

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE**

Secretaria de Educação
Profissional e Tecnológica

Ministério
da Educação



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL**

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NAS
PROXIMIDADES DE ESTAÇÃO RÁDIO BASE: MEDIÇÃO E ESTIMATIVA
ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

WANDERSON DE ANDRADE PAULA MANHÃES

MACAÉ/RJ

2014

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NAS
PROXIMIDADES DE ESTAÇÃO RÁDIO BASE: MEDIÇÃO E ESTIMATIVA
ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

WANDERSON DE ANDRADE PAULA MANHÃES

Projeto de Pesquisa da linha
Avaliação e Gestão Ambiental, área de
atuação Análise Ambiental, apresentada
para avaliação.

Orientação: Marcos Antonio Cruz Moreira, D.Sc.

Co-orientação: Pedro Armando Vieira

MACAÉ/RJ

2014

Dissertação intitulada AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO NAS PROXIMIDADES DE ESTAÇÃO RÁDIO BASE: MEDICÃO E ESTIMATIVA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, elaborada por WANDERSON DE ANDRADE PAULA MANHÃES e apresentada publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, na área de atuação Análise Ambiental, linha de pesquisa Avaliação e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em

Banca Examinadora:

.....
Marcos Antonio Cruz Moreira, Doutorado em Engenharia Elétrica (COPPE/UFRJ)/ Instituto Federal Fluminense – Orientador

.....
Pedro Armando Vieira, Mestrado em Sistemas de Telecomunicações (UFF)/ Instituto Federal Fluminense – Petrobras – Co-orientador

.....
Antonio Carlos Ferreira, Ph. D. em Engenharia Elétrica (Universidade de Cambridge, Inglaterra)/ COPPE / UFRJ

.....
Jader Lugon Junior, Doutorado em Modelagem Computacional (UERJ) / Instituto Federal Fluminense

DEDICO ESTA DISSERTAÇÃO

A Deus, minha família, amigos, colegas de trabalho e meus orientadores pelo apoio, força, incentivo, companheirismo e amizade. Sem eles certamente nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

- A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.
- Aos meus orientadores e amigos os Professores Marcos Antonio Cruz Moreira e Pedro Armando Vieira, por acreditarem em mim, me mostrarem o caminho da ciência, fazerem parte da minha vida nos momentos bons e ruins e por serem exemplos de profissional.
- A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro na aquisição do Software e o Analisador espectrômetro MS2712E.
- À minha família, a qual amo muito, pelo carinho, paciência e incentivo.
- Aos amigos que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

EPÍGRAFE

“Somente um principiante que não sabe nada sobre ciência diria que a ciência descarta a fé. Se você realmente estudar a ciência, ela certamente o levará para mais perto de Deus.”

James Clerk Maxwell

RESUMO

O problema proposto é a avaliação, para fins de segurança ambiental, do campo eletromagnético irradiado por estações rádio base. Investiga-se se esta avaliação, partindo da resolução da equação que rege os campos elétricos emitidos pela Estação Raio Base através de métodos numéricos executados por mecanismos computacionais, é adequada. Neste trabalho avaliaremos a combinação de dois métodos de resolução numérica das equações que regem o universo dos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, tanto estacionários quanto variáveis no tempo. Serão trabalhados o Método de Elementos Finitos, responsável pelas resoluções de equações diferenciais e o Método dos Elementos de Contorno, responsável pela resolução das equações integrais, de forma conjunta conhecida como método híbrido. O Método híbrido, aqui trabalhado, é o modelo que reúne as vantagens de cada método, tanto Método dos Elementos Finitos (MEF) quanto o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Também serão apresentados exemplos de simulações eletromagnéticas realizadas com o *software High Frequency Structural Simulator (HFSS)* baseado no Método Híbrido e *software ANSYS*, baseado no Método dos Elementos Finitos. São ilustrados exemplos práticos de situações específicas, como a da estação radio base (ERB) localizada no campus Macaé do Instituto Federal Fluminense.

Palavra chave: ANSYS HFSS (*High Frequency Structural Simulator*), Poluição Eletromagnética, Modelagem Matemática.

ABSTRACT

The problem is the proposed assessment for environmental safety, the electromagnetic field radiated by radio base stations. Investigating whether this assessment based on the resolution of the equation governing the electric fields emitted by Radio Base Station using numerical methods executed by computer systems is adequate. In this paper we evaluate the combination of two methods for numerical solution of the equations governing the universe of electric, magnetic and electromagnetic fields, both stationary and variable in time. Will be worked the Finite Element Method, responsible for the resolutions of differential equations and the Boundary Element Method, responsible for solving integral equations, jointly known as hybrid method. The hybrid method, worked here, is the model which combines the advantages of each method, both the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method the (MEC). Examples of electromagnetic simulations with the High Frequency Structural Simulator (HFSS) software based on the Hybrid Method and ANSYS software based on the Finite Element Method will also be presented. Practical examples of specific situations, such as the radio base station (RBS) located in Macae campus of the Instituto Federal Fluminense are illustrated.

Keyword: ANSYS HFSS (High Frequency Structural Simulator), Electromagnetic Pollution, Mathematical Modeling.

LISTA DE FIGURAS ARTIGO I**FIGURA 1**

Evolução do problema de EMC/EMI 4

FIGURA 2

Painel com 4 antenas dipolo..... 10

FIGURA 3

Antena com polarização cruzada..... 10

FIGURA 4

Diagrama de Irradiação Típicos para Antenas GSM..... 11

FIGURA 5

Localização do IFF onde está localizada a Estação Rádio Base Estudada..... 13

FIGURA 6

Localização da Estação Rádio Base Estudada..... 13

FIGURA 7

Analisador de Espectro..... 14

FIGURA 8

Antena GPS do MS2712E..... 14

FIGURA 9

Conjunto de Antenas de Medição..... 14

FIGURA 10

Bancada de Coleta dos Dados..... 15

FIGURA 11

Rotas de medição no entorno do campus do IFF 15

FIGURA 12

Maior potência detectada em uma rota no entorno do campus..... 16

LISTA DE FIGURAS ARTIGO II**FIGURA 1**

Malha e elementos bidimensionais27

FIGURA 2

Modelo no HFSS.....28

FIGURA 3

Resultado para diretividade da Antena em comparação com uma antena Isotrópica e unidades em dBi.....30

FIGURA 4

Resultado para Campo Próximo potência irradiada padronizada de 1 W – Modelo HFSS30

FIGURA 5

Resultado para Campo Próximo potência irradiada padronizada de 1 W – Modelo HFSS-IE + envoltória de ar modelada com região IE31

FIGURA 6

Resultado para Campo Próximo potência irradiada 50 W – Modelo HFSS-IE.....31

FIGURA 7

Rota de Medições de Campo Irradiado no Entorno da ERB32

FIGURA 8

Antenas Padrão32

FIGURA 9

Antenas de Campo Próximo.....32

FIGURA 10

Campo Absorvido por Esfera com Propriedades Materiais do Cérebro Humano.....33

FIGURA 11

Taxa de Absorção Específica W/Kg.....33

LISTA DE FIGURAS, ANEXOS E APÊNDICES

FIGURA 1

Intervalos de frequência emitidos pelas ERB's de Macaé.....38

FIGURA 2

Lista das ERB's de Macaé.....38

FIGURA 3

Nesta imagem existem duas medições sobrepostas, os valores das medições distante (todas em amarelo) foram feitas com os intervalos descritos no texto acima. As medições no entorno do IFF foram feitas nos valores apresentados na imagem.....40

FIGURA 4

Conexão digital entre o MS2712E e o Microcomputador via USB.....42

FIGURA 5

Procedimentos para o acesso aos dados coletados pelo MS2712E.....42

FIGURA 6

Apresentação do Metadado relativo a um ponto de uma das medições realizadas no entorno do IFF - Macaé.....43

FIGURA 7

Intensidade, em dBi, de uma sequência de pontos coletados.....43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1

Grandezas elétricas, eletromagnéticas, dosimétricas e unidades correspondentes SI4

TABELA 2

Faixas de frequências7

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Boundary Element Method
CAE	Computer Aided Engineering
CEM	Campos eletromagnéticos
CGS	Centimetre-gram-second system
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EHC	Environmental Health Criteria
EHF	Extremely High Frequency
ELF	Extremelylowfrequency
EMC	ElectromagneticCompatibility
EMI	Electromagnetic Interference
ERB	Estação Rádio-Base
FEM	Finite Element Method
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System Mobile
HF	High Frequency
HFSS	High Frequency Structural Simulator
ICNIRP	International Commissionon Non-Ionizing Radiation Protection
IE	Integral Equation
INIRC	International Non-Ionizing Radiation Commission
IRPA	International Radiation Protection Association
LF	Low Frequency

LMT	Sistema dimensional: Comprimento, Massa e Tempo
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos elementos de Contorno
MEF	Método dos elementos Finitos
MF	Middle Frequency
MoM	Method of Moments
NIR	Non-Ionizing Radiation
OMS	Organização Mundial de Saúde
RF	Rádio Frequência
RNI	Radiação Não-Ionizante
SAR	Specific Absorption Rate
SHF	Super High Frequency
SI	Sistema Internacional de Medidas
UHF	Ultra High Frequency
UTM	Universal Transversal Mercator
VHF	Very High Frequency
VLf	VeryLowFrequency
WHO	World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

A/m	Ampere por metro
\vec{B}	Densidade de Fluxo Magnético
c	Constante velocidade da luz
dB	Decibel
\vec{E}	Campo elétrico
f	Frequência
\vec{H}	Campo Magnético
Hz	Hertz
\vec{J}	Densidade da corrente
\vec{M}	Vetor Magnetização
Oe	Oersted
\vec{S}	Vetor de Poynting - Densidade de Potência
W	Watt
ε	Permissividade Elétrica
μ	Permeabilidade Magnética
ρ	Densidade de Carga Elétrica
σ	Condutividade
Ω	Ohm
$\Phi_{\vec{H}}$ ou \vec{B}	Fluxo de Campo Magnético
$\Phi_{\vec{E}}$	Fluxo de Campo Elétrico

SUMÁRIO

Artigo Científico I	1
Resumo	1
Abstract	1
1. Introdução	2
2. Conceito de Poluição Eletromagnética e seus Efeitos sobre a Saúde Animal e Vegetal	4
3. O Espectro de Frequência dos Campos Eletromagnéticos	5
4. Revisão de Literatura	7
4.1. Normas de exposição	7
4.2. Efeitos sobre o Corpo Humano	8
4.3. Principais Características das Antenas	9
5. Rádio Frequência e Estações Rádio Base em Ambientes Urbanos	11
6. Estudo de Caso	12
7. Resultados e Discussão	16
8. Conclusões	18
9. Referencias	19
 Artigo Científico II	 22
Resumo	22
Abstract	23
1. Introdução	24
2. Métodos Numéricos Aplicados na Avaliação de Irradiação por ERBs	24
3. Das Equações de Campos Eletromagnéticos	25
4. Material e Métodos	27
4.1 Método dos Elementos Finitos – MEF	27
4.2 Métodos Integrais	27
4.3 Método Híbrido	28
4.4 Modelo Utilizado na Análise	28
5. Resultados	29
6. Discussão	31
7. Conclusões	33
8. Referências	35

Anexo I – Resposta do Ministério do Meio Ambiente sobre legislações	37
Anexo II – Características da ERB	38
Apêndice A – Script para confecção dos mapas em formato aceito pelo analisador espectrômetro MS2712E	39
Apêndice B – Script para coleta de dados com o analisador MS2712E.....	40
Apêndice C – Acessando as imagens e os dados coletados.....	42
Apêndice D – Outras informações	45

Artigo Científico I

Avaliação Ambiental dos Campos Eletromagnéticos Irrradiados por uma Estação Rádio Base

Environmental Assessment of Electromagnetic Fields Emitted by a Radio Base Station.

Wanderson De Andrade Paula Manhães¹

Marcos Antonio Cruz Moreira²

Pedro Armando Vieira³

RESUMO

A exposição crescente da população, em geral, às ondas eletromagnéticas em decorrência do crescimento acelerado das facilidades e tecnologias de telecomunicações sem fio, tem motivado a investigação dos possíveis efeitos, sob o ponto de vista da saúde pública, em geral e ocupacional. Como contribuição da Engenharia Ambiental ao assunto foi efetuada uma revisão abrangente da literatura sobre o assunto e realizadas medidas de campo para avaliar a conformidade da Estação Rádio Base localizada no campus Macaé do IF Fluminense como estudo de caso.

Palavra chave: Poluição Eletromagnética, Analisador Espectrômetro MS2712E.

ABSTRACT

The increasing exposure of the general public to electromagnetic waves due to the rapid growth of facilities and wireless telecommunication technologies has motivated research into the possible effects from the point of view of public health in general as well as occupational health of workers involved. As an Environmental Engineering contribution to the subject it has been conducted a comprehensive literature review on the subject and conducted field measurements to assess compliance of Radio Base Station located on the campus of Macaé of IF Fluminense as a case study.

Keyword: Electromagnetic Pollution, Analyzer Spectrometer MS2712E.

¹Mestrando em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense, Técnico em Logística Ambiental pelo Instituto Federal do Rio de Janeiro e Graduado em Matemática pela Universidade Federal Fluminense.

²Engenheiro Eletrônico e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e Professor no Curso de Mestrado do Instituto Federal Fluminense.

³Mestre em Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense professor no Instituto Federal Fluminense – Macaé.

Introdução

Campos eletromagnéticos (CEM) ocorrem na natureza e sempre estiveram presentes na Terra. Entretanto, durante o século XX, a exposição ambiental a fontes de CEM criadas pelo homem aumentou consistentemente devido à demanda por energia elétrica. Todos estão expostos a uma mistura complexa de campos elétricos e magnéticos em muitas frequências diferentes, em casa ou no trabalho. (OMS, 2002)

Cronologicamente falando, em 1550, Gerolamo Cardano discute em seu livro “*De Subtilitate*” as diferenças entre forças elétricas e forças magnéticas. E é a partir daí que eletricidade e magnetismo são estudados com rigor científico. Destes estudos de Cardano, com a eletricidade e o magnetismo sendo pesquisados sistematicamente, que deram origem à obra “*De Magnete*”, onde explica que outros materiais, além do âmbar, adquiriam, quando atritados, a propriedade de atrair outros corpos, e chamou a força observada de elétrica.

No final do século XVIII, importantes descobertas no estudo das cargas estacionárias foram conseguidas com os trabalhos de Joseph Priestley, Lord Henry Cavendish, Charles Augustin de Coulomb e Siméon-Denis Poisson. Os caminhos estavam abertos e em poucos anos os avanços dessa ciência foram espetaculares.

Na obra de Massazumi (2000), observamos que a transição para “o século XX é marcada pelos seguintes fatos e pelas seguintes contribuições no que diz respeito ao eletromagnetismo:”

1864 - James Clerk Maxwell apresenta em “*A Treatise on Electricity and Magnetism*” as quatro equações do eletromagnetismo, consolidando os experimentos de Faraday. Tais equações preveem a existência das ondas eletromagnéticas, e anuncia que a própria luz é uma forma de eletromagnetismo.

