

Propriedades Direcionais de Irradiação de Antenas Rádio-Base

Marco Antonio Brasil Terada
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Caixa Postal 4386 – Brasília/DF 70919-970

Abstract—This work discusses in detail the directional properties of the radiation of radio base antennas in cellular systems with respect to various variables, in addition to the usually employed variable of the distance from the bottom of the radio base tower. It is demonstrated that the electric field intensity peaks at different distances from the bottom of the radio base tower depending on these variables, leading to the conclusion that fixing a minimum distance from populated areas for the installation of radio bases is not the proper way to ensure safety.

Index Terms—Applied Electromagnetics, Antennas and Propagation, Mobile Communications, Biological Effects.

Resumo—Este trabalho¹ investiga em detalhe as propriedades direcionais de irradiação de antenas rádio-base em sistemas de comunicações celulares em função de diversas variáveis, além da usual distância da base da estação rádio-base. É mostrado que o máximo da intensidade do campo elétrico ocorre a distâncias diferentes da base da ERB dependendo destas outras variáveis, levando à conclusão que se fixar uma distância mínima de regiões povoadas para a instalação de ERBs não é a maneira adequada para se assegurar a segurança e o bem-estar da população.

Palavras chave—Eletromagnetismo Aplicado, Antenas e Propagação, Comunicações Móveis, Efeitos Biológicos.

I. INTRODUÇÃO

O explosivo recrudescimento de serviços baseados em sistemas de comunicações sem-fio representa um mercado que diretamente suporta e viabiliza o processo de globalização através de projetos de valor agregado superior a centenas de bilhões de reais. Correntemente existem cerca de 2 bilhões e 740 milhões de usuários de comunicações móveis celulares e PCS no mundo [1]. Esses dados não incluem usuários que estarão exclusivamente imersos em redes locais e pessoais, apesar de um certo grau de compartilhamento seja esperado. A proliferação de sistemas de comunicações sem-fio com alto grau de sofisticação necessitará do projeto e implementação de novas configurações, a serem usadas no atendimento à demandas técnicas cada vez mais exigentes derivadas de novos serviços e aplicações.

O mercado Brasileiro de comunicações celulares segue um caminho similar, com quase 100 milhões de usuários de serviços de comunicações sem-fio e de voz no final de

2006. No entanto, o desenvolvimento técnico e a implementação de novos serviços têm sofrido atrasos consideráveis nestes últimos anos. Isto se deve ao desconhecimento da população em geral quanto aos fundamentos de funcionamento das comunicações celulares e seus possíveis efeitos em nossas vidas. Estas dúvidas, ainda que justificáveis do ponto de vista da proteção de nosso bem-estar e saúde, levaram à elaboração de diversas leis que tentam restringir a instalação de Estações Rádio-Base (ERBs) perto de áreas povoadas. Estações Rádio-Base são estações de radiocomunicações de base do Serviço Móvel Pessoal (a telefonia móvel), usadas para radiocomunicação com estações móveis, ou seja, com os aparelhos terminais da telefonia móvel (os telefones celulares)².

Este trabalho tem por objetivo investigar as propriedades direcionais de radiação da antenas de ERBs. Será também evidenciado que as leis anteriormente mencionadas são arbitrárias e sem consistência científica, podendo inclusive introduzir problemas ao invés de solucioná-los. A maioria destas leis requer que a instalação de ERBs ocorra à uma distância mínima de escolas e unidades imobiliárias, e obrigam o re-posicionamento de ERBs que já estejam instaladas e em operação em distâncias inferiores a estes mínimos. Na realidade, a distância da base da ERB não é a única variável que deve ser levada em consideração, e o re-posicionamento da ERB para uma distância de 50 m [2], por exemplo, pode aumentar a radiação eletromagnética nas unidades imobiliárias que as leis estão tentando proteger. É importante se ressaltar que todas as ERBs conhecidas do autor atendem às especificações da Agência Brasileira de Telecomunicações (ANATEL), as quais ao contrário de leis como a [2] não obrigam que as ERBs sejam instaladas à uma distância mínima de unidades imobiliárias, mas requerem que a irradiação eletromagnética em todas as regiões povoadas esteja abaixo de valores mínimos de acordo com a frequência de operação [3].

II. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Inicialmente, esclarece-se que a distância da base da antena não é a única nem a mais importante variável a partir da qual se define qual a intensidade do campo eletromagnético proporcionado por essa mesma antena [4,5]. Há diversas outras variáveis ao lado da distância da base da antena que são

¹Este trabalho foi desenvolvido com suporte da Associação Nacional das Operadoras Celulares (ACEL), através de um contrato entre a ACEL e a Universidade de Brasília.

² Cf. Art. 3º, XIV, do Regulamento do Serviço Móvel Pessoal, aprovado pela Resolução nº. 316, de 27/09/2002, da Anatel.

relevantes para se apurar qual a intensidade do campo eletromagnético produzido pela antena. Sem o intuito de esgotar o rol dessas variáveis, o que seria desnecessário para o escopo desse trabalho, pode-se destacar dentre elas: (1) a altura de instalação da antena; (2) a altura, em relação ao solo, do ponto em que se deseja medir a intensidade do campo eletromagnético; (3) o ângulo de inclinação da antena; e (4) a potência efetivamente irradiada pela antena [3].

A representação gráfica que segue (Figura 1) apresenta a geometria dessa questão relativamente às duas primeiras variáveis destacadas:

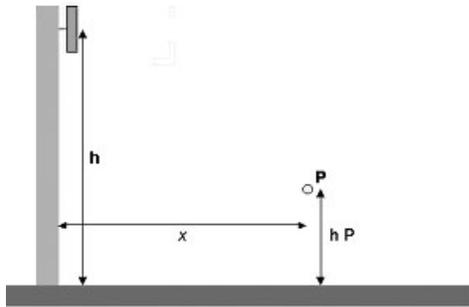


Figura 1 - Distâncias relevantes para apuração do campo eletromagnético.

Considerado um ponto qualquer no espaço (ponto P, na Figura 1), a intensidade do Campo Eletromagnético nesse ponto em decorrência da antena ali representada variará não apenas em função da distância desse ponto até a torre onde está instalada a antena (x), mas também em função da distância desse ponto ao chão (hP), e da altura de instalação da antena (h).

O ângulo de inclinação da antena também é relevante, pois as antenas de telefonia móvel são direcionais⁴. As Figuras 2 e 3 objetivam apontar que ângulo seria este.

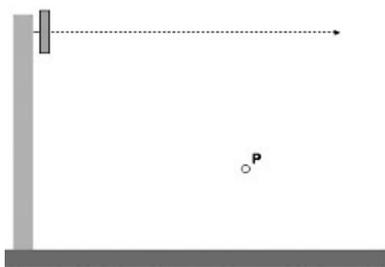


Figura 2 – Antena sem inclinação.

³ A potência efetivamente irradiada, *e.r.p.*, é definida como o produto da potência de entrada da antena pelo ganho linear da antena com relação à antena do tipo dipolo. Nesse sentido, também, a bibliografia já citada [4,5].

⁴ Antenas direcionais apresentam uma *e.r.p.* que é função da direção, ou ângulo, entre a antena e o ponto de observação. Conforme podemos ver das Figs. 2 e 3, o ângulo entre a seta de linha pontilhada e o ponto P varia de acordo com o ângulo de inclinação da antena, o que resulta em campos eletromagnéticos diferentes no ponto P se a antena for direcional. Uma antena omnidirecional produz campos uniformes ao seu redor, independente da direção. Desta forma, os campos produzidos por uma antena omnidirecional no ponto P das Figs. 2 e 3 seriam os mesmos independente do ângulo de inclinação da antena, em contraste com as antenas direcionais que dependem do mesmo.

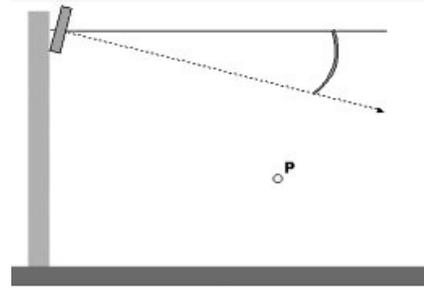


Figura 3 – Antena com inclinação.

