

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SERGIO MANUEL RACINI BUENO

**CARACTERIZAÇÃO E REDUÇÃO DE EXPOSIÇÃO
HUMANA À CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
AMBIENTES Wi-Fi**

Porto Alegre

2014

SERGIO MANUEL RACINI BUENO

**CARACTERIZAÇÃO E REDUÇÃO DE EXPOSIÇÃO
HUMANA À CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
AMBIENTES Wi-Fi**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia da Computação;
Subárea: Redes e Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. PhD. Álvaro Augusto Almeida de Salles

Porto Alegre

2014

SERGIO MANUEL RACINI BUENO

CARACTERIZAÇÃO E REDUÇÃO DE EXPOSIÇÃO HUMANA À CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM AMBIENTES Wi-Fi

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

PhD., London University - Londres, Inglaterra.

Banca Examinadora:

Dr. Andreas Christ, IT'IS

Doutor pelo Swiss Federal Institute of Technology – Zurique, Suíça.

Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Pedra, SENAI-RS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University Of Wales College Of Cardiff – Cardiff, United Kingdom.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Maio de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família em especial meus pais, irmãos e minha namorada pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente meu Deus todo poderoso por orientar-me e abençoar-me todos os dias de minha vida.

A minha família pelo constante e incondicional apoio para continuar minha formação profissional.

A minha namorada Julieth Katherin, por toda a dedicação, apoio, paciência e conselhos ao longo deste processo.

Ao professor Dr. Álvaro Salles, por ser meu orientador no mestrado, sendo fundamental suas palavras e indicações no entorno acadêmico. Também, por sua paciência e apoio nas diferentes situações que aconteceram neste processo.

Aos amigos do LACOM, Severo, Paulo, Johan, Pedra, Giovani, Marco, Sperotto e à professora Liane pelas contribuições que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Andreas Christ por suas palavras de orientação continua sobre as simulações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Nesta pesquisa é feita uma análise da interação do campo eletromagnético gerado por microcomputadores portáteis com o corpo humano, operando na faixa de radiocomunicações WI-FI, através da avaliação da taxa de absorção específica (SAR). Os modelos de corpo humano heterogêneos utilizados são de um adulto de 34 anos e duas crianças de 6 e 11 anos os quais foram analisados em varias situações típicas de exposição à presença de um microcomputador portátil. Nas simulações dos cenários para avaliar a dosimetria foi utilizada a versão comercial do programa chamado SEMCAD X que é baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio no Tempo (FDTD). Da análise das simulações do modelo de corpo inteiro, o único resultado que ultrapassou a recomendação do (FCC, 1997) para 1 g de tecido foi na situação em que o microcomputador portátil, com a antena dipolo na parte posterior do teclado, está no colo do modelo de 34 anos. Numa segunda etapa, é feito um estudo teórico experimental da intensidade do campo elétrico gerado por dispositivos geradores de sinais Wi-Fi comerciais. Analisa-se à propagação de ondas eletromagnéticas através de paredes, utilizando uma antena monocone não ressonante e de banda larga, mediante o estudo e análise da sua taxa de onda estacionária. As medidas visam avaliar que projetando uma parede com uma espessura determinada consegue a propagação dos campos eletromagnéticos evitando reflexões e pontos quentes que possam produzir uma taxa de absorção maior no corpo humano presente nestes ambientes, além de caracterizar as propriedades dielétricas destas paredes.

Palavras-chave: Taxa de absorção específica. Radiações não ionizantes. Dosimetria. Transmissão. Propriedades dielétricas.

ABSTRACT

This research analyses the interaction of the electromagnetic field generated by portable computers with the human body, operating in the range of radio Wi-Fi, by evaluating the specific absorption rate (SAR). The heterogeneous human body models used were those of a 34 years old adult and two children aged 6 and 11, were analyzed under various standard conditions of exposure to the presence of a portable microcomputer. The commercial version of SEMCAD X which is based on the Finite Difference Method in the Time Domain (FDTD) method was used in the simulations of the scenarios, to evaluate the dosimetry. The analysis of the simulation of the whole body model, the only result that exceeded the recommendation of the (FCC, 1997) for 1g of tissue was the simulation in which the dipole antenna on the back of the keyboard of the laptop resting on the lap of the 34-year old model. In the second stage, a theoretical experimental study was made of the intensity of the electric field created from Wi-Fi band signals generating devices. Subsequently, an analysis is made of the propagation of the electromagnetic waves through walls, using a non-resonant broadband monocone antenna by analyzing its voltage standing wave ratio (VSWR). The measures aim to assess that designing a wall with a given thickness, propagation of electromagnetic waves can be achieved, thus avoiding reflections and hot spots that can lead to higher SAR in the human body present in these environments, moreover to characterize the dielectric properties of these walls.

Keywords: Specific Absorption Rate. No-ionizing radiation. Dosimetry. Transmission. Dielectric properties.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	18
1.4	REVISÃO DA LITERATURA	19
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA - (SAR).....	22
2.2	PRINCIPAIS NORMAS.....	23
2.3	EFEITOS DE CURTO E LONGO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E MODELOS ANATÔMICOS UTILIZADOS.....	24
2.3.1	Estimativas Avançadas da SAR Através de Modelos Heterogêneos	25
2.4	MODELOS DE CORPOS INTEIROS UTILIZADOS	26
2.5	PROPAGAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM AMBIENTES CONFINADOS ..	27
2.5.1	Impedância intrínseca do meio e vácuo.....	28
2.5.2	Coefficientes de reflexão e de transmissão	28
2.5.3	Incidência perpendicular de campo eletromagnético em paredes de diferentes espessuras	30
2.6	ANTENA DE BANDA LARGA PARA CARACTERIZAÇÃO DE PAREDES COM INCIDÊNCIA PERPENDICULAR DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS	31
2.6.1	Método de alimentação	32
2.6.2	Mecanismo de operação	32
2.6.3	Desempenho	34
2.7	RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS.....	36
3.	DESCRIÇÃO CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS INTEIROS	37
3.1	ELEMENTOS IRRADIADORES UTILIZADOS	37
3.1.1	Dipolo de meia onda	38
3.1.2	Antena Impressa de Formato de F-invertido (PIFA).....	38
3.2	MODELO DO MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL	40
3.3	DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO ANTENAS EM PRESENÇA DA CARCAÇA DO COMPUTADOR	45
3.4	DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA ELEVAÇÃO.....	47
3.5	DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA POSIÇÃO HORIZONTAL	49
3.6	DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 11 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO	51
3.7	DESCRIÇÃO CