos internacionais (e.g., ICNIRP [1], IEEE [2], CENELEC [3], e FCC [4]) baseados nos mais diversos estudos. Estes limites são depois adotados pelos diversos países, e são as autoridades competentes de cada país que têm a obrigação de fiscalizar o seu cumprimento.

Acompanhando o conhecimento científico atual, o estabelecimento dos limites de exposição baseia-se na procura dos valores mínimos a partir dos quais começam a surgir efeitos adversos à saúde. O efeito térmico (aquecimento do corpo humano) é o efeito utilizado para estabelecer os limites em vigor.

No caso das radiofrequências, os limites de exposição são estabelecidos para o parâmetro SAR (Taxa de Absorção Específica, traduzido do inglês) que representa a absorção de energia eletromagnética por unidade de massa de tecido exposto, sendo expressa em W/kg. Estes valores limite são chamados de restrições básicas, Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Restrições básicas para campos eletromagnéticos, [0.1, 10 000] MHz (extraído de [5]).

Banda de Frequências [MHz]	**SAR médio para todo o corpo [W/kg]**	**SAR localizado (cabeça e tronco) [W/kg]**	**SAR localizado (membros) [W/kg]**
[0.1, 10 000]	0.08	2	4

Uma vez que a radiação de radiofrequência penetra no organismo, o parâmetro SAR teria de ser medido no seu interior, o que torna esta medição bastante difícil de efetuar na prática. Assim, estabelecem-se também limites para algumas grandezas eletromagnéticas, como a densidade de potência e intensidades de campos elétrico e magnético, facilmente mensuráveis no exterior do organismo. Estes limites designam-se por níveis de referência. Os níveis de referência representados na Tabela 2.2 são os adotados em Portugal para os casos de exposição em áreas públicas, que são definidos em termos de Campo Elétrico (*E*), Campo Magnético (*H*) ou Densidade de Potência (*S*). É de referir que os limites para as

áreas públicas correspondem a valores que estão 50 vezes abaixo dos limiares a partir dos quais começaram a ser detetados efeitos.

Como se pode verificar facilmente, os níveis de referência são variáveis, pois a interação com o corpo humano depende da frequência dos campos eletromagnéticos a que se é exposto, f (e.g., a radiação dos telemóveis interage de forma diferente com o corpo quando comparado com as radiações emitidas pelas linhas de alta-tensão).

Tabela 2.2. Níveis de referência para campos eletromagnéticos na banda das radiofrequências, [3 kHz, 300 GHz] (extraído de [5]).

Banda de Frequências	**Intensidade de Campo *E* [V/m]**	**Intensidade de Campo *H* [A/m]**	**Densidade de Potência *S* [W/m^2]**
[3, 150] kHz	87	5	-
[0.15, 1] MHz	87	$0.73/f$	-
[1, 10] MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	-
[10, 400] MHz	28	0.073	2
[0.4, 2] GHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$f/200$
[2, 300] GHz	61	0.16	10

No caso dos sistemas de comunicações móveis e sem fios, as bandas utilizadas em Portugal situam-se em 0.8, 0.9, 1.8, 2.1, 2.5, 2.6, e 5.7 GHz, (GSM, UMTS, LTE e WiFi) pelo que serão os valores limites nessas frequências que devem ser considerados quando se analisam esses sistemas.

3. Campos Eletromagnéticos: Zonas Próximas e Zonas Distantes

O comportamento dos campos eletromagnéticos depende da distância a que estamos da antena. Tipicamente, distinguem-se 3 zonas [6], [7], [8]:

- Zona próxima reativa: caracterizada pela coexistência de energia reativa e radiante. Nesta região, os campos elétrico e magnético são completamente distintos, e o seu decaimento é da ordem de $1/d^3$. É a região mais próxima da antena, delimitada por:

$$d < \frac{\lambda}{4} \tag{3.1}$$

  onde:

  - d: distância à antena/elemento radiante;
  - λ: comprimento de onda da onda eletromagnética.

- Zona próxima radiante: também chamada "Zona de Fresnel", é a zona onde a energia radiante é a dominante. Basicamente, é a região entre a zona próxima reativa e a zona distante da antena, onde o campo tem um decaimento da ordem de $1/d^2$. Esta região é delimitada por:

$$\frac{\lambda}{4} < d < \frac{2D^2}{\lambda} \tag{3.2}$$

  onde:

  - D: maior dimensão linear da antena.

  De referir que, em casos específicos, esta zona pode estar englobada dentro da zona próxima reativa, pelo que, nesse caso, se passa diretamente da zona próxima reativa da antena para a zona distante da mesma.

- Zona distante: nesta região, o comportamento das ondas eletromagnéticas entre si é independente da distância à antena. Neste caso, os campos elétrico e magnético relacionam-me diretamente entre si através da impedância de espaço livre (120π), sendo o seu decaimento da ordem de $1/d$. Esta região é limitada por:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \tag{3.3}$$

De referir que as fronteiras consideradas para as regiões em volta da antena não são exatas, i.e., dependem das aproximações que forem tomadas para os diferentes parâmetros. A norma do CENELEC considerada neste estudo, [6], considera o valor de $\lambda/4$, indicando-se que a partir deste valor, a diferença máxima entre as várias componentes (reativa e radiante) é inferior a 10%. De qualquer forma, em diferentes fontes que se considerem, poderão existir valores diferentes para as distâncias onde as zonas começam e acabam, em função das aproximações tomadas, e.g., [9] e [10].

Em qualquer caso, mesmo considerando estas variações, o comportamento dos campos dentro de cada região é constante, pelo que os procedimentos de avaliação dos níveis de exposição não variam. Na Figura 3.1, apresenta-se a representação esquemática das diferentes regiões.

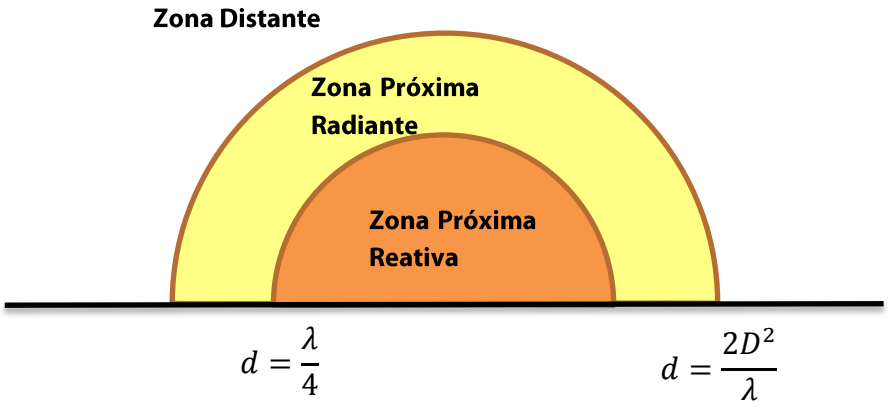

Figura 3.1. Regiões fronteira entre as diferentes zonas em redor da antena.

Utilizando valores típicos para as antenas utilizadas nos sistemas de comunicações móveis, [11], [12], pode-se facilmente calcular os valores de distância para as diferentes regiões consideradas, Tabela 3.1. Neste caso, considerou-se o valor de frequência mais elevado em cada banda, para assim se ter uma perspetiva de pior caso nas distâncias consideradas.

Tabela 3.1. Valores típicos para as distâncias das zonas próxima e distante das antenas utilizadas pelos sistemas de comunicações móveis.

	GSM	UTMS	LTE[1]	WiFi
Frequência Máxima [MHz]	960 (GSM 900) 1 880 (GSM 1800)	2170	862 (banda de 800 MHz) 2 690 (banda de 2600 MHz)	2 483.5 (802.11bgn) 5 725 (802.11a)
Comprimento de onda [m]	0.313 0.160	0.138	0.348 0.112	0.121 0.052
Comprimento Máximo da Antena [m]	2.6	2.6	2.6	0.26
Comprimento máximo da zona próxima reativa [m]	0.078 0.040	0.035	0.087 0.028	0.030 0.013
Comprimento mínimo da zona distante [m] (para o comprimento máximo da antena)	43.26 84.73	97.80	38.85 121.23	1.12 2.58

[1] No caso do LTE apenas se analisam as bandas dos 800 e 2 600 MHz, pois as restantes não estão atribuídas em Portugal (450 MHz), ou são bastante próximas do GSM e UMTS (900, 1 800 e 2 100 MHz).

monIT

4. Metodologia de Análise para Avaliação dos Níveis de Exposição

A forma usual de avaliar os níveis de exposição num dado local é através da realização de medidas, ou, em casos específicos, de cálculo dos valores dos campos eletromagnéticos nesse local.