Como se constata pela comparação entre as figuras, tem-se na Figura 2 um ângulo de 0° quando a antena é paralela à torre em que está instalada. Na Figura 3 a antena é inclinada em direção ao solo, daí surgindo um ângulo. Trata-se do ângulo de inclinação do eixo da antena, que faz com que esse eixo se aproxime do ponto P, no exemplo citado, fazendo com que seja maior a intensidade do campo eletromagnético no mesmo. Para um correto entendimento do funcionamento dos sistemas de comunicações celulares, é portanto necessário que se esclareça não só como varia a intensidade do campo eletromagnético em função da distância x como também como varia em função das demais variáveis apontadas (altura da antena, altura do ponto P e ângulo de inclinação da antena).

Esclarece-se, ainda, que seja nos regulamentos tratando da matéria, seja na legislação, ora se fala em *campo elétrico*, ora em *campo eletromagnético*. Os dois conceitos se distinguem, dado que o campo eletromagnético é a co-existência dos campos elétrico e magnético variando no tempo simultaneamente (um gera o outro), mas para o que interessa ao presente trabalho, é importante deixar destacado que os valores da intensidade do campo elétrico e do campo magnético são sempre diretamente proporcionais um ao outro. No escopo deste trabalho, a intensidade do campo magnético é simplesmente a intensidade do campo elétrico dividida por 377 [4,5]. As unidades são diferentes, no entanto, sendo que o campo elétrico é dado em V/m (Volts por metro) e o campo magnético em A/m (Amperes por metro). Não faz sentido se falar em intensidade de campo eletromagnético, a menos que esteja implícita as intensidades dos campos elétrico e magnético separadamente. Na continuidade deste trabalho, serão utilizados sempre os dados do campo elétrico, ficando, porém, claro que a toda e qualquer variação do campo elétrico varia em igual proporção o campo magnético.

Apresentamos inicialmente um gráfico que aponta a variação da intensidade do campo elétrico gerado por uma dada antena à medida que se varia a distância à base da ERB. Para tanto, utilizando técnicas analíticas de análise de antenas, bem como utilizando o programa computacional GRADMAX [6,7], desenvolvido pelo autor, é apresentado o gráfico que segue (Figura 4), calculado a partir de uma antena instalada a dez metros de altura ($h = 10\text{m}$), distância do solo ao ponto analisado de um metro e meio ($hP = 1,5\text{m}$) e com uma

potência efetivamente irradiada de 2512 Watts^[5] e um ângulo de inclinação da antena de 8°.

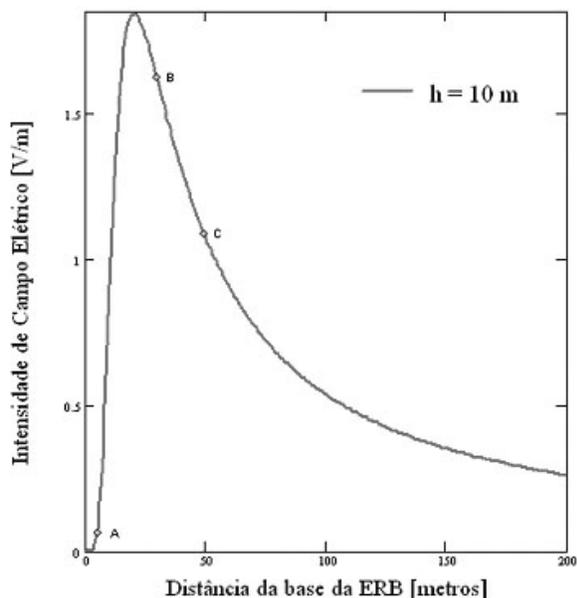


Figura 4 - Intensidade de campo elétrico em função da distância x da base da ERB. A análise foi feita para uma antena instalada a 10 metros e com uma inclinação de 8°.