1892 - Tesla realiza a primeira transmissão de rádio; porém, esta invenção é creditada, embora sob controvérsias, a Guglielmo Marconi em 1904.

1905 - Albert Einstein (alemão naturalizado americano) explica o efeito fotoelétrico descoberto por Hertz em 1887. Recebeu o prêmio Nobel de Física de 1921.

Após este pequeno histórico podemos ver a importância que o eletromagnetismo apresenta no mundo modernizado. De acordo com o Instituto Edumed para Educação em Medicina e Saúde em seu artigo intitulado *Padrões e Políticas de Proteção da Radiação Não-Ionizante*,

“as pesquisas sobre radiações não-ionizantes (NIR em Inglês), em particular sobre a radiofrequência (RF), começou na década de 1950, logo após a Segunda Guerra Mundial, mas a regulamentação sobre limitação da exposição começou bem mais tempo depois, nos anos 70, apenas.

O primeiro esforço significativo para estabelecer limites internacionais de exposição às NIR foi feito pela *International Radiation Protection Association* (IRPA), que formou um grupo de trabalho sobre NIR para examinar as questões de radioproteção. Em 1977, este grupo de trabalho tornou-se o *International Non-Ionizing Radiation Commission* (INIRC). Dentro do programa da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre Saúde Ambiental, a IRPA e o INIRC desenvolveram vários critérios de saúde ambiental (*Environmental Health Criteria* - EHC) e documentos sobre NIR, cada um dos quais incluía diversos resumos das características físicas, medição e instrumentação, origens e aplicações da NIR, uma ampla revisão

da literatura sobre efeitos biológicos, e uma avaliação dos riscos para a saúde da exposição a NIR. Estes EHCs forneceram a base de dados científicos para o desenvolvimento posterior dos limites de exposição e códigos de boas praticas relativas à proteção da exposição às NIRs” (LASR, 2010).

Na física do eletromagnetismo, um campo eletromagnético é um campo composto de dois vetores: o campo elétrico e o campo magnético. Os vetores (E e H) que caracterizam esses dois campos possuem um valor definido a cada ponto no espaço e tempo. Se apenas o campo elétrico (E) não for nulo, e constante no tempo, esse campo é denominado campo eletrostático. E e H (o campo magnético) são unidos pelas Equações de Maxwell.

Por definição uma onda eletromagnética consiste de uma mútua alternância entre uma variação de campo magnético, que por sua vez gera um campo elétrico, os campos elétricos são gerados pela diferença de potencial entre dois pontos no espaço, e uma variação no campo elétrico que produz uma corrente e que gera um campo magnético. Esta energia alternando de um campo para o outro e propagando-se no espaço na forma ondulatória é a chamada onda eletromagnética.

Campos eletromagnéticos também podem ser explicados com base quântica pela eletrodinâmica quântica. Porém este trabalho não se aprofundará nas definições quânticas embora o estudo do Eletromagnetismo fuja das definições da física clássica vez ou outra.

Partindo da eletrostática temos que uma carga elétrica (ou uma distribuição de cargas elétricas pontuais) produz um campo elétrico constante (E). Na magnetostática, uma corrente estacionária (produzida por um fluxo constante - sem acumulação de cargas elétricas) produz um fluxo magnético constante (Φ_H).

A definição matemática bem conhecida do Campo Magnético (H) é dada por:

$$\vec{H} = \frac{(\Phi_H)}{\mu_0} - M$$

na qual M é a magnetização do material e μ_0 é a permeabilidade do vácuo (ou a constante magnética). O campo H é medido em amperes por metro (A/m) em unidades do SI, e em Oersteds (Oe) em unidades CGS. Um campo magnético pode ser calculado dividindo o fluxo magnético deste campo por metro quadrado, e sua unidade no SI (Sistema Internacional) é o Tesla (COSTA, 2006). A Tabela 1, a seguir, apresenta as grandezas eletromagnéticas mais comumente empregadas nos estudos sobre exposição a campos eletromagnéticos e as respectivas unidades no Sistema Internacional.

Absorção Específica	SA	Joule por quilograma ($J.kg^{-1}$)
Campo Elétrico	\vec{E}	Volt por metro ($V.m^{-1}$)
Campo Magnético	\vec{H}	Ampère por metro ($A.m^{-1}$)
Condutividade	Σ	Siemens por metro ($S.m^{-1}$)
Corrente	I	Ampère (A)
Densidade da corrente	J	Ampère por metro quadrado ($A.m^{-2}$)
Densidade de Fluxo Magnético	\vec{B}	Tesla (T)
Frequência	f	Hertz (Hz)
Permeabilidade Magnética	μ	Henry por metro ($H.m^{-1}$)
Permissividade	ϵ	Farad por metro ($F.m^{-1}$)
Taxa de Absorção Específica	SAR	Watt por quilograma ($W.kg^{-1}$)

Tabela 1: Grandezas elétricas, eletromagnéticas, dosimétricas e unidades correspondentes SI.

Fonte: Autor (2014)

1. O Conceito de Poluição Eletromagnética e seus Efeitos sobre a Saúde Humana, Animal e Vegetal

Efeitos potenciais dos Campos Eletromagnéticos (CEM) gerados pelo homem sobre a saúde têm sido objeto de interesse desde os anos 1970, a princípio sob o ponto de vista da saúde pública conforme estudos conduzidos por agências governamentais. Trabalhos pioneiros de MILLS et.al. (1971) para a FDA (*Food and Drug Administration*) do Departamento de Agricultura dos EUA e TELL (1973) para a EPA (*Environmental Protection Agency*) são marcos iniciais na questão. Naturalmente o assunto tem recebido atenção crescente ao longo dos últimos trinta anos pelo aumento no número de equipamentos em utilização, assim como pelo uso de frequências cada vez mais elevadas no espectro de micro-ondas. Outro aspecto significativo é sensibilidade e à interferência entre os equipamentos, agravado pelo crescimento do setor de telecomunicações, conforme é bem ilustrado pela Figura 1.

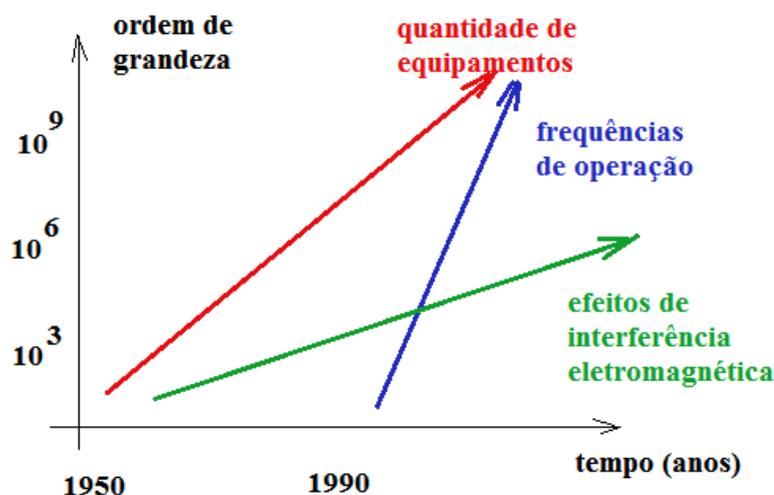


Figura 1: Evolução do problema de EMC/EMI

fonte: www.abricem.com.br com adaptação do autor (2014)

Este crescimento justifica a cunhagem da expressão “Poluição Eletromagnética” (YUPING et al, 2005;BALMORI, 2009;GENÇ et al,2010) que tem acepções diferentes conforme seja objeto de estudo pela Engenharia Elétrica e Engenharia de Telecomunicações (preocupadas com as questões de compatibilidade eletromagnética e interferência eletromagnética) ou pela Medicina e Engenharia Ambiental (preocupadas com os efeitos sobre a saúde humana e sobre os ecossistemas). Desta forma, a poluição ambiental decorrente do eletromagnetismo é um tema de pesquisa relevante, estreitamente ligado a duas vertentes de pesquisa: uma delas investiga o efeito sobre a saúde humana e outra investiga a compatibilidade eletromagnética, ou seja, os limites de interferência recíproca entre equipamentos.

Para a Engenharia Ambiental vale ressaltar que as preocupações com os efeitos dos CEM não se restringem à saúde humana. Outra preocupação referente a campos elétricos e magnéticos que tem grande importância a ser citada é a exposição de Unidades de Preservação Ambiental. Como fica bem claro em Gomide (2008), as redes de transmissão produzem impactos ambientais em sua vizinhança. Alguns estudos serviram de base para criação de mapas de intensidades que por sua vez estabeleceram os limites das habitações humanas referente às redes de transmissão elétrica. A partir desses trabalhos a atenção voltou-se para a fauna e também a flora circundante a estas fontes de Radiofrequência. Existem muitas possibilidades de interferência destas emissões nas vidas micro e macroscópicas, comunicações entre determinadas espécies de animais, rotas migratórias, desenvolvimento vegetal, dentre muitos outros tópicos.

Existem iniciativas, voltadas para estes fins, como o grupo de técnicos do IBAMA que criou um “Modelo de valoração econômica dos impactos ambientais em unidades de conservação” de forma a avaliar e calcular as possíveis compensações ambientais.

Estas análises são feitas com base em pesquisas científicas internacionais, e com estas são propostas tabelas de riscos ambientais advindos das radiações, que permitem verificar a situação de cada região dentro do perímetro das unidades ou zonas de amortecimento.

2. O Espectro de Frequência dos Campos Eletromagnéticos

Os CEM podem ser divididos, de maneira geral, entre campos elétricos e magnéticos estáticos e variantes no tempo, neste último caso dividido entre emissões de baixa frequência -onde as fontes comuns incluem linhas de transmissão, aparelhos eletrodomésticos e computadores, e emissões de alta frequências ou de radiofrequências, para os quais as fontes principais são radares, instalações de emissoras de rádio e televisão, telefones móveis e suas estações rádio-base, aquecedores de indução e dispositivos antirroubo. (OMS, 2002).

De acordo com boletins da OMS as radiações não-ionizantes, ao contrário das radiações ionizantes- tais como raios gama emitidos por materiais radioativos, raios cósmicos e raios-X - que ocupam a parte superior do espectro eletromagnético, são demasiado fracas para quebrar as ligações que mantêm as moléculas ligadas em células e, portanto, não podem produzir ionização. É por essa razão que CEM são chamados de 'radiação não-ionizante' (RNI) (OMS, 2002).

Os limites da exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, visando garantir a proteção da saúde e do meio ambiente foram estabelecidos no Brasil pela Lei 11.934 de 5 de Maio de 2009 e a Regulamentação sobre Limitação da Exposição a

Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, que são as radiações foco deste trabalho, são estabelecidas na RESOLUÇÃO N° 303, de 2 de Julho de 2002 publicada pela ANATEL em consonância com as normas e os estudos publicados pela OMS.

Para fins de licenciamento e adequação das instalações existentes, que são geradoras de irradiação eletromagnética, os órgãos reguladores estabelecem diversos procedimentos de medição e verificação de conformidade. Um paradigma bem estabelecido na área de estudos sobre compatibilidade e interferência eletromagnéticas descreve que no início de um projeto de equipamento ou instalação existe grande disponibilidade de técnicas a baixo custo para minimização dos efeitos de irradiação. Esta situação se inverte quando se trata da adequação de um equipamento ou instalação já em operação, quando as técnicas disponíveis são mais restritas e o custo de implantação maior.

Em função da legislação mencionada acima (Lei 11.934/2009), diversos empreendimentos têm que se adequar, nos termos da lei, que define como “sistema de energia elétrica: conjunto de estruturas, fios e cabos condutores de energia, isoladores, transformadores, subestações e seus equipamentos, aparelhos, dispositivos e demais meios e equipamentos destinados aos serviços de geração, transmissão, distribuição e ao uso de energia elétrica” e como áreas críticas “área localizada até 50 (cinquenta) metros de hospitais, clínicas, escolas, creches e asilos”.

A abordagem citada acima refere-se aos Campos Eletromagnéticos (CEM) de baixa e baixíssima frequência, *Extremely Low Frequency* (ELF), e remete para a agência reguladora dos serviços de telecomunicações (ANATEL) a expedição de normas referentes a emissões de frequências mais altas. Em virtude de uma extensa faixa espectral geradora de CEMs, por razões metodológicas, deve-se deixar claro que este trabalho se restringe apenas à análise das problemáticas referentes a CEM de frequência ultra alta, *Ultra High Frequency* (UHF).

O espectro de rádio frequência pode ser resumido conforme faixas e características assim apresentadas abaixo (FELICE, 2005):

- Faixa ELF (*Extremely Low Frequency*) – Faixa de frequência cujas ondas penetram razoavelmente no solo ou na água, portanto possui aplicações em comunicação com submarinos e escavações de minas. As aplicações operam nesta faixa com transmissores de alta potência e grandes antenas;

- Faixa VLF (*Very Low Frequency*) – O mecanismo de propagação utilizado nesta faixa é a reflexão ionosférica, sendo considerado um ótimo condutor, pois induz pequena atenuação na onda refletida;

- Faixa LF (*Low Frequency*) – Até os 30kHz nesta faixa, que vai até os 300kHz, a reflexão ionosférica é utilizada, embora a atenuação na onda seja maior que a da faixa de VLF;

- Faixa MF (*Middle Frequency*) – Acima de 300kHz até 3 GHz, o mecanismo de propagação utilizado é o de ondas de superfície com menor atenuação que o da reflexão ionosférica;

- Faixa HF (*High Frequency*) – Nesta faixa de frequência aparece o mecanismo da refração ionosférica, visto que em regiões mais próximas do transmissor ainda permanece a presença das ondas de superfície;

- Faixa de VHF (*Very High Frequency*) em diante – Nestas faixas não se utiliza mais a refração ionosférica, pois as ondas refratadas não atingem o ângulo necessário até os limites da ionosfera para retornar à superfície terrestre. Acima de VHF são usadas antenas diretivas

que concentram a energia em feixes mais estreitos, estabelecendo as ligações por meio da onda espacial direta entre as duas antenas – transmissora e receptora, formando sistemas em visada direta. Nas faixas de VHF e UHF (*Ultra High Frequency*) é possível trabalhar com enlaces obstruídos, enquanto que nas faixas de SHF (*Super High Frequency*) e EHF (*Extremely High Frequency*) deve-se necessariamente ter visibilidade direta.

Todos estes dados e suas faixas específicas podem ser observadas na tabela 2.

Faixas de Frequências			
Limite de frequência	Compr. de onda - λ	Denominação	Observações
30 - 300 Hz	$10^4 - 10^3$ Km	ELF	-
300 - 3000 Hz	$10^3 - 10^2$ Km	VF	Frequência de voz
3 - 30 KHz	$10^2 - 10$ Km	VLF	Ondas muito longas
30 - 300KHz	10 - 1 Km	LF	Ondas longas
300 - 3000 KHz	1000 - 100 m	MF	Ondas médias
3 - 30 MHz	100 - 10 m	HF	Ondas curtas
30 - 300 MHz	10 - 1 m	VHF	Ondas muito curtas
300 - 3000 MHz	100 - 10 cm	UHF	Microondas
3 - 30 GHz	10 - 1 cm	SHF	Microondas
30 - 300 GHz	10 - 1 mm	EHF	Microondas
300 - 3000 GHz	1 - 0,1 mm	Não possui	-
3 - 375 THz	100 - 0,8 μ m	Infravermelho	Comunicações ópticas
375 - 790 THz	0,8 - 0,38 μ m	Luz visível	-
790 - 22.500 THz	380 - 13,3 nm	Ultravioleta	-

Tabela 2: Faixa de frequências (fonte: Próprio autor 2014)

A Resolução 303/2002 da ANATEL, regulamenta sobre limitação de exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Nesta é exigido que os projetos de enlaces rádio (ponto a ponto, ponto multiponto, *broadcasting*, etc.) atendam a determinados limites, considerando-se todo o intervalo de frequência avaliado, e não somente os novos equipamentos a serem implantados. Para estações já existentes foram estabelecidos prazos para suas adequações. Em ambos os casos é exigida a emissão de relatório de conformidade, por profissional habilitado.

3. Revisão de Literatura

4.1 - Normas de exposição

O primeiro esforço significativo para estabelecer limites internacionais de exposição à Radiação Não Ionizante (RNI) foi feito pela *International Radiation Protection Association* (IRPA), que formou um grupo de trabalho sobre RNI para examinar as questões de radioproteção. Em 1977, este grupo de trabalho tornou-se o *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP). Dentro do programa da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre Saúde Ambiental, a IRPA e o ICNIRP desenvolveram vários critérios de

saúde ambiental (*Environmental Health Criteria* - EHC) e documentos sobre RNI, cada um dos quais incluía diversos resumos das características físicas, medição e instrumentação, origens e aplicações da RNI, uma ampla revisão da literatura sobre efeitos biológicos, e uma avaliação dos riscos para a saúde da exposição a RNI. Estes EHCs forneceram a base de dados científicos para o desenvolvimento posterior dos limites de exposição e códigos de boas práticas relativas a proteção da exposição as RNIs (LASR, 2010).

As diversas normas internacionais que tratam da exposição a campos eletromagnéticos, seja em níveis ocupacionais ou para o público em geral, recomendam valores muito próximos entre si (ANATEL,2002; IEEE, 1992; EC,1999). Especificamente para a frequência em estudo neste trabalho (1.875 GHz)os valores de referência para o público em geral, conforme as normas ANATEL, ICNIRP, EC e IEEE são os apresentados a seguir:

Campo Elétrico: 61 V/m

Campo Magnético: 0.16 A/m

Densidade de Potência: 10 W/m²

4.2 – Efeitos sobre o Corpo Humano

Na literatura encontramos dois efeitos sobre a interação de CEM que são definidas como efeito direto e indireto. De acordo com a ANATEL (2007) os efeitos diretos resultam da interação direta de campos com o corpo humano, e os efeitos indiretos envolvem interações com um objeto a um potencial elétrico diferente do corpo.

Os efeitos diretos resultam da interação direta de campos com o corpo humano. O mais comum, na faixa da Radio Frequência (RF) é o calor gerado por conversão, atingindo profundamente as camadas tissulares promovendo a oxigenação, nutrição e vasodilatação dos tecidos de acordo com estudos voltados para medicina. (CARVALHO et al, 2013).

A OMS (2006) diz que

“uma preocupação comum em relação às estações rádio base e as antenas das redes sem fio, diz respeito aos efeitos à saúde que possam advir da exposição de longo prazo do corpo aos sinais de RF. Até o momento, o único efeito a saúde causado pelos campos RF, identificado pelas revisões científicas, relaciona-se ao aumento na temperatura corporal (>1 °C) devido a exposição a intensidades muito altas de campo, que se encontra apenas em certas instalações industriais que utilizam aquecedores RF. Os níveis de exposição de RF a partir das Estações Rádio Base (ERBs) e de redes sem fio são tão baixos que os aumentos de temperatura são insignificantes e insuficientes para afetar a saúde humana.”

E a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) afirma:

“Ao estabelecer os limites de exposição, a Comissão reconheceu a necessidade de reconciliar diferentes opiniões de especialistas. Tem que se considerar a validade de relatórios científicos e tem que se extrapolar experiências com animais, para efeitos nas pessoas. As restrições incluídas nestas diretrizes foram baseadas somente em dados científicos; entretanto, o conhecimento atualmente disponível, indica que estas restrições propiciam um nível adequado de proteção contra a exposição a CEM variáveis no tempo.”

Em decorrência dos fatores citados acima, bem como para garantir a proteção da saúde e do meio ambiente em todo o território brasileiro, a lei 11.934 de 5 de Maio de 2009 estabeleceu que sejam adotados os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde - OMS para a exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos gerados por estações transmissoras de radiocomunicação, por terminais de usuário e por sistemas de energia elétrica que operam na faixa até 300 GHz.

Vale ressaltar ainda que “pesquisas recentes indicaram que as exposições a RF, advindas das ERBs e das tecnologias sem fio, em áreas acessíveis ao público (inclusive escolas e hospitais) estão normalmente, milhares de vezes abaixo dos padrões internacionais” e que “a intensidade dos campos de RF é maior na fonte emissora, e diminui rapidamente com a distância” (OMS, 2006).

Quanto à indução de câncer pela exposição de longa duração a CEM, não foi considerada estabelecida. Por essa razão, as diretrizes estabelecidas pela ANATEL são baseadas em efeitos na saúde de caráter imediato, em curto prazo, tais como estimulação dos nervos periféricos e músculos, choques e queimaduras causadas por tocar em objetos condutores, e elevação de temperatura nos tecidos, resultante da absorção de energia durante exposição a CEM. No caso dos efeitos potenciais da exposição em longo prazo, tais como aumento de risco de câncer, a *International Commission Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) concluiu que os dados disponíveis são insuficientes para prover uma base para fixar restrições à exposição, embora pesquisas epidemiológicas tenham produzido evidências sugestivas, mas não convincentes, de uma associação entre possíveis efeitos carcinogênicos e a exposição a densidade de fluxo magnético de 50/60 Hz em níveis substancialmente inferiores aos recomendados nestas diretrizes. (ANATEL, 2007).

Porém pode-se ressaltar que existem casos como o da ONG francesa “CRIIREM – *Centre de Rechercheat d’Informations Indépendentessur lês Rayonnements Electro Magnétiques*” que, evocando o princípio da precaução, reivindicou uma moratória sobre as ondas de Wi-Fi e conseguiu que a Prefeitura de Paris desligasse o Wi-Fi em várias bibliotecas municipais pela alegação das possíveis interferências a saúde humana causadas pela produção de CEM das redes de Wi-Fi (GOMIDE apud ENVIRO2B, 2008).

3.3 – Principais Características das Antenas

Quanto à instalação existem basicamente dois tipos de ERB, comumente chamadas de *Ground Base Tower (GBT)* – aquelas que são instaladas em terrenos, ou seja, no solo e *Roof Top* – aquelas instaladas em pavimentos de cobertura de edifícios. Estas estações abrigam antenas concentradas em painéis.

As antenas são elementos que transformam energia eletromagnética confinada em energia eletromagnética irradiada, possibilitando a propagação das ondas eletromagnéticas geradas por transmissores. Uma configuração simples para antenas de ERBs é apresentada na Figura 2, que mostra um conjunto de quatro dipolos com polarização vertical (WOJCIK, 2003).

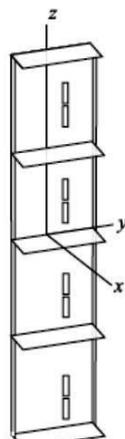


Figura 2: Pannel com 4 antenas dipolo

Fonte: WOJCIK,2003 adaptação do autor,2014

Atualmente a maioria das antenas utiliza polarização cruzada com ângulo de 45° (Figura 3) entre dipolos com o objetivo de evitar propagação por caminhos diversos (*multipathpropagation*) e melhorar a qualidade do sinal recebido (Kaboli et al, 2012).

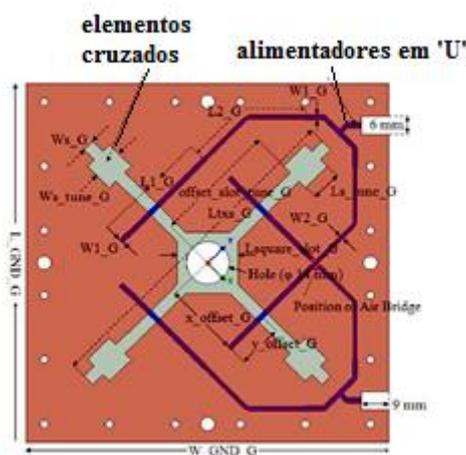


Figura 3: Antena com polarização cruzada

Fonte: Kaboli et al, 2012, adaptação do autor, 2014

Sob o ponto de vista da Engenharia Ambiental, as características mais significativas das antenas são aquelas que dizem respeito à concentração do campo eletromagnético irradiado que colocam na sua área de influência pessoas e o meio ambiente de forma geral.

Sob este ponto de vista, são características principais das antenas:

- Diagrama de Irradiação, que exprime a forma com que o sinal de uma antena é dirigido para uma determinada direção. Uma antena com diretividade muito grande irradia um feixe bastante concentrado. O diagrama de irradiação possui efetivamente características tridimensionais, mas costuma ser representado por suas projeções horizontal e vertical. Exemplos de diagramas típicos para antenas GSM (padrão da maioria dos sistemas de comunicação celular) são mostrados na Figura 4. O padrão mais importante para avaliação da exposição ao campo

eletromagnético produzido por antenas elevadas instaladas em torres e com grande área de cobertura, como no presente estudo é o padrão de irradiação vertical (SINGH,2012).

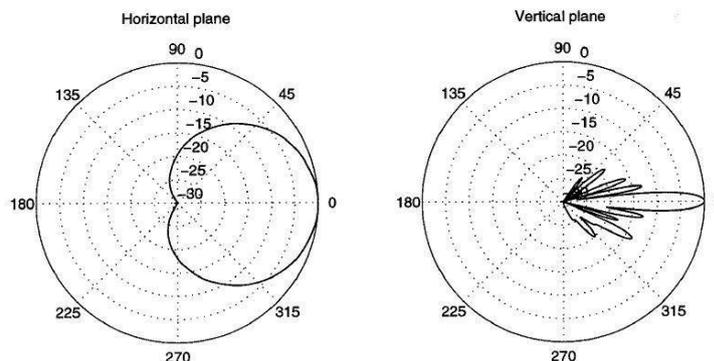


Figura 4: Diagrama de Irradiação Típicos para Antenas GSM (fonte: BLANCH et al, 2002)

- **Ganho:** Uma antena é um elemento passivo e que, portanto não possui amplificação. No entanto, quanto mais concentrado o feixe de irradiação, maior seus alcance útil. A partir daí define-se o ganho de uma antena comparando-se a potência máxima que a antena consegue entregar em um ponto com a potência que uma antena de referência – normalmente isotrópica, que irradia igualmente em todas as direções – entregaria no mesmo ponto.
- **Tilt elétrico:** Em telefonia celular são muito utilizadas antenas que irradiam a radiofrequência ligeiramente para baixo levando em consideração o plano horizontal. Esta inclinação em inglês é chamada de *tilt*.

5 – Rádio Frequência e Estações Rádio Base em Ambientes Urbanos

Como foi visto anteriormente, a preocupação com a irradiação de campos eletromagnéticos em ambientes urbanos surgiu, a princípio, por iniciativa de agências governamentais. Podem-se arbitrar em linhas gerais os seguintes períodos: nos anos de 1970-1990, o assunto foi tratado considerando os aspectos regulatórios quanto à saúde pública. Enquadra-se nesta fase o levantamento das radiações não ionizantes na área metropolitana de Nova York (EPA, 1977). Normas são estabelecidas no período 1990-2000 (IEEE 1992, FCC 1996, Itália 1998, União Européia 1999, Suíça 1999) e a partir de então se verifica um padrão de desenvolvimento na literatura que passa a contar cada vez com trabalhos acadêmicos, inicialmente tratando de emissões de rádio frequência, de uma forma geral (SIMUNIC, 2006; BURCH et al, 2006; AKINTONWA A. et al, 2008, YLLI et al, 2010) e como consequência do crescimento exponencial das comunicações móveis por celular, trabalhos mais recentes procuram evidenciar seu efeito no ambiente urbano, antrópico (LAVIADA et al, 2010; SINIK et al, 2011).

Sob o ponto de vista da Engenharia Ambiental, a investigação continuada do assunto é conveniente, inclusive por força de norma legal visto que o conceito de poluição eletromagnética também se enquadra perfeitamente no conceito de poluição previsto no artigo 3º, inciso III, da Lei 6.938/81 (Lei da Política Nacional de Meio Ambiente) entende-se por poluição eletromagnética o lançamento ou a liberação de energia (radiação), em intensidade e

quantidade tais que possam tornar o ar impróprio ou ofensivo à saúde e possam ser inconvenientes ao bem-estar público ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Com vistas ao ambiente antrópico, a Engenharia Ambiental também pode contribuir com a definição de condições de instalação destes equipamentos urbanos, a princípio regulados pela ANATEL dada a Lei 9.472, de 16.07.97, que regulamenta a exploração dos serviços de telecomunicações e cria o órgão regulador para o setor. De acordo com o artigo 19, XI, da mencionada lei, compete à Anatel expedir e cassar autorização para prestação de serviço móvel celular; fiscalizar, aplicar sanções, além de possuir a competência de “expedir normas e padrões a serem cumpridos pelas prestadoras de serviços de telecomunicações quanto aos equipamentos que utilizarem”, e ainda, “expedir ou reconhecer a certificação de produtos, observados os padrões e normas por ela estabelecidos”. Não obstante, “no âmbito municipal, conforme estabelecido em cada cidade, muitas vezes há a necessidade do licenciamento quanto aos aspectos urbanísticos e de localização geográfica da estação” o que frequentemente implica na ocorrência de conflitos, visto que “com o número de estações aumentando consideravelmente, começaram a surgir reações da população quanto à localização de torres, à alteração provocada na paisagem urbana e aos aspectos relacionados à segurança e à saúde humana” (ALMEIDA et al, 2006).

6 – Estudo de Caso

Tomou-se como estudo de caso as instalações da ERB localizada no Instituto Federal Fluminense (IFF) – Campus Macaé.

De acordo com os dados da ANATEL, a estação rádio base em questão localiza-se no município de Macaé – RJ, mais precisamente no logradouro Estrada Municipal, n/º S/N, bairro Imboacica, sobre as seguintes coordenadas:

Lat.: -22.406019°

Long.: -41.843398°

ou em UTM (Universal Transverse Mercator)

24k

Lat. UTM: 7519461.00 mS

Long. UTM: 207259.00mE



Figura 5: Localização do IFF onde está localizada a Estação Rádio Base Estudada

Fonte: Google Maps 2014



Figura 6: Localização da Estação Rádio Base Estudada

Fonte: Google Maps 2014

Para realização das medições foi utilizado o analisador de espectro eletromagnético MS2712E Spectrum Master, fabricado pela empresa ANRITSU (Figura 7). Este aparelho é de fundamental importância para os trabalhos com Estações Rádio Base, pois foi projetado para transporte em campo, o que difere de muitos aparelhos utilizados em trabalhos científicos que normalmente são analisadores projetados para trabalho fixo em laboratório.