Existem metodologias específicas, [6], que indicam como se deve proceder para avaliar os níveis de exposição num dado local, em função da distância (zona próxima ou zona distante) à antena. Consoante o caso, são indicadas as metodologias que se devem seguir e quais os cuidados a ter em cada caso, Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Metodologias aplicáveis para avaliar os níveis de exposição em função da região em redor da antena (retirado de [6]).

	Zona Próxima Reativa	**Zona Próxima Radiante**	**Zona Distante**
Referência	Avaliação do SAR	Avaliação do SAR	Cálculo dos Campos *E* ou *H*
Primeira Alternativa	Medidas dos Campos *E* e *H*	Medidas dos Campos *E* ou *H*	Medidas dos Campos *E* ou *H*
Segunda Alternativa	-	Cálculo dos Campos *E* ou *H*	-

Neste relatório, estamos interessados em analisar a questão da exposição em zonas próximas da antena. Segundo a Tabela 4.1, o procedimento mais correto seria a avaliação de SAR, mas como já foi visto, este procedimento é bastante complexo, ou mesmo de todo impossível de realizar fora de um laboratório.

Existem modelos analíticos para cálculos das zonas de exclusão (i.e., a zona no interior da qual os limites de exposição são ultrapassados), [13]. No entanto, em cenários reais, existem muitos fatores que influenciam os níveis de exposição, pelo que estes modelos podem não ser utilizáveis. De qualquer forma, através de modelos analíticos podemos ter

uma ideia da variação dos campos com a distância dentro de cada zona, Figura 4.1. Esta variação depende das características da antena em análise. No entanto, tipicamente, a utilização do modelo de zona distante na zona próxima radiante acaba por provocar uma sobrestimação dos campos quando comparado com os valores reais, [6].

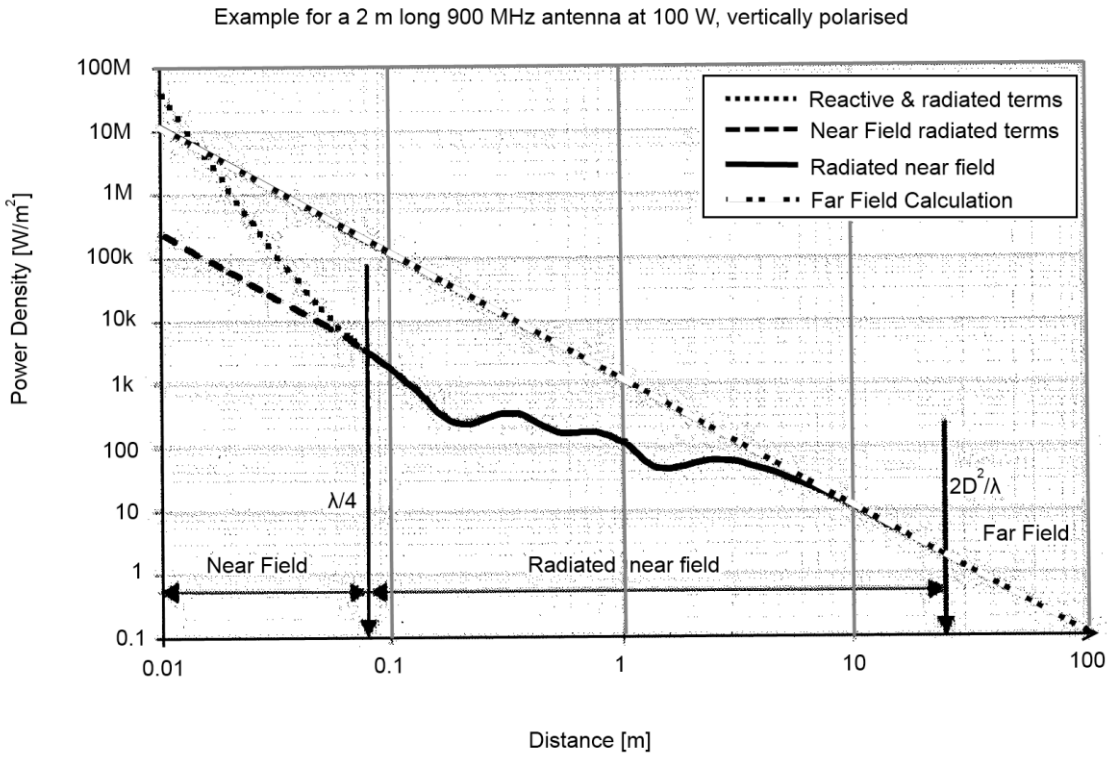

Figura 4.1. Variação dos campos com a distância, para uma dada antena (adaptado de [6]].