No gráfico em questão (Figura 4), o eixo horizontal mostra a distância x em metros da base da ERB e o eixo vertical mostra a intensidade de campo elétrico em V/m (Volts por metro). Da Figura 4, conclui-se que:

- a intensidade do campo elétrico é a mais baixa exatamente quando são menores as distâncias do ponto até a torre da antena (valores de x próximos a zero);
- os valores da intensidade do campo elétrico vão aumentando progressivamente, atingindo o valor máximo de 1,850 V/m quando a distância x é de 20 m;

A TABELA I mostra os valores da intensidade do campo elétrico para as distâncias $x = 5$ m, 30 m e 50 m. Assim, quando se está a 1,5 m de altura e 5,0 metros de distância de uma torre de antena com as especificações dadas, a intensidade do campo elétrico é de 0,077 Volts por metro. À medida que a distância x vai aumentando (à medida que se afasta da base da antena), esse valor aumenta, até atingir 1,850 V/m a 20 metros da base da antena. Começa a diminuir, chegando a 1,615 V/m

a uma distância de 30 metros e a 1,076 V/m a cinquenta metros, prosseguindo em queda.

TABELA I
INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO.

	x [metros]	Intensidade do Campo Elétrico [V/m]
A	5	0,077
B	30	1,615
C	50	1,076

III. ALTERAÇÕES DA INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO EM FUNÇÃO DAS DEMAIS VARIÁVEIS

A. Variação da intensidade do campo elétrico em função da variação da altura da antena

O gráfico seguinte (Figura 5) mostra o comportamento da intensidade do campo elétrico em função da distância x da base da ERB para três diferentes alturas de antena, quais sejam, 10 m, 20 m e 30 m, mantendo-se as demais variáveis constantes^[6].

A Tabela II lista os valores da intensidade do campo elétrico para as distâncias $x = 5$ m, 30 m e 50 m, bem como para o pico do campo em cada uma das torres.

A partir da comparação das três curvas da Fig. 5 e dos valores listados na Tabela II, constata-se que a intensidade do campo elétrico varia sensivelmente em função da variação da altura de instalação da antena, levando às seguintes conclusões:

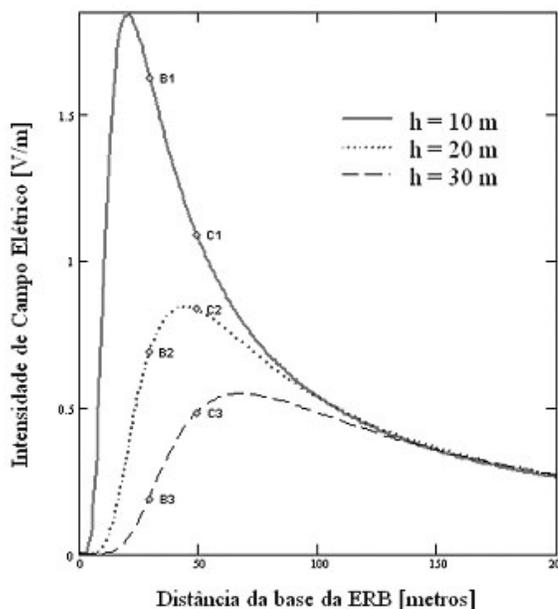


Figura 5 - Intensidade de campo elétrico em função da distância x da base da ERB considerando três diferentes alturas de instalação da antena.

⁵ Essa especificação corresponde ao valor máximo admitido na regulamentação editada pela Anatel para o Serviço Móvel Pessoal [8], ou seja, corresponde à especificação de *e.r.p.* (potência efetivamente irradiada) de 64 dBm para antenas que operam na frequência de 869 a 894 MHz (Banda A da telefonia móvel), com uma potência de entrada de 100 W. Por definição, $e.r.p.$ [dBm] = $10 \log(e.r.p. \text{ em mW})$, daí resultando que 64 dBm correspondem a 2512W (Nesse sentido, também, a bibliografia já citada nas notas [4,5]).

⁶ ponto de observação (ponto “P”) distante 1,5 m do nível do solo, inclinação da antena de 8°, potência efetivamente irradiada de 2512 W.

TABELA II
INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO EM FUNÇÃO DA
DISTÂNCIA X DA BASE DA ERB PARA DIVERSAS ALTURAS DA
ANTENA E UMA INCLINAÇÃO DA ANTENA DE 8°.