Figura 7: Analisador de Espectro
Fonte: Autor (2014)

Em virtude desta portabilidade fica mais fácil fazer uma avaliação real em maior área de abrangência e com maior precisão espacial dos valores coletados. Para isso contamos com o uso da antena de GPS acoplada (Figura 8). Esta é uma ferramenta suporte do referido analisador espectrômetro capaz de captar a informação geográfica do ponto coletado dando assim informações espaciais, necessárias, dos pontos coletados para confecção de mapas de intensidade.



Figura 8: Antena GPS do MS2712E
Fonte: Autor (2014)

Para o correto funcionamento do MS2712E são necessários vários tipos de antenas que variam de acordo com o tipo de trabalho a ser realizado e a faixa na qual se deseja avaliar o espectro (Figura 9).



Figura 9: Conjunto de Antenas de Medição GPS
Fonte: Autor (2014)

Para um melhor aproveitamento do MS2712E foi utilizado um computador portátil que serviu na orientação dos dados coletados *in situ* (Figura 10).

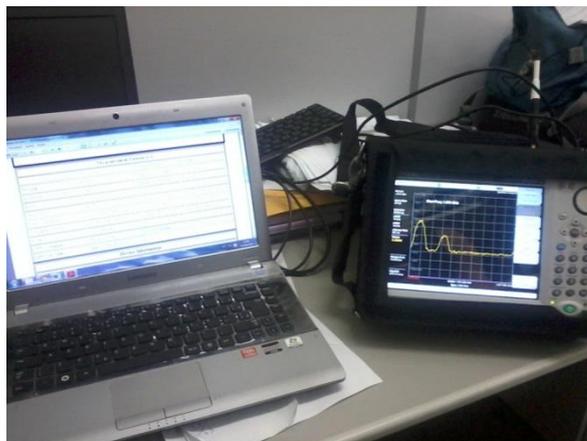


Figura 10: Bancada de Coleta dos Dados

Fonte: Autor (2014)

Como procedimento de coleta, foram executadas diversas rotas de medição dentro do campus do IFF Macaé e no perímetro externo, conforme ilustrado na Figura 11.

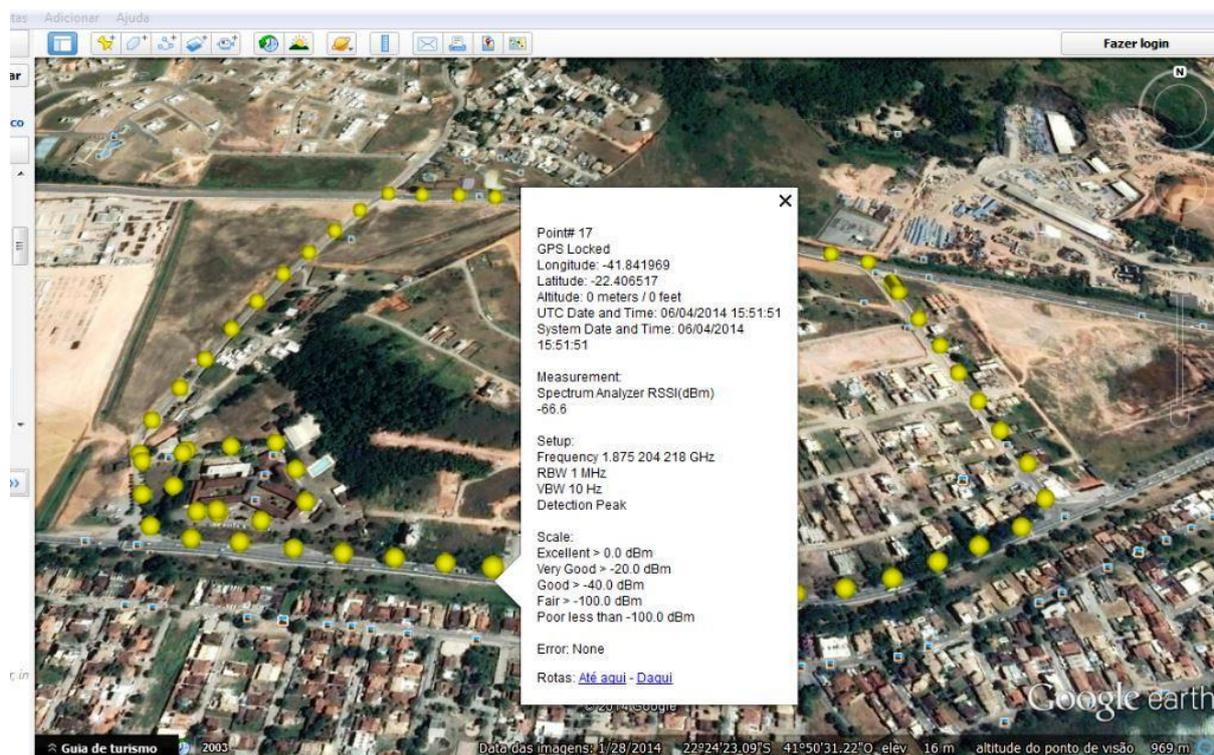


Figura 11: Rotas de medição no entorno do campus do IFF

Fonte: Autor (2014)

7 – Resultados e Discussão

Inicialmente, foram feitos diversos testes para identificação da frequência piloto da ERB, sendo identificada a frequência de 1.875 GHz, sendo este o canal no qual foram tomadas as medições. O analisador de espectro registra a potência média no canal indicado para o sinal GSM na unidade dBm, na qual a potência é calculada em relação à referência de 1 mW.

No decorrer de oito trabalhos de campo registrando medições, os maiores valores de potência foram registrados na medição mostrada na Figura 12.

O valor máximo registrado com uma sonda de aproximadamente $1,0 \text{ cm}^2$ de área foi de -73 dBm . Convertendo-se este valor para Watts e calculando a densidade de potência equivalente, temos um valor de $S = 1,26 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$, bem inferiores aos limites de segurança estabelecidos pelas normas e que mostram bastante proximidade com levantamentos feitos para ERBs na cidade do Rio de Janeiro (DIAS et al, 2006). Também mostram coerência com a estimativa publicada pelo ICNIRP (ICNIRP, 2009) de que a exposição de usuários comuns aos níveis de potência irradiada por ERBs fica próximo de $1/10.000$ do valor de referência.



Figura 12 – Maior potência detectada em uma rota no entorno do campus
(fonte: próprio autor)

Embora os resultados sejam tranquilizadores, quando comparados com as referências estabelecidas pelas normas, alguns pontos devem ser ressaltados no que concerne à avaliação de segurança nas proximidades de ERBs. Sob o ponto de vista da Engenharia Ambiental, deve-se considerar que na prática uma instalação isolada como a estudada não é mais um caso

típico, visto que a concorrência por localização adequada produz concentração de diferentes operadoras / frequências / tecnologias em pontos “privilegiados” do espaço urbano. Tal situação é prevista pelas diversas normas, que determinam cálculos específicos para múltipla exposição.

Outro ponto de interesse da Engenharia Ambiental é a exposição ocupacional de trabalhadores nas proximidades das instalações e a exposição de ocupantes de uma instalação que tenha uma ERB do tipo *Roof Top* sobre ela.

8 – Conclusões

De posse das informações levantadas no decorrer da pesquisa fica claro que são vários os possíveis problemas que podem ser gerados pelas diversas formas de emissão dos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, e estas dificuldades vêm chamando cada vez mais as atenções dos profissionais da área em diversas localidades do mundo. A OMS estabelece uma agenda específica de pesquisas necessárias na área (OMS, 2010), fato que justifica sua inclusão na área de interesse da Engenharia Ambiental, mais especificamente no que diz respeito ao meio ambiente urbano.

As normas preconizam extensas e detalhadas medições para assegurar a conformidade, assim como cálculos analíticos que são questionados na literatura (BALDAUF et al, 2007, CASAVOLA et al, 2002; LAVIADA et al, 2010; SINGH, 2012). Estes fatos apontam a pertinência de pesquisas sobre métodos numéricos aplicáveis nesta estimativa de campos eletromagnéticos.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro na aquisição do Software e o Analisador espectrômetro MS2712E

REFERÊNCIAS

_____. ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações, RESOLUÇÃO N° 303, DE 2 DE JULHO DE 2002 Publicada no DOU de 10/07/2002 Regulamento Sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa De Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz.

_____. Lei 11.934/2009 Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos.

_____. Lei n° 6938/81 – Lei de Crimes Ambientais. 1981

AKINTONWA A, BUSARI A. , AWODELE O., OLAYEMI S. O. The Hazards of Non-Ionizing Radiation of Telecommunication Mast in an Urban Area of Lagos, Nigeria. **African Journal of Biomedical Research**, Volume 12, Number1 (January 2009)

ALMEIDAA., NEVES L.C., RIBAS G., TENTI E., FERREIRA e SILVA C., MORAES R.V. Controle e gestão de radiações não ionizantes produzidas pelo sistema de telecomunicações: uma abordagem inovadora. **Cad. CPqD Tecnologia, Campinas**, v. 1, n. 1, p. 71-84, jan./dez. 2005

BALDAUF M., KNÖRTZER S., PONTES J., WIESBECK W., Safety Distances Underneath Vertically Polarized Base Station Antennas. **Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC**, Munich 2007

BALMORI, A., Electromagnetic Pollution from Phone Masts. Effects on Wildlife. **Pathophysiology**.v 16, pp 191-199, 2009

BLANCH S., ROMEU J., Near Field in the Vicinity of Wireless Base-Station Antennas: An Exposure Compliance Approach. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** v 50 n5 May 2002.

BURCH J., CLARK M., YOST M., FITZPATRICK C., BACHAND A., RAMAPRASAD J., REIF J. Radio Frequency Nonionizing Radiation in a Community Exposed to Radioand Television Broadcasting. **Environmental Health Perspectives**. VOLUME 114NUMBER 2 February 2006

CARVALHO G. F., SILVA, R. M. V. Avaliação dos efeitos da radiofrequência no tecido conjuntivo. **Revista Brasileira de Medicina** v68, 2011

CASAVOLA L., ZIYYAT A., PICARD D., BOLOMEY J., Rapidm evaluation of electric and magnetic field radiated by base station antennas for cellular communication, **Proc. XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science**, Maastricht, Netherlands, August 2002.

COSTA, E. M. M., **Eletromagnetismo: Campos Dinâmicos**, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DIAS M., VIEIRA R., SIQUEIRA G.L., Verificação do Nível de Irradiação das Estações Rádio Base. Artigo Técnico da ABRICEM – Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética, disponível em <www.abricem.com.br> acessado em 23/04/2014

EC (1999) **Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)**, Official Journal of the European Community L199/59.

EPA. Environmental Protection Agency. Nonionizing Radiation on New York Metropolitan Area. **EPA Report** 902/4-78-007.

FELICE, F. **Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz em tecnologia *spread spectrum***. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 148 p., 2005.

GENÇ O., BAYRAK M., YALDUZ E., Analysis of the Effects of GSM Bands to the Electromagnetic Pollution in the RF Spectrum. **PIER Progress in Electromagnetic Research** v 101, pp 17-32, 2010

GOMIDE JRM R. **Radiações Eletromagnéticas não ionizantes em Unidades de Conservação da Natureza: Diagnóstico, Proposta para Mapeamento, Avaliações de Riscos e Licenciamento Ambiental**. Dissertação. Mestrado em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais. UFJF, 2008.

ICNIRP, **ICNIRP Statement on the Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)**. Health Phys. Germany. V 97 (2009) pp 257-258

IEEE (1999) **Standard for safety levels with respect to human exposure to radio-frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz (IEEE C95.1-1991)**, New York, 1992

KABOLI M., ABRISHAMIAN M., MIRTAHERI S., ABOUTORAB S., High-Isolation XX-Polar Antenna. **IEEE Transactionson Antennasand Propagation** v 60 n9 September 2012.
LASR - **Revisão Científica Latino Americana Campos Eletromagnéticos de Alta Frequência e Saúde Humana**. Disponível em: <<http://www.wireless-health.org.br/downloads/LASR2010-PadreesPoliticaseProtecao-Port.pdf>>. Acessoem: 15 dez 2012.

LAVIADA, J., ALVAREZ-LOPEZ Y., LAS-HERAS,F., Efficient Determination of the Near-Field in the Vicinity of an Antenna for the estimation of its Safety Perimeter. **Progress In Electromagnetics Research, PIER 103, 371-391, 2010**

MILLS W.A., TELL R.A., JANES D.E., HODGE D.M., Nonionizing Radiation on the Environment. **Proceedings of 3rd Annual Conference on Radiation Control**. US DHEW Publication (FDA) pp 200-211, 1971

MASSAZUMI O.M., **História da Eletricidade**. LSI-USP, 2010

OMS. Organização Mundial de Saúde. Departamento de Proteção ao Ambiente Humano. **Estabelecendo um Diálogo sobre Riscos de Campos Eletromagnéticos**. Genebra, Suíça, 2002.

OMS. Organização Mundial de Saúde. **Campos Eletromagnéticos e Saúde Pública, Estações Rádio Base e Tecnologia Sem Fio**. Fact Sheet 304, maio de 2006.

OMS. Organização Mundial de Saúde. **WHO research agenda for radiofrequency fields**. Genebra, Suíça, 2010

ŠIMUNIĆ D., Non-Ionising Radiation Human Exposure Assessment Near Telecommunication Devices in Croatia, **6th Symposium of the Croatian Radiation Protection Association with international participation**, Stubicke Toplice, Croatia, 18-20 April 2006.

SINGH R.K., Assessment of Electromagnetic Radiation from Base Station Antennas. **Indian Journal of Radio and Space Physics**. V41, October 2012, pp 557-565

SINIK, V., JANCOVIK S., DESPOTOVIC, Z., Exposure of Humans to Electromagnetic Fields. **I International Conference ECOLOGY OF URBAN AREAS 2011**, Zrenjanin, Serbia, 30th September 2011.

TELL R.A., Environmental Nonionizing Radiation Exposure: A Preliminary Analyses of the Problem and Continuous Work within EPA. **Environmental Exposure to Nonionizing Radiation. US EPA Publication EPA/ORP 73-2** pp 48-68, 1973

YUPING D., SHUNHUA L., HONGTAO G., Investigation of Electrical Conductivity and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Polyaniline Composite. **Science and Technology of Advanced Materials** v6, pp 513-518, 2005

WOJCIK D., Evaluation of Near Field of the GSM Base Station Antennas on Urban Environment. **Journal of Telecommunications and Information Technology**. V1, 2003.

YLLI F., KARABETSOS E, DOLLANI K., KOUTOUNIDIS, D., Non-Ionizing Radiation: Evaluation of General Public's Exposures in Greece and Albania. **AIP Conferece Proceedings**, 2010

Artigo Científico II

Avaliação de Campo Irradiado por Estação Rádio Base Através do Método Híbrido Elementos Finitos – Equações Integrais

Assessment of Radiated Electromagnetic Fields from Base Stations using the Hybrid Finite Element-Integral Equations Method.

Wanderson De Andrade Paula Manhães⁴

Marcos Antonio Cruz Moreira⁵

Pedro Armando Vieira⁶

RESUMO

O presente estudo visa introduzir uma nova abordagem sobre a implantação de Estações Rádio Base no que tange sua produção eletromagnética e consequente emissão de radiação não-ionizante e efeitos sobre o meio ambiente circundante. A difusão no uso de softwares de modelagem numérica tem melhorado muitos procedimentos de avaliação desta irradiação, que de outra forma seriam de execução difícil, impossível ou muito oneroso. Faremos o uso do software *Ansys*, mais especificamente o pacote HFSS, *High Frequency Structural Simulator*, para simulação do comportamento dos campos circundantes a uma Estação Rádio Base (ERB) situada no Instituto Federal Fluminense - Campus Macaé.

Neste artigo vamos apresentar os métodos numéricos utilizados em grande escala para problemas de comportamento de campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. O mesmo visa justificar a opção pelo uso destas que são vistas como as mais acuradas ferramentas computacionais para a simulação de tais campos. Vamos abordar sua aplicação no software *High Frequency Structural Simulator* (HFSS) e as simulações geradas pelo mesmo.

Palavras chaves: Radiação Não-Ionizante, Método dos Elementos Finitos, Alta Frequência.

⁴Mestrando em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense, Técnico em Logística Ambiental pelo Instituto Federal do Rio de Janeiro e Graduado em Matemática pela Universidade Federal Fluminense.

⁵Engenheiro Eletrônico e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e Professor no Curso de Mestrado do Instituto Federal Fluminense.

⁶Mestre em Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense e professor no Instituto Federal Fluminense – Macaé.

ABSTRACT

The present study introduces a new approach to the implementation of Base Stations regarding its production electromagnetic consequent emission of non-ionizing radiation and its effects on the surrounding environment. The spread in the use of numerical modeling software has improved many assessment procedures of this radiation, which would otherwise be difficult to perform, impossible, or very costly. We will use the software Ansys, more specifically the package HFSS, High Frequency Structural Simulator, to simulate the behavior of the fields surrounding a Base Station (BS) located at the Instituto Federal Fluminense—campus Macaé.

This paper presents the numerical methods used in large-scale behavior problems of electric, magnetic and electromagnetic fields. The same aims justify the decision to use those that are seen as the most accurate computational tools for the simulation of such fields. Let's address your application in High Frequency Structural Simulator (HFSS) software and simulations generated by the same.

Keywords: Non-Ionizing Radiation, Finite Element Method, High Frequency.

1. Introdução

O ambiente urbano se apresenta cada vez mais sujeito à presença simultânea de ondas eletromagnéticas de alta frequência em decorrência da expansão das comunicações sem fio e da exploração de faixas de frequência cada vez mais elevadas. Os efeitos deste fenômeno são cada vez mais discutidos e foram efetivamente categorizados pela Organização Mundial de Saúde como pontos importantes para uma agenda de pesquisa, dentre eles as questões de efeitos adversos da exposição a ondas eletromagnéticas, padrões ambientais de exposição, avaliação e gerenciamento de riscos (OMS,2010). São estes pontos que efetivamente justificam a abordagem do tema sob o ponto de vista da Engenharia Ambiental.

Embora a normatização sobre o assunto já esteja definida desde os anos 1990 (IEEE, 1992) os procedimentos de medição são complexos e demandam tempo, estando sujeitos a erros (Blanchet al, 2002; Casavola et al 2002) assim como os cálculos analíticos são eventualmente considerados conservadores ou muito otimistas (Baldouf et al, 2007; Wojcik, 2003). Diante destes fatos, o emprego de métodos numéricos parece uma alternativa adequada a ser considerada, visto que pode ser aplicado não somente a instalações existentes, como para estimar numericamente os futuros níveis de irradiação para instalações ainda na fase de projeto. Os modelos matemáticos computacionais, munidos de seus algoritmos de simulação de eventos reais, são as ferramentas utilizadas para tais previsões. Com entradas de dados coerentes, como as possibilidades dos eventos reais, estes algoritmos são capazes de modelar o comportamento futuro do evento simulado.

Neste trabalho tomaremos como estudo de caso a Estação Rádio Base localizada no interior do campus Macaé do Instituto Federal Fluminense e como ferramenta o software HFSS (*High Frequency Structure Simulator*).

2. Métodos Numéricos Aplicados na Avaliação de Irradiação por ERBs

Observou-se na revisão de literatura poucos trabalhos dedicados à aplicação de métodos numéricos na modelagem do campo irradiado por ERBs. Dentre estes, Casavola et al (2002) e Laviada et al (2010) fazem a validação de cálculos analíticos através de cálculos numéricos da Transformada Rápida de Fourier utilizando software não designado explicitamente, mas com características similares ao MatLab. Baldauf (2007) e Wojcik(2003) utilizam softwares baseados no Método dos Momentos, respectivamente Fekoe Momic.

O Método dos Elementos Finitos, embora adequado às geometrias complexas dos problemas eletromagnéticos e extensivamente usado para modelagem de dispositivos de baixa frequência, enfrentava restrições quanto às aplicações para simulação de micro-ondas. A questão da simulação em altas frequências foi superada com a incorporação aos softwares dos elementos vetoriais tangenciais (Lee et al, 1991). Isto permitiu a utilização do MEF para simulação de dispositivos como guias de ondas, circuitos digitais de rápido chaveamento e outros, mas a utilização do método de elementos finitos clássico continuou restrita quanto à aplicação em ambientes abertos, ilimitados, como aqueles nos quais a propagação de uma onda é simulada (Commense Zhao, 2012).

Para superação deste problema foram implementados os chamados Método Híbridos que agregam a capacidade do MEF de lidar com geometrias complexas e materiais dielétricos, sem precisar representar grandes regiões de ar que são calculadas através do método das equações integrais (Molognie Saito, 2011).

3. Das Equações de Campos Eletromagnéticos

Todo trabalho que visa aplicações em eletromagnetismo conta com as clássicas equações de Maxwell, um conjunto de equações diferenciais parciais responsáveis por determinar os campos produzidos por fontes de carga, corrente, e por variação no tempo de outro campo (Kraus, 1981).

A partir da Lei Ampère, obtém-se a equação que descreve a geração de campo magnético,

$$\oint H \cdot dl = \iint \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (1)$$

na forma integral, e que corresponde a

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

na forma diferencial.

A partir da Lei de Faraday, obtém-se a equação que descreve a geração de campo elétrico,

$$\oint E \cdot dl = - \iint \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (3)$$

na forma integral, e

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{na forma diferencial} \quad (4)$$

As equações de Maxwell obtidas da lei de Gauss, para os campos elétrico e magnético, respectivamente assumem as formas

$$\oiint D \cdot dS = \int \rho \cdot dV \quad (5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (6)$$

e

$$\oiint B \cdot dS = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (8)$$

A implicação das equações com rotacionais envolvendo **E** e **H** é que campos elétricos e magnéticos variantes no tempo são interdependentes, de forma que variação de campo elétrico no tempo gera campo magnético e vice-versa. Daí se infere que um campo magnético variante no tempo propaga energia através do espaço livre na velocidade da luz (Kraus, 1981). Nas condições de propagação no espaço livre, onde a densidade de corrente **J** e a densidade de carga ρ se reduzem a zero, as equações assumem forma simplificada

$$\oint H \cdot dl = \iint \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (9)$$

$$\oint E \cdot dl = - \iint \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (10)$$

$$\oiint D \cdot dS = 0 \quad \nabla \cdot D = 0 \quad (11)$$

$$\oiint B \cdot dS = 0 \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (12)$$

Na hipótese de campos com variação harmônica no tempo, com frequência ω constante, as equações de Maxwell, no espaço livre admitem simplificação adicional, a saber, se

$$\vec{D} = D_0 e^{j\omega t} \quad \text{e} \quad \vec{B} = B_0 e^{j\omega t}, \quad (13)$$

então

$$\frac{\partial D}{\partial t} = j\omega D_0 e^{j\omega t} = j\omega D \quad \text{e} \quad \frac{\partial B}{\partial t} = j\omega B_0 e^{j\omega t} = j\omega B \quad (14)$$

Desta forma,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = j\omega \epsilon \iint \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad \nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E} \quad (15)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \mu \iint \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad \nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (16)$$

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (17)$$

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (18)$$

onde:

\vec{E} : Campo elétrico (V/m);

\vec{B} : Densidade de fluxo magnético (T);

\vec{H} : Campo magnético (A/m);

\vec{D} : Densidade de fluxo elétrico (C/m²);

t: Tempo (s);

\vec{J} : Densidade de corrente (A/m²);

ρ : Densidade de carga elétrica (C/m³).

Além destas equações, outras relações fundamentais para problemas de campo eletromagnético, são:

Lei de Ohm, aplicada pontualmente

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (19)$$

Relação de continuidade

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (20)$$

Relações de força

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (21)$$

$$d\vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (22)$$

Relações constitutivas entre \vec{D} e \vec{E} e entre \vec{B} e \vec{H} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (23)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (24)$$

onde:

ϵ : Permitividade elétrica do meio (F/m);
 μ : Permeabilidade magnética do meio (H/m);
 σ : Condutividade elétrica do meio (Ω/m).

4. Material e Métodos

O *software* empregado foi o HFSS – *High Frequency Structure Simulator* capaz de solucionar problemas que envolvam campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos através do método híbrido do Método de Elementos Finitos e Equações Integrais. O método permite avaliar os campos produzidos, de maneira bidimensional ou tridimensional, e foi empregado para estimar numericamente através de elementos finitos o campo eletromagnético produzido e irradiado por uma instalação de média potência, no caso a subestação do campus Macaé.

4.1 Método dos Elementos Finitos – MEF

Utilizando do conceito de discretização, é possível representar um dado problema físico real através de um modelo computacional e resolvê-lo numericamente. Entre os métodos numéricos de discretização, o Método dos Elementos Finitos adequa-se bem à modelagem de problemas eletromagnéticos, pela facilidade de representar geometrias complexas e ambientes com diversas mudanças de meio (Chapra, et al, 1997).

O MEF faz parte de uma classe de métodos baseados em aproximações de equações diferenciais. No MEF, a solução do problema é obtida em subdivisões do domínio do problema global, denominadas elementos (Figura 1) que podem ser usualmente bidimensionais ou tridimensionais. Os elementos formam uma malha cujos vértices são denominados ‘nós’. Uma solução aproximada da Equação Diferencial Parcial (EDP) que determina o potencial vetor magnético \mathbf{A} é obtida para os nós e partir daí é possível determinar os campos elétrico (\mathbf{E}) e magnético (\mathbf{H}) dentro dos elementos. A solução aproximada da EDP baseia-se na denominada formulação fraca, que consiste na substituição da EDP original por aproximações que envolvem funções de ponderação a serem determinadas por meio de cálculo variacional ou métodos de resíduos ponderados.

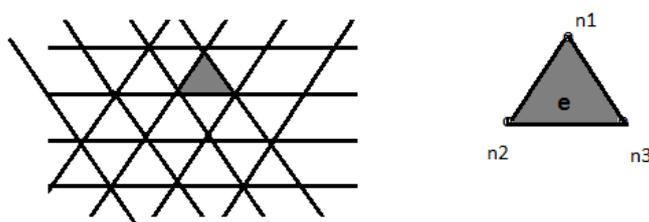


Figura 1. Malha e elemento bidimensionais

Fonte: Autor (2014)

4.2 Métodos Integrais

Os métodos integrais em Eletromagnetismo são classificados genericamente como Método dos Momentos (MM). Estes métodos são baseados na solução numérica de equações integrais. São particularmente eficientes para problemas de alta frequência, especificamente em geometrias com materiais altamente condutores nas quais apenas as regiões condutoras

precisam ser discretizadas. A extensão de métodos puramente integrais a regiões com materiais com propriedades dielétricas ou magnéticas uniformes, produz matrizes grandes e difíceis de lidar (Silvester e Ferrari, 1996).

O Método dos Elementos de Contorno (MEC), também considerado como um método integral (Brebbia e Dominguez, 1989) em várias aplicações da Engenharia, no que diz respeito ao emprego no Eletromagnetismo é considerado de maneira predominante na literatura como um método híbrido associado ao MEF (Sadiku e Peterson, 1990) (Yuan et al 1990) (Silvester e Ferrari, 1996).

4.3 Métodos Híbridos

A modelagem de regiões abertas nas quais, a partir de uma fonte de sinal como uma antena, ocorre espalhamento da onda eletromagnética sobre superfícies e/ou a irradiação de campos eletromagnéticos na direção do infinito é um tópico adequado à aplicação de Métodos Híbridos, pois associa as vantagens de cada método. No estudo em questão foi usado através do software HFSS o método híbrido Elementos Finitos - Equações Integrais (FE-BI *Finite Elements - Integral Equations*). Com este método a modelagem de geometrias complexas e materiais não homogêneos é tratada pelo modelo de elementos finitos e a propagação em regiões abertas é tratada por Equações Integrais. O modelo tratado pelo MEF não precisa conter grandes volumes de ar envolvendo a antena e a solução para as faces externas nas quais é calculado o campo irradiado é feito pelas Equações Integrais. Um recurso adicional além do método FE-BI clássico no qual somente as fronteiras são resolvidas pelas equações integrais é a opção de definição de regiões IE adicionais nas quais este método será empregado reduzindo a necessidade de processamento por elementos finitos em grandes volumes de ar no interior do modelo.

4.4 Modelo Utilizado na Análise

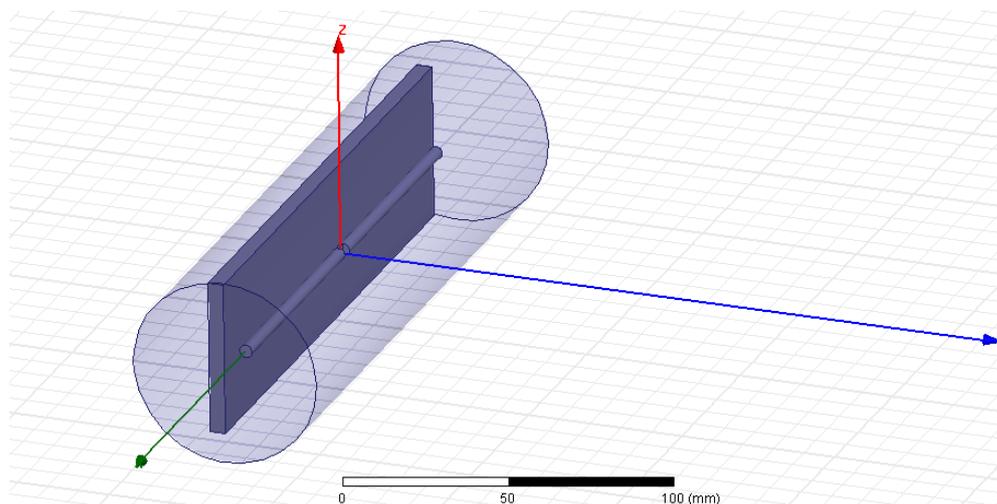


Figura 2: Modelo no HFSS (fonte: próprio autor)

A antena foi modelada com um modelo simplificado que consistiu em um dipolo de meia onda com braços de 80 mm, correspondendo a frequência de 1,875 GHz, comprimento de onda de 16 cm. A placa retangular é um elemento refletor situado 2 cm atrás do dipolo, os cilindros de pequeno diâmetro na figura 2. Estas dimensões e frequência de operação foram obtidas a partir de informações do fabricante (KATHREIN-Werke KG).