Assim, o procedimento mais usual em cenários reais (para qualquer zona em redor da antena) é a realização de medidas, seguindo procedimentos e metodologias estabelecidos, (e.g., [14], [15]). Em condições normais, as medidas serão realizadas na zona distante da antena, mas como foi visto na secção anterior, a própria zona distante pode começar apenas a mais de 100 m da antena. Assim, em certas condições, pode ser necessário a realização de medidas em locais dentro da zona próxima da antena para avaliar os níveis de exposição da população, ou mesmo para o estabelecimento e confirmação de zonas de exclusão em redor das antenas. Nesses casos, interessa averiguar se de facto é possível realizar as medidas na zona próxima e em que condições o será.

Na realização de medidas na zona distante, usualmente apenas se medem os valores de um dos campos (*E* ou *H*), pois a relação entre ambos é conhecida, calculando-se depois os níveis de exposição em função de *E*, *H* ou *S*, [15]. Mas na zona próxima, a relação entre ambos deixa de ser constante, sendo assim necessário averiguar em que condições (se existirem) basta medir um dos campos, para se obter os níveis de exposição, ou se, pelo contrário, temos mesmo de medir ambos os campos em separado.

A própria metodologia considerada neste relatório, Tabela 4.1, indica que na zona próxima reativa teremos de medir ambos os campos, e que na zona próxima radiante basta medir um deles. Ou seja, a partir de distâncias superiores a $\lambda/4$, basta medir um dos campos para se obter os níveis de exposição (tendo-se um erro máximo de 10%, como indicado em [6]). Como outras fontes podem considerar diferentes valores para a distância onde começa a zona próxima radiante, podem existir outros valores de distância, onde se considera que basta medir um dos campos para se obter os níveis de exposição.

Se se quiser tomar uma perspetiva de pior caso, pode-se considerar apenas a distância da antena superior a λ, tal como indicado em [9] ou [15]. Para distâncias superiores a λ, a própria norma do CENELEC mostra que o erro já é praticamente residual nos exemplos considerados, [6].

De qualquer forma, apesar de apenas bastar medir um dos campos (*E* ou *H*), desde que a distância seja superior a λ, tem de se ter em conta que, dentro da zona próxima vão existir sempre variações, como se pode ver facilmente na Figura 4.1. Deste modo, podem existir pontos mais distantes da antena, onde o valor medido seja superior ao medido no local em causa, mas estes incrementos são marginais, tal como indicado em [6], pelo que se podem descartar face à incerteza do equipamento.

Assim, tomando a perspetiva de pior caso, e considerando os valores apresentados na Tabela 3.1, pode-se verificar, por exemplo, que em sistemas com GSM 900 apenas é necessário medir os valores do campo *E* e do campo *H* em simultâneo, para distâncias inferiores a 0.31 m. Para distâncias superiores, a medição de apenas um dos campos, e a sua comparação com os limites, com base nas metodologias existentes, [15], serve para garantir que os níveis de exposição nesse local estarão abaixo dos limites definidos.

Em conclusão, de um ponto de vista geral, e independentemente dos sistemas considerados (na Tabela 3.1), pode afirmar-se que para distâncias superiores a 0.4 m, basta medir um dos campos, elétrico ou magnético, para verificar a conformidade com os limites de exposição.

5. Conclusões

Neste relatório analisa-se a questão da avaliação dos níveis de exposição a campo eletromagnéticos em zonas próximas de antenas.

Existem limites de exposição de forma a proteger a população da exposição à radiação eletromagnética. No caso dos sistemas de comunicações móveis, os próprios operadores são obrigados a garantir que a população não é exposta a valores acima desses limites, tendo que definir zonas de exclusão em redor das antenas, sempre que as mesmas forem acessíveis. Estes limites de exposição estão definidos na legislação nacional, através dos chamados níveis de referência, onde se definem valores máximos para a densidade de potência, e os campos elétrico e magnético.

Definem-se zonas em redor da antena, pois o comportamento dos campos eletromagnéticos depende da distância a que estamos desta. Na zona distante da antena, basta obter o valor de um dos campos (elétrico ou magnético), calculando-se facilmente o outro, ou a densidade de potência através de expressões simples. Por outro lado, na zona próxima da antena, deixa de haver esta linearidade, passando também a haver componentes reativas dos campos. Isto torna mais complicado o processo de avaliação dos níveis de exposição, sempre que se torna necessário realizar medidas em zonas próximas da antena. No caso dos sistemas de comunicações móveis, as distâncias de zona próxima podem ser da ordem das dezenas de metros. No caso do estabelecimento de zonas de exclusão, é sempre imperioso a realização de medidas dentro da zona próxima da antena.