	Distância da torre	Diferentes alturas de instalação da Antena		
		h = 10 m	h = 20 m	h = 30 m
		Intensidade do Campo Elétrico em Volts por metro		
A	5m	0,077	0,000635	0,00004749
B	30m	1,615	0,705	0,207
C	50m	1,076	0,833	0,492
Pico	variável	1,850	0,847	0,550

- ◆ Um ponto situado a 50 metros de uma antena instalada a 10 metros de altura está sujeito a uma intensidade do campo elétrico superior ao pico do campo que pode ser produzido por antenas semelhantes instaladas a 20 ou 30 metros de altura.
- ◆ O valor máximo da intensidade do campo elétrico (pico de cada curva) é menor à medida que se aumenta a altura de instalação da antena:
 - para uma antena instalada a 10 metros de altura, com as demais especificações já apontadas [7], o pico é de 1,850 Volts por metro;
 - Caso essa mesma antena fosse instalada a 20 metros de altura, o pico seria reduzido a 0,847 Volts por metro;
 - Caso a antena fosse instalada a 30 metros de altura, o pico passaria a ser de 0,550 Volts por metro.
- ◆ Os valores máximos (o pico de cada curva), a medida em que a altura de instalação da antena é maior, são atingidos em pontos mais distantes da torre:
 - para a antena instalada a 10 metros de altura, o ponto a 1,5m de altura do solo (ponto P, de análise) em que se observa a maior intensidade do campo elétrico (pico) está a 20 metros de distância da torre;
 - para a mesma antena instalada a 20 metros de altura, o pico passa a ser registrado a 44 metros de distância da torre;
 - para a antena instalada a 30 metros de altura, o pico está a 68 metros de distância da torre.
- ◆ Tomando-se em consideração uma distância específica da torre de instalação da antena (de 50m, por exemplo), constata-se que a intensidade do campo elétrico não só tem valores diferentes como está em momentos distintos da curva:
 - para a antena instalada a 10 metros de altura, a intensidade do campo elétrico a 50 metros da antena é de 1,076 V/m e está em momento de curva descendente acentuada;

⁷ ponto de observação (ponto "P") distante 1,5 m do nível do solo, inclinação da antena de 8°, potência efetivamente irradiada de 2512 W.

- para a antena instalada a 20 metros de altura, a intensidade do campo elétrico a 50 metros da antena é de 0,833 V/m e está praticamente no pico da curva, que é apenas 1,7% superior a ele (0,847 V/m) e foi atingido seis metros antes (44 m);
- para a antena instalada a 30 metros de altura, a intensidade do campo elétrico a 50 metros da antena é de 0,492 V/m e ainda não atingiu o pico, que se verificará a 18 metros adiante (68 m).

B. Variação da intensidade do campo elétrico em função da variação do ângulo de inclinação da antena

O próximo gráfico (Figura 6) mostra o comportamento da intensidade do campo elétrico em função da distância x da base da ERB para três diferentes ângulos de inclinação da antena, quais sejam, 8°, 4° e 2°, mantendo-se as demais variáveis constantes [8]. Em seguida, a Tabela III aponta os valores da intensidade do campo elétrico para as distâncias $x = 5$ m, 30 m e 50 m da torre da antena, bem como para o pico da intensidade do campo elétrico correspondente a cada uma das alturas de instalação das antenas.

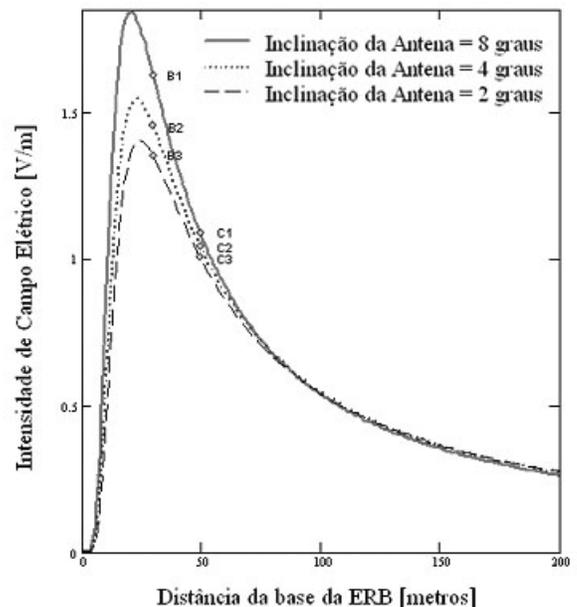


Figura 6 - Intensidade de campo elétrico em função da distância x da base da ERB considerando três diferentes ângulos de inclinação da antena.