A fronteira foi definida como do tipo *Radiation* fixada no cilindro de ar que envolve a estrutura refletora + dipolos. Uma fronteira do tipo *Radiation* permite simular a propagação de ondas para o espaço aberto além da fronteira. A região exterior à fronteira pode ser definida com domínio HFSS-IE, caso em que se emprega o Método dos Momentos nos cálculos a ela relacionados. Quando este tipo de fronteira é definido como parte na estrutura geométrica a ser analisada, cálculos de irradiação na forma de campo distante são feitos automaticamente como parte da simulação.

A condição de fronteira do tipo *Radiation* é empregada para simular a propagação de ondas eletromagnéticas além da geometria na qual esta condição de fronteira foi definida. Corresponde à condição de fronteira PML (*Perfectly Matched Layers*) na qual é modelado um material anisotrópico com perdas que absorve completamente (isto é, não reflete nenhuma porção) a onda eletromagnética incidente. Em termos de solução numérica, a condição PML é produz resultados mais precisos, mas a condição *Radiation* é de aplicação mais simples. Em termos da Teoria Eletromagnética, a fronteira pode ser caracterizada como condutor elétrico perfeito (PEC – *Perfect Electric Conductor*) ou condutor magnético perfeito (PMC – *Perfect Magnetic Conductor*). A escolha é indiferente porque para a condição de propagação em campo distante os vetores B e H serão perpendiculares. No geral se usa a abordagem PEC para reduzir o tamanho da formulação numérica do problema.

O refletor e o dipolo são modelados como PEC (Condutor Elétrico Perfeito) estabelecendo campo elétrico perpendicular à sua superfície. As demais regiões são definidas como ar ou vácuo em função da permeabilidade magnética.

A fonte de excitação é definida com *Lumped Port* acoplada entre os terminais do dipolo. A fonte de excitação é padronizada na potência de 1 W e não pode ser alterada na solução, embora possa ser reescalada para valores diferentes nos cálculos do pós-processamento.

5. Resultados

O software HFSS modela o campo gerado pela ERB do IFF a partir da comparação com um modelo isotrópico que é uma idealização física de uma antena que irradia um campo de forma homogênea em todas as direções, ou seja, de forma radial. Porém é de conhecimento que tal forma de radiação não é observada na prática. A figura 3 apresenta a radiação emitida por uma das antenas da ERB-IFF, sua diretividade e intensidade apresentadas pela tabela a esquerda da imagem mostrando a paleta de cores referentes a intensidade do campo.

A Diretividade 3D do campo irradiado por uma das antenas da estrutura pode ser verificada no resultado da figura 3.

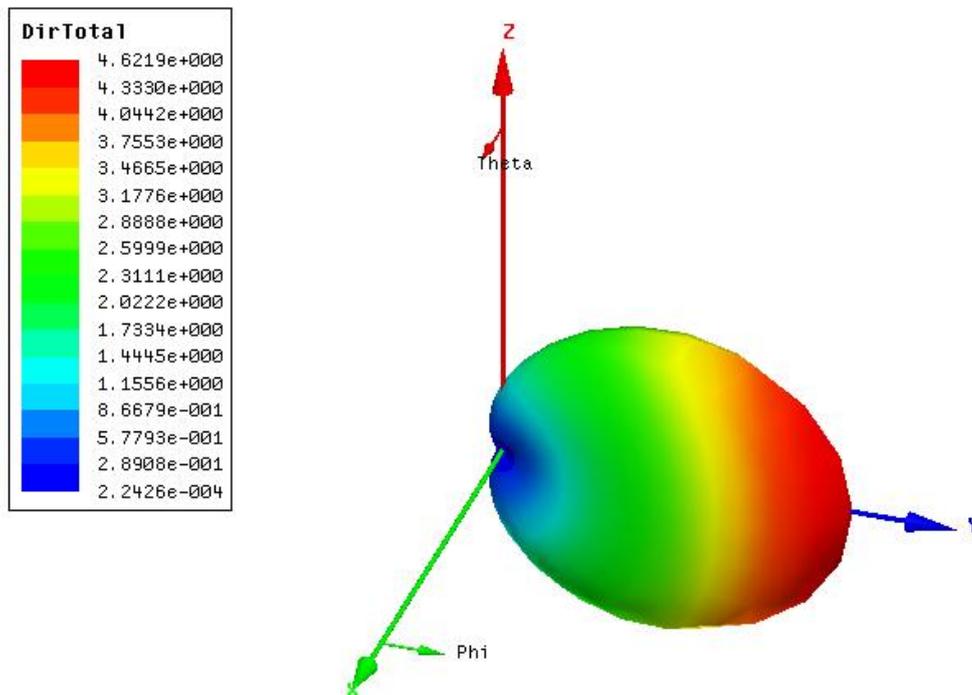


Figura 3: Resultado para diretividade da Antena em comparação com uma antena Isotrópica e unidades em dBi. (fonte: próprio autor)

Nas figuras 4 e 5 os modelos apresentam os campos próximos a uma taxa de 1W de irradiação. A diferença entre estes resultados é que na figura 5 o método numérico das Equações Integrais é aplicado adicionalmente na região da envoltória de ar. Na figura 4 o Método Híbrido simples que é a base dos modelos do HFSS.

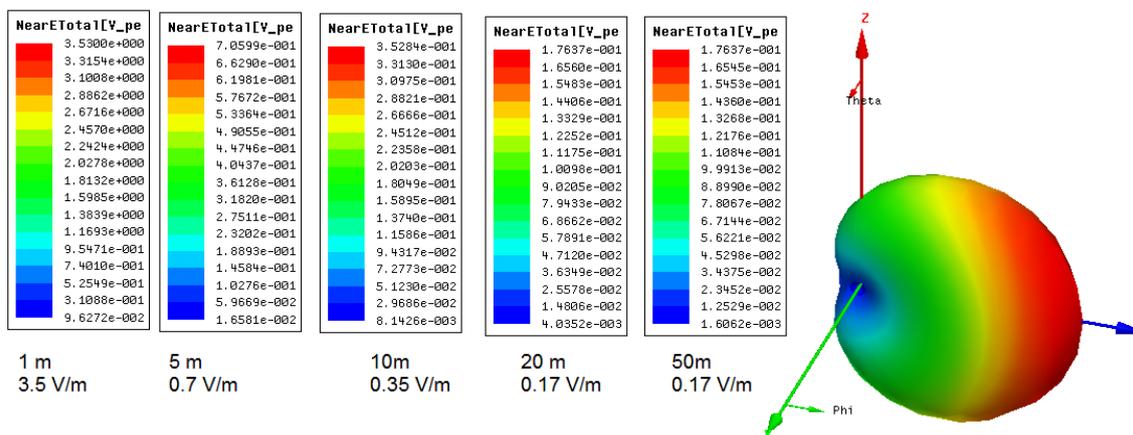


Figura 4: Resultado para Campo Próximo potência irradiada padronizada de 1 W – Modelo HFSS-IE (fonte: próprio autor)

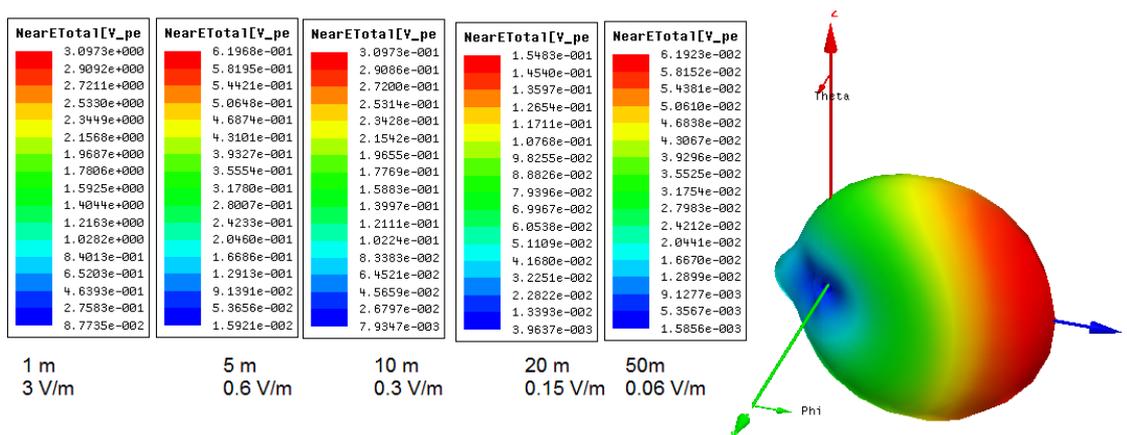


Figura 5: Resultado para Campo Próximo potência irradiada padronizada de 1 W – Modelo HFSS-IE + envoltória de ar modelada como região IE
(fonte: próprio autor)

A figura 6 apresenta as mesmas características avaliadas nas figuras 4 e 5, porém com intensidade de radiação de 50W que é a intensidade apresentada pelas antenas da ERB do IFF.

Para cada um desses modelos foi utilizada uma esfera padrão, de raios de 1, 5, 10, 20 e 50m, responsável pelo referencial de cada simulação e seus dados aparecem nas respectivas figuras.

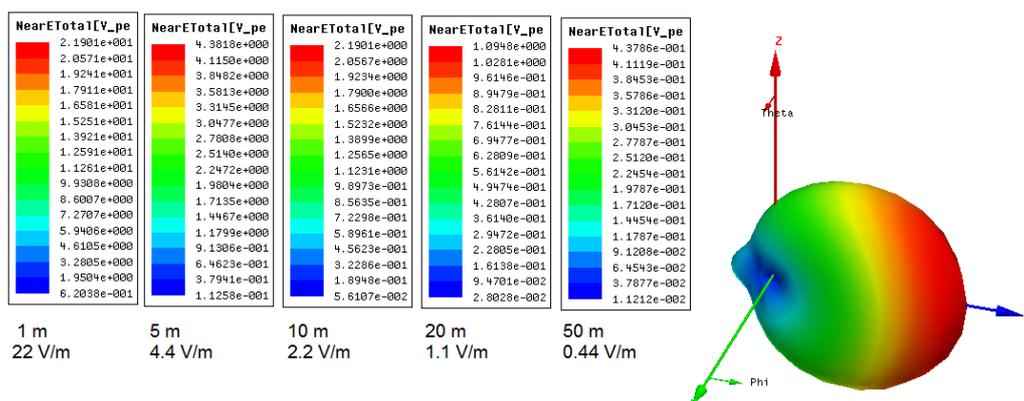


Figura 6: Resultado para Campo Próximo potência irradiada 50 W – Modelo HFSS-IE
(fonte: próprio autor)

6. Discussão

O programa se mostra adequado para projeto de antenas, concorrendo com outros da mesma finalidade e tendo como diferença a formulação por elementos finitos associada a equações integrais (Kaushal et al, 2014). Sob os pontos de interesse da Engenharia Ambiental, a avaliação de campos distantes não foi conclusiva, referente ao ganho para emissões de 1 ou 50 W, na qual não se observou diferença significativa. Por outro lado, se mostrou muito adequado para avaliação de campos próximos, objeto deste estudo, para os quais foram definidas esferas de proximidade de 1, 5, 10, 20 e 50m, obtendo-se resultados coerentes com as zonas de exclusão usualmente estabelecidas para ERBs (Singh, 2012) e com uma série de medidas tomadas nas proximidades da ERB (Figura7). As medidas foram feitas com Analisador de Espectro Anritsu MS2712E.

Nas proximidades da ERB (circuito menor mostrado na Figura 7), foram medidos valores na ordem de grandeza de 10^{-7} W e obtidos valores simulados para campos próximos na mesma ordem de grandeza. A precisão dos valores medidos foi prejudicada pelo emprego de antenas padrão acopladas ao Analisador de Espectro (Figura 8). O mais adequado seria o uso do conjunto de antenas para campo próximo (Figura 9) que não estava disponível na ocasião das atividades de medida.

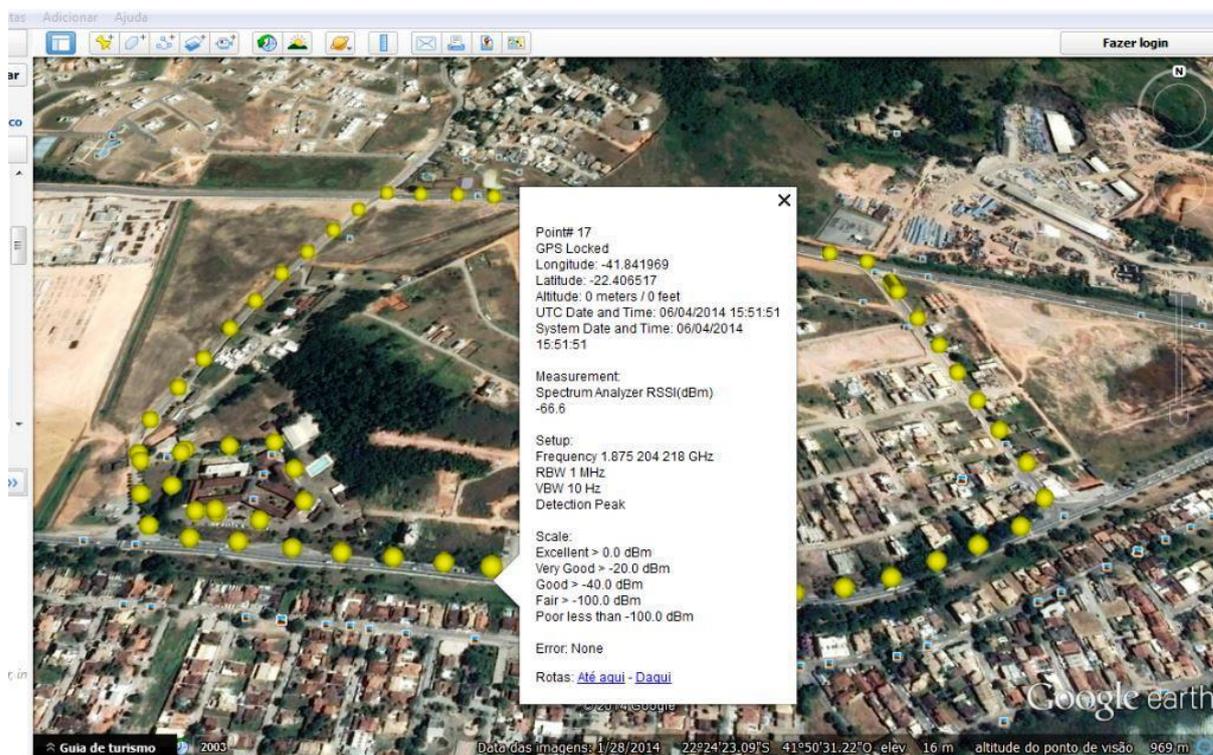


Figura 7: Rota de medições de campo irradiado no entorno da ERB
 (fonte: próprio autor)



Figura 8: antenas padrão
 (fonte: autor)



Figura 9: antenas de campo próximo
 (fonte: Anritsu)

Um recurso adicional de interesse para a Engenharia Ambiental é apresentado na figura 10, que modela a interação do campo eletromagnético irradiado com tecidos orgânicos. Nesta figura é apresentado um modelo reduzido com propriedades elétricas do fluido cerebral humano. O modelo adotado foi reduzido em relação ao volume de um cérebro humano real, por limitação na capacidade de processamento da máquina empregada na simulação. A

caracterização elétrica do fluido é simples, exigindo somente valores de condutividade e permitividade elétrica.

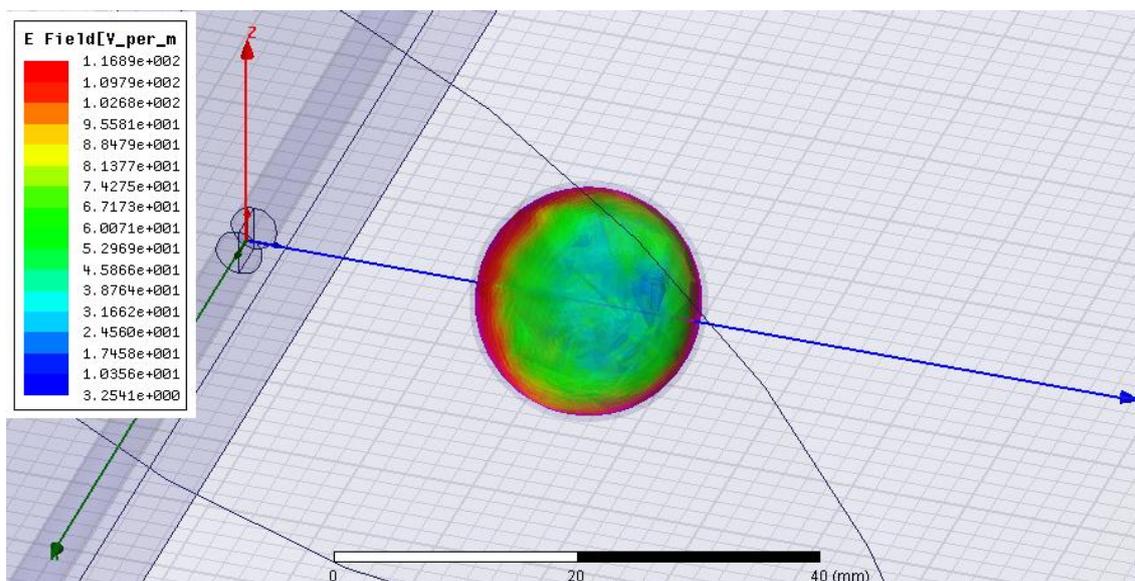


Figura 10: Campo Absorvido por Esfera com propriedades Materiais do Cérebro Humano.
(fonte: próprio autor)

Um resultado importante neste modelo é a representação gráfica das taxas de absorção do tecido sobre o campo modelado como pode ser vista na figura 11. Este gráfico apresenta uma comparação entre a absorção média esperada e a absorção detalhada em pontos do modelo.

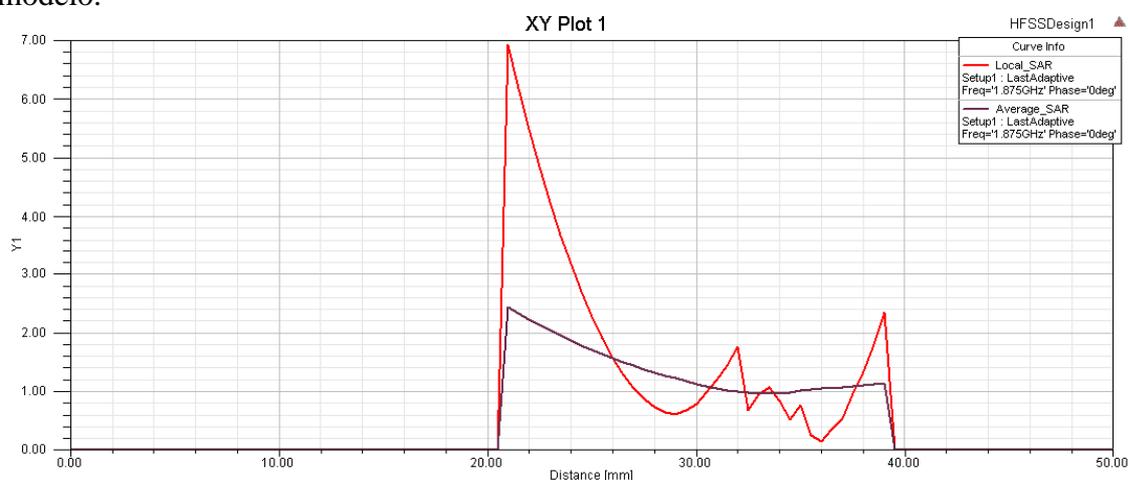


Figura 11: Taxa de Absorção Específica W/kg.
(fonte: próprio autor)

7. Conclusões

Devido às dificuldades, e até mesmo a impossibilidade, da solução das Equações Diferenciais, que envolvam problemas de geometria complexa, por exemplo, há a necessidade da utilização de modelos numéricos para solução com a melhor aproximação possível do comportamento real dos Campos Eletromagnéticos dos corpos analisados. A literatura indica claramente as muitas vantagens da utilização do Método em Elementos Finitos associado a Equações Integrais, para modelagem dos eventos referentes à propagação e espalhamento em espaços abertos. Os valores de campo próximo para a ERB estudada foram estimados numericamente com o *software* HFSS.

Para confirmação e validação dos resultados obtidos numericamente foi utilizado o Analisador de Espectro portátil com GPS (o MS2712E) para o levantamento preciso tanto nos valores como as referências geográficas destes pontos obtidos. No mercado, boa parte dos analisadores é de laboratório, sendo, portanto de uso fixo, o que tornaria impossível a validação de um modelo real como o da ERB do IFF. Confirmou-se a validade dos dados simulados.

Também observou-se, no decorrer do trabalho, a crescente preocupação e pesquisas relacionados aos efeitos sobre a saúde humana da exposição a campos eletromagnéticos de alta frequência, típicos das comunicações sem fio atuais. A partir do trabalho de campo, foi constatada a adequação às normas da ERB estudada quanto a emissões de campo distante. Foi contata a grande utilidade dos métodos numéricos estudados para avaliações de campo próximo e para modelagem dos efeitos sobre o corpo humano. Um grande benefício que pode ser extraído desta modelagem é a avaliação da taxa de absorção específica. Uma tendência recente em pesquisas sobre radiação não-ionizante é a utilização de modelos de partes do corpo humano através de parâmetros elétricos como permissividade elétrica e condutividade para avaliar nestes modelos virtuais - literalmente chamados de *phantom models* (IT'IT Foundation, 2009; Augustine, 2010; Aguirre et al, 2012) - a taxa de absorção específica a que indivíduos são expostos.

8. Referências

AGUIRRE E., ARPON J., AZPILICUETA I., de MIGUEL S., RAMOS V., FALCONE F., **Evaluation of Electromagnetic Dosimetry of Wireless Systems in Complex Indoor Scenarios with Human Body Interaction**. Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 43, 189{209, 2012}

ANRITSU. **Near Field Probe Set**. Disponível em<<http://www.anritsu.com>>. Acessado em 17/02/2015.

AUGUSTINE R. **Electromagnetic modelling of human tissues and its application on the interaction between antenna and human body in the BAN context**. Physics. Université Paris-Est, 2009.English.

BALDAUF M., KNÖRTZER S., PONTES J., WIESBECK W., Safety Distances Underneath Vertically Polarized Base Station Antennas. **Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC**, Munich 2007

BLANCH S., ROMEU J., Near Field in the Vicinity of Wireless Base-Station Antennas: An Exposure Compliance Approach **.IEEE Transactions on Antennas and Propagation** v 50 n5 May 2002.

BREBBIA C.A., DOMINGUEZ, J., **Boundary Elements; an Introductory Course**. Computational Mechanics Publications and McGraw-Hill, South hamptom, 1989.

CASAVOLA L., ZIYYAT A., PICARD D., BOLOMEY J., Rapid evaluation of electric and magnetic field radiated by base station antennas for cellular communication, **Proc. XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science**, Maastricht, Netherlands, August 2002.

CHAPRA, S.C., CANALE R.P., **Numerical Methods for Engineers with Programming and Software Applications**. 3rd Edition. McGraw-Hill International Editions, 1997.

COMMENS M. e ZHAO, K. Efficient Large Scale Simulations with a Hybrid Finite Element Boundary Integral Technique. **IEEE 13th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)**, 2012

IEEE (1999) **Standard for safety levels with respect to human exposure to radio-frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz** (IEEE C95.1-1991), New York, 1992

IT'IT FOUNDATION, Final Report – Work Packages 6 & 7MMF/GSMA Phase 2: **Scientific Basis for Base Station Exposure Compliance Standards**. Zurich, Switserland, 2009.

KATHREIN. **Antennen Electronic Xpol Panel 1720-2170**. Disponível em<<https://www.kathrein.com>>. Acessado em 16/09/2014.

KAUSHAL V., SINGH T., KUMAR V., KUMAR A., KUMAR D., **A Comprehensive Study of Antenna Terminology Using HFSS**. International Journal of Electronics & Communication Technology. IJECT Vol. 5, Issue Spl-1, Jan - March 2014.

KRAUS, J.D., CARVER, K.R., **Electromagnetics**. 2nd Edition, McGraw-Hill, International Student Edition, 1981.

LAVIADA, J., ALVAREZ-LOPEZ Y., LAS-HERAS,F., Efficient Determination of the Near-Field in the Vicinity of an Antenna for the estimation of its Safety Perimeter. **Progress in Electromagnetics Research, PIER 103, 371-391, 2010**

LEE J., SUN D., CENDES Z., **Tangential Vector Finite Elements for Electromagnetic Field Computation**. IEEE Transactionson Magnetics, v 27 n 5sep 1991

MOLOGNI J., SAITO K., Wireless sensor network analysis using the finite element boundary integral numerical technique. **Microwave& Optoelectronics Conference (IMOC), 2011 SBMO/IEEE MTTs International**.

OMS. Organização Mundial de Saúde. **WHO research agenda for radiofrequency fields**. Genebra, Suíça, 2010

SADIKU, M.N.O., PETERSON, A.F., A Comparison of Numerical Methods for Computing Electromagnetic Fields. IEEE Southeastcon 90 Proceedings, 1990.

SILVESTER, P.P., FERRARI, R.L., **Finite Elements for Electrical Engineers**. 3rd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.

SINGH R.K., Assessment of Electromagnetic Radiation from Base Station Antennas. **Indian Journal of Radio and Space Physics**. V41, October 2012, pp 557-565

WOJCIK D., Evaluation of Near Field of the GSM Base Station Antennas on Urban Environment. **Journal of Telecommunications and Information Technology**.V1, 2003.

YUAN, X., LYNCH, D.R, STROHBEHN,J.W., **Coupling of Finite Element and Moment Methods for Electromagnetic Scattering from Inhomogeneous Objects**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v 38 n 03 March 1990.

ANEXO I - RESPOSTA DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE SOBRE LEGISLAÇÕES

Pesquisas sobre legislação do CONAMA teve como resposta a não existência de resoluções referentes ao tema aqui abordado. Quando solicitado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) informações a respeito da existência destas resoluções tivemos a seguinte resposta:

“Prezado Wanderson,

São muitas as Resoluções publicadas sobre diversos temas. A forma de procurá-las no site é clicando em "Resoluções e outros atos" no site do Conama. Minha busca utilizando os nomes "Campo Magnético" também NÃO encontrou nenhuma Resolução Conama.

Atenciosamente,

Equipe CONAMA.”

As buscas no site do CONAMA também obtiveram como resultados a não existência destas resoluções.

ANEXO II – CARACTERÍSTICAS DA ERB

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações

Sistemas Interativos

Menu Principal ▾

STEL >>> Consultas >>> SMP >>> Cobertura de ERB Consolidado por UF

Estações

Cobertura de ERB no Brasil - Lista de Estações - Município Selecionado: Macaé

Dados da Entidade

Razão Social/Nome: CLARO S.A.
 CNPJ/CPF: 4042544000147
 Serviço: 010 - SERVIÇO MOVEL PESSOAL

Número FISTEL: 50409105090

Frequências atendidas

SubFaixa	Frequência	Entrada em Operação
	1870.000 MHz a 1872.500 MHz / 1775.000 MHz a 1777.500 MHz	19/08/2003
	1872.500 MHz a 1875.000 MHz / 1777.500 MHz a 1780.000 MHz	19/08/2003
	1875.000 MHz a 1877.500 MHz / 1780.000 MHz a 1782.500 MHz	19/08/2003
	1877.500 MHz a 1880.000 MHz / 1782.500 MHz a 1785.000 MHz	19/08/2003
	952.500 MHz a 955.000 MHz / 907.500 MHz a 910.000 MHz	19/08/2003
B	880.000 MHz a 890.000 MHz / 835.000 MHz a 845.000 MHz	01/03/2008
I	2145.000 MHz a 2155.000 MHz / 1955.000 MHz a 1965.000 MHz	25/08/2014
W	2630.000 MHz a 2650.000 MHz / 2510.000 MHz a 2530.000 MHz	20/12/2013

Lista de Estação(ões)

Total de Estações: 23

Estação nº413162923 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE02	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	RIVIERA FLUMINENSE	RUA ARTHUR BROCHADO - nº 102	225234740	41W473200	24	08/01/1999	10/06/1999	26/03/2014	12/05/2014

Estação nº413582221 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE01	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Centro	Rua Lira dos Conspiradores - nº 90	225225268	41W464368	9	15/01/1999	10/06/1999	31/01/2014	25/02/2014

Figura 1. Intervalos de frequência emitidos pelas ERB's de Macaé (Fonte: ANATEL)

Total de Estações: 23

Estação nº413162923 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE02	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	RIVIERA FLUMINENSE	RUA ARTHUR BROCHADO - nº 102	225234740	41W473200	24	08/01/1999	10/06/1999	26/03/2014	12/05/2014

Estação nº413582221 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE01	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Centro	Rua Lira dos Conspiradores - nº 90	225225268	41W464368	9	15/01/1999	10/06/1999	31/01/2014	25/02/2014

Estação nº442493452 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE03	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Aroeiras	Rua Alcebiades de Azevedo - nº 256	225220408	41W473912	21	20/10/1999	14/12/1999	13/12/2013	26/12/2013

Estação nº511794304 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE05	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Parque Aeroporto	Rua Doutor Antônio Agostinho Ferreira dos Santos - nº 139	225201968	41W452880	6	20/03/2000	18/04/2000	27/01/2014	27/02/2014

Estação nº534800335 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE04	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Miramar	Avenida Amaral Peixoto - nº KM 164	225242196	41W503588	18,4	19/07/2000	10/08/2000	31/01/2014	25/02/2014

Estação nº683933655 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE08	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Cavaleiros	Rua Gaby Andrade - nº 2D	225244521	41W484522	38	17/10/2003	19/12/2003	26/03/2014	15/05/2014

Estação nº684707314 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE06	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Praia Campista	Rodovia Amaral Peixoto - nº S/N	225172400	41W424800	8	28/07/2004	15/09/2004	26/03/2014	15/05/2014

Estação nº684707349 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE07	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	FAZENDA SEVERINA	R0D0VIA BR 101 - nº S/N	225182160	41W533012	60	28/07/2004	15/09/2004	05/04/2013	15/06/2013

Estação nº684831104 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE12	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	VILA DE CABOÚNAS	R0D0VIA BR 101 - nº S/N	225140888	41W465880	105	16/09/2004	04/10/2004	17/01/2012	20/06/2013

Estação nº684967758 / Último Licenciamento

Nome	Tipo Estação	UF	Município	Bairro	Logradouro	Latitude	Longitude	Alt.	Dt Inclusão	Dt 1º Lic.	Dt Últ. Lic.	Dt Imp. Lic.
RJMCE11	ERB com 1 ou mais Equip/Ant. no Setor	RJ	Macaé	Granja dos Cavaleiros	Rua do Jabuti - nº S/N	225232004	41W492281	37	09/11/2004	09/12/2004	27/01/2014	25/02/2014

Figura 2. Lista das ERB's de Macaé. (Fonte: ANATEL)

APÊNDICE A

SCRIPT PARA CONFECCÃO DOS MAPAS EM FORMATO ACEITO PELO ANALISADOR ESPECTRÔMETRO MS2712E

1 – Download do easyMap Tools no site do Anritsu

<http://www.anritsu.com/en-US/Products-Solutions/Instructional/easyMap-Tools.aspx>

2 – Criar o mapa com o nível de zoom desejado, pois uma vez no MS2712E não haverá possibilidade de aplicar o zoom. “Obs.: o mapa será o hachura do em rosa.”

3 – Criado o arquivo de extensão “map”, envia-lo para um pendrive.

4 – Com o pendrive plugado no MS2712E solicitar “recall a map” na extensão “Coveragemapping” e selecionar o arquivo “map”.

5 – Para enviar os pontos coletados selecionar “recall kml points only” que criará uma camada com os pontos coletados.

APÊNDICE B

SCRIPT PARA COLETA DE DADOS COM O ANALISADOR MS2712E

- 1) Ativar a opção “coveragemapping”.
- 2) Clicando nos quadrados coloridos (lembrando que o MS2712E possui touchscreen) calibrar a faixa das intensidades dos dados coletados.

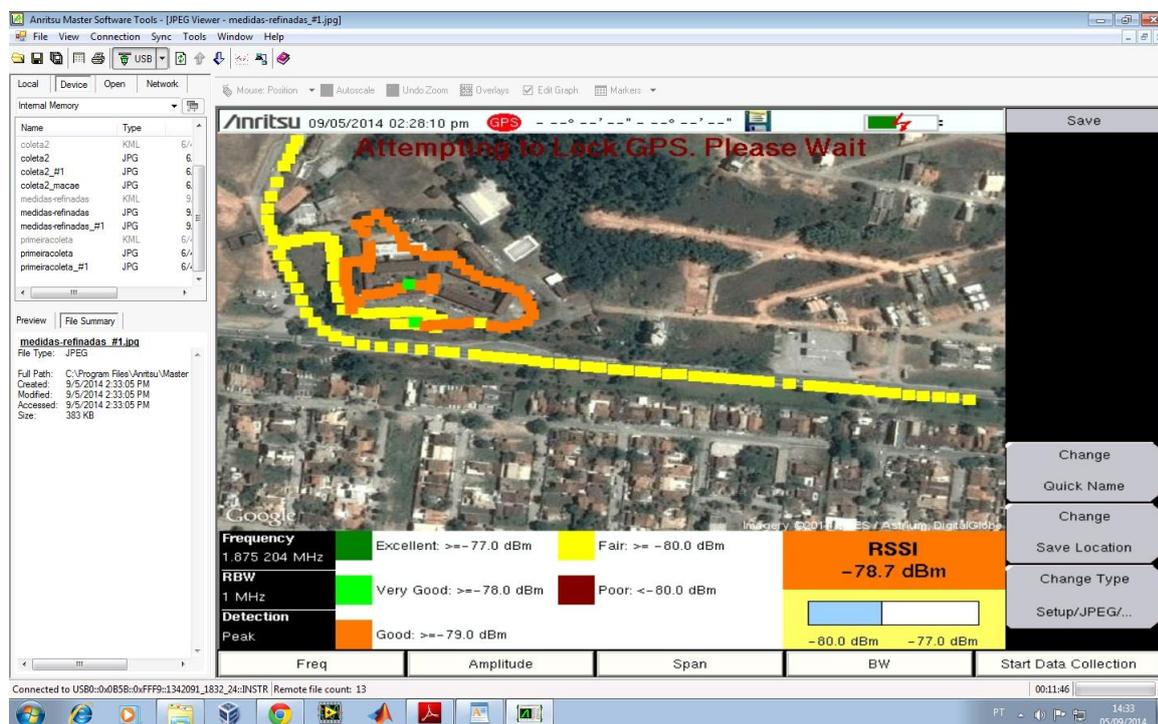


Figura 3. Nesta imagem existem duas medições sobre postas, os valores das medições distante (todas em amarelo) foram feitas com os intervalos descritos no texto acima. As medições no entorno do IFF foram feitas nos valores apresentados na imagem. (fonte: autor)

- 3) Entrar com os seguintes valores: Frequência, RBW e Tipo de detecção, estas opções podem ser vistas na imagem XX no canto inferior esquerdo da imagens gerada pelo MS2712E.
- 4) Escolher o tipo de intervalo de coleta que podem ser por intervalo de tempo ou variação espacial (este último é concebido pela localização geográfica do GPS).

5) Feito estes passos é só clicar em "start data collection" que o MS2712E irá fazer a coleta das intensidades da frequência solicitada.

APÊNDICE C

ACESSANDO AS IMAGENS E OS DADOS COLETADOS.

- 1) Conectar o MS2712E, via USB, ao computador que possua o software MasterTools
- 2) Clicar no ícone de conexão localizado no canto superior esquerdo do software como apresentado na imagem abaixo.

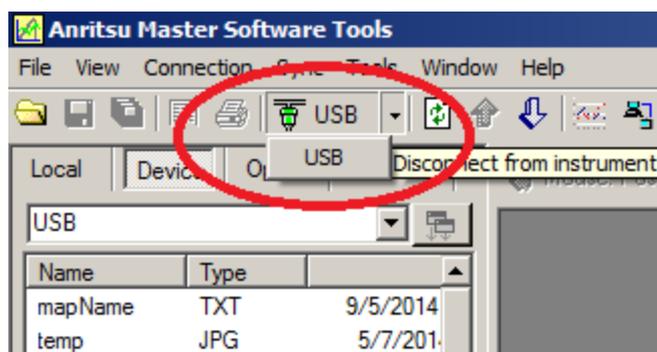


Figura 4. Conexão digital entre o MS2712E e o Microcomputador via USB.(Fonte: autor)

- 3) Feito esta conexão ativar a aba “Device”, selecionar “InternalMemory” na barra de rolagem logo a baixo e selecionar, com um duplo clique, a imagem desejada como ilustrado na figura a baixo.

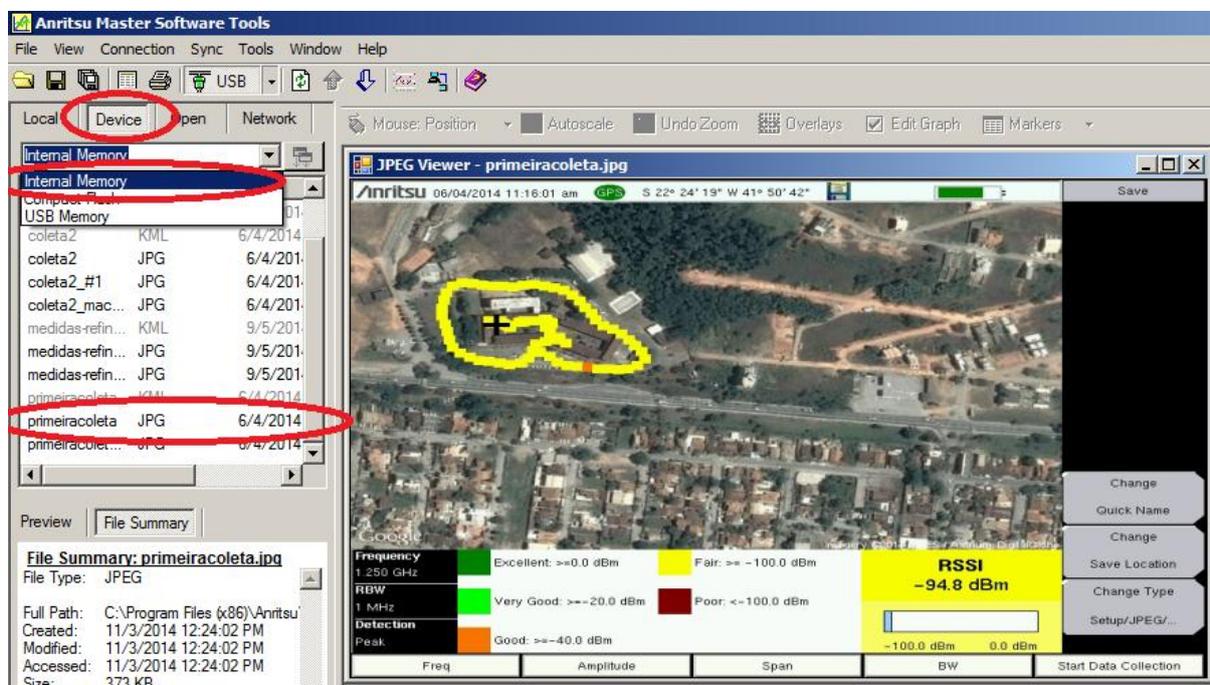


Figura 5. Procedimentos para o acesso aos dados coletados pelo MS2712E.(Fonte: autor)

Um das opções de leitura dos dados é pelo software Google Earth que apresentará os dados com opções de metadados ponto a ponto com nas imagens abaixo:

Nestes metadados é possível analisar a coordenada geográfica, intensidade em dBm captada pelo RSSI, frequência, RBW, RVW e Detection avaliado, data da coleta dentre outras características ponto-a-ponto.

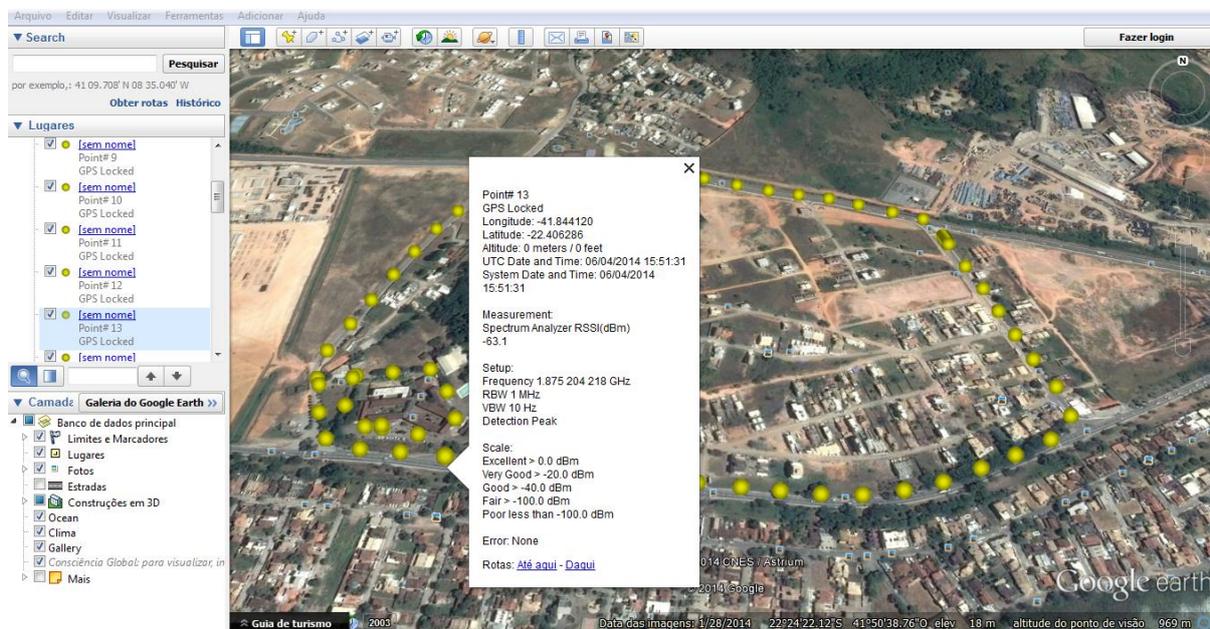


Figura 6. Apresentação do Metadado relativo a um ponto de uma das medições realizadas no entorno do IFF - Macaé. (Fonte: autor)



Figura 7. Intensidade, em dBm, de uma sequência de pontos coletados. (Fonte: autor)

Nesta imagem alguns pontos foram renomeados com suas respectivas intensidades (dBm) nos mesmos parâmetros da imagem anterior.

APÊNDICE D

BW: Band Width/ largura de banda - é a faixa de frequências que o analisador irá operar. Deve ser da ordem ou um pouco maior que a banda (ou faixa) de operação que será medida

DemondType (AM, FM, PM): tipo de demodulação do sinal.

PM (referido ao item acima): PhaseModulation- á quando o sinal de RF tem sua fase alterada em função do sinal de entrada;

Sub faixa B: é alguma sub faixa (ou conjunto de frequências) de uma faixa maior. Não sei a qual faixa pode se referir. Pode ser, por exemplo, a sub faixa B da telefonia celular que possui as bandas A, B, C, D, E, etc.

Sub faixa W: (idem anterior para).

DCS: Digital Communications System GSM: Global System Mobile - é o padrão da maioria dos sistemas de comunicação celular .

ADC: Analog-to-Digital Converter.