Assim, torna-se importante averiguar em que condições se pode aplicar o mesmo procedimento em zonas próximas, i.e., averiguar se basta medir um campo (elétrico ou magnético), calculando normalmente o outro, como se faz usualmente. As fontes consideradas indicam que tal é possível, desde que seja na zona próxima radiante. Como a distância de início da zona radiante não é exata (depende das aproximações consideradas), se se tomar uma perspetiva de pior caso, pode-se concluir que basta medir um dos campos, desde que se esteja a mais de 1 comprimento de onda de distância da antena.

No caso dos sistemas de comunicações móveis em análise neste relatório (GSM, UMTS, LTE e WiFi), de um ponto de vista geral, e independentemente dos sistemas considerados, pode afirmar-se que para distâncias superiores a 0.4 m, basta medir um dos campos, elétrico ou magnético, para verificar a conformidade com os limites de exposição.

Referências

[1] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, http://www.icnirp.org.

[2] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, http://www.ieee.org.

[3] CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, http://www.cenelec.eu.

[4] FCC – Federal Communications Commission, http://www.fcc.gov.

[5] Conselho da União Europeia, "*Recomendação do Conselho de 12 de Julho de 1999, relativa à limitação da exposição da população aos campos electromagnéticos (0 Hz - 300 GHz)*", Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L199/59, (1999/519/CE), July 1999 (http://eur-lex.europa.eu).

[6] CENELEC, *Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz – 40 GHz)*, Ref. No. EN 50383:2002 E, Central Secretariat, Brussels, Belgium, July 2002.

[7] Capps,C., *Near Field or far field*, Delphi Automotive Systems, Aug. 2001 (http://www.edn.com/article/486198-Near_field_or_far_field_.php).

[8] Agilent, *Antenna Measurement Theory*,

http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf?&cc=PT&lc=eng – accessed Dec. 2011.

[9] Martínez-González,A.M., Fernández-Pascual,A., Reyes,E., Van Loock,W.V., Gabriel,C. and Sánchez-Hernández,D., "Practical procedure for verification of compliance of digital mobile radio base stations to limitations of exposure of the general public to electromagnetic fields", in *IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 149, No. 4, Aug. 2002, pp. 218-228 (http://ieeexplore.ieee.org).

[10] Nearfield Systems Inc., *Near-Field*, http://www.nearfield.com/catalog2001/Cat011-022Theory.pdf - accessed Nov. 2011.

[11] AMPHENOL-JAYBEAM, *Panel, Dual Band, X-Pol, 880-960/1710-2170 MHz, 65°/65°, 17.5/18 dBi, 0°-10°/0°-10°T*, Base Station Antennas - http://www.amphenol-jaybeam.com/datasheet_files/5160100.pdf (accessed Dec. 2011).

[12] Kathrein, *Indoor Multi-band Omni Antenna Vertical Polarization*, http://www.kathrein.de/de/mcs/produkte/download/9362506c.pdf (accessed Dec. 2011).

[13] Oliveira,C., Fernandes,C.C., Reis,C. Carpinteiro,G., Ferreira,L., Correia,L.M. and Sebastião,D., *Definition of Exclusion Zones around typical Installations of Base Station Antennas*, Projecto monIT, MONIT_Int_Tec_0102_15_BSExclZones, Instituto de Telecomunicações, Lisboa, Portugal, Feb. 2005 (http://monit.it.pt/downloads/file150_pt.pdf).

[14] Carpinteiro,G., Oliveira,C., Reis,C., Ladeira,D., Sebastião,D. e Antunes,M., *Projecto monIT - Procedimento de Medida*, Projecto monIT, monIT_Ext_Tec_0122_05_ProcMedVarEB, Instituto de Telecomunicações, Lisboa, Portugal, Mar. 2010 (http://monit.it.pt/downloads/file123_pt.pdf).

[15] ICP – Autoridade Nacional de Comunicações I.P., "Regulamento 86/2007 - Procedimentos de monitorização e medição dos níveis de intensidade dos campos electromagnéticos com origem em estações de radiocomunicações", *Diário da República*, 2ª Série – Nº98 – 22 de Maio de 2007 (http://dre.pt/pdf2sdip/2007/05/098000000/1365013659.pdf).