Aos dados mostrados, acrescenta-se que ainda que na representação gráfica isso não transpareça de modo tão claro, também há variação do pico de cada uma das curvas (ponto em que há maior intensidade do campo elétrico proporcionado pela antena) quanto à distância em que o mesmo se verifica. Assim, os valores máximos para as inclinações de 8°, 4° e 2° são verificados respectivamente à distância de $x = 20$ m, 23 m e 24 m.

⁸ ponto de observação (ponto "P") distante 1,5 m do nível do solo, altura da antena de 10m, potência efetivamente irradiada de 2512 W.

Novamente se pode constatar que à medida que a inclinação é menor, menores são os picos das curvas, o que significa que são menores as intensidades dos campos elétricos ao nível do solo ou, como nos dados apurados, a 1,5 metros de altura do solo e tais picos são atingidos a distâncias mais distantes da torre.

TABELA III
INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA X DA BASE DA ERB PARA UMA ALTURA DA ANTENA DE 10 M E DIVERSAS INCLINAÇÕES DA ANTENA.

	Distância da torre	Diferentes ângulos de inclinação da Antena		
		8°	4°	2°
		Intensidade do Campo Elétrico em Volts por metro		
A	5m	0,077	0,033	0,021
B	30m	1,615	1,448	1,349
C	50m	1,076	1,034	0,997
Pico	variável	1,850	1,545	1,404

C. *Variação da intensidade do campo elétrico em função da variação da potência efetivamente irradiada da antena*

O gráfico apresentado a seguir (Figura 7) mostra o comportamento da intensidade do campo elétrico em função da distância x da base da ERB para três diferentes potências efetivamente irradiadas da antena, quais sejam, 2512 W, 1256 W e 754 W, mantendo-se as demais variáveis constantes^[9]. Em seguida, a Tabela IV aponta as intensidades dos valores do campo elétrico para as distâncias x = 5 m, 30 m e 50 m da torre da antena, bem como para o pico do campo em cada uma das torres.

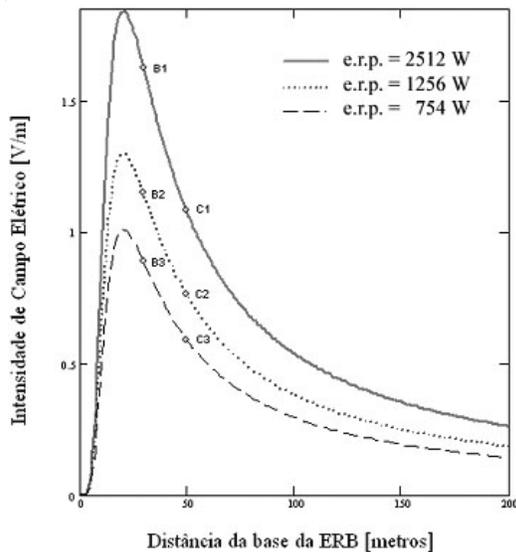


Figura 7 - Intensidade de campo elétrico em função da distância x da base da ERB considerando três diferentes potências efetivamente irradiadas da antena.

⁹ ponto de observação (ponto “P”) distante 1,5 m do nível do solo, altura da antena de 10m, ângulo de inclinação de 8°

TABELA IV
INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA X DA BASE DA ERB PARA UMA ALTURA DA ANTENA DE 10 M E DIVERSAS POTÊNCIAS DE ENTRADA.

	Distância da torre	Diferentes potências efetivamente irradiadas		
		2512 W	1256 W	754 W
		Intensidade do Campo Elétrico em Volts por metro		
A	5m	0,077	0,018	0,014
B	30m	1,615	1,142	0,885
C	50m	1,076	0,761	0,589
Pico	20m	1,850	1,303	1,009

Nota-se, a partir da Figura 7 que o pico das curvas, representando o máximo de intensidade do campo elétrico, ocorre sempre a uma mesma distância da base da ERB independente da potência da antena.

- As três curvas têm esse pico a 20 m de distância da torre.

Conclui-se, também, que quanto menor é a potência da antena, menor é o valor da intensidade do campo elétrico a uma mesma distância da base da ERB:

- para uma antena com potência efetivamente irradiada de 2512 W o pico é de 1,850 Volts por metro;
- para uma antena com potência efetivamente irradiada de 1256 W o pico é de 1,303 Volts por metro;
- para uma antena com potência efetivamente irradiada de 754 W o pico é de 1,009 Volts por metro.

IV. CONCLUSÕES

As propriedades direcionais de radiação de antenas rádio-base foram apresentadas e discutidas em detalhe neste trabalho. Foram consideradas diversas variáveis além da usual distância à base da torre da estação rádio-base (ERB). Foi demonstrado que o máximo da intensidade do campo elétrico ocorre a distâncias diferentes da base da ERB dependendo destas outras variáveis, levando à conclusão que se fixar uma distância mínima de regiões povoadas para a instalação de ERBs não é a maneira adequada para se assegurar a segurança e o bem-estar da população. O re-posicionamento de uma ERB para uma distância de 50 m, por exemplo, pode na realidade aumentar a intensidade do campo elétrico em mais de mil vezes na área que se deseja proteger. Isto demonstra a arbitrariedade e a falta de consistência técnica na imposição de distâncias mínimas de proteção. O critério científico correto e seguro é o de se limitar o valor da intensidade do campo elétrico máximo resultante de todas as antenas em operação na faixa de frequências considerada [3].

REFERÊNCIAS

- [1] GSM World e Wireless Intelligence (<http://www.gsmworld.com> e <https://www.wirelessintelligence.com>) obtido em 18 de Janeiro de 2007.
- [2] Lei nº. 3.446, de 23 de setembro de 2004, do Distrito Federal, publicada no Diário Oficial do Distrito Federal de 7 de outubro de 2004.
- [3] “Regulamento sobre limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz” aprovado pela Resolução Anatel nº. 303, de 2 de julho de 2002.
- [4] L.C. Godara (ed.), *Handbook of Antennas in Wireless Communications*, CRC Press, 2002.
- [5] W.L. Stutzman e G.A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2ª Edição, John Wiley & Sons, 1998.
- [6] M.A.B. Terada, A.J.M. Soares, F.C. Silva, e S.B.A. Fonseca, “GRADMAX: Um Programa Para Análise e Otimização de Antenas de Fios”, *TELEMO92 (Software Educacional): X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e V Simpósio Brasileiro de Microondas*, Brasília - DF, pp. 15-18, Julho de 1992.
- [7] M.A.B. Terada, A.J.M. Soares e S.B.A. Fonseca, “Análise de Estruturas de Linhas de Transmissão Através do Método dos Elementos Finitos”, *IV Simpósio Brasileiro de Microondas: SBMO - EESC/USP*, São Carlos – SP, pp. 199-204, Julho de 1990.
- [8] Resolução nº. 315 da ANATEL, de 19 de Setembro de 2002.



Marco Antonio Brasil Terada nasceu em São Paulo, SP, em Novembro de 1966. Recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) em 1989 e 1991, respectivamente. Em 1995 recebeu o título de Ph.D em Engenharia Elétrica pela Universidade Virginia Tech - EUA.

Desde Agosto de 1995 é professor da UnB, onde atua nas áreas de Antenas e Sistemas de Comunicações Sem-Fio. Foi Engenheiro Sênior e

Gerente de Antenas do programa INTELSAT IX (sete satélites operando nas bandas C e Ku) na empresa INTELSAT (1998 a 2001), Washington – EUA, e professor da Universidade Estadual do Novo México – EUA. (2001 a 2004). Seus interesses correntes incluem a pesquisa e desenvolvimento de antenas e sistemas de comunicações com alta taxa de rejeição sistêmica (isolamento). É bolsista do CNPq em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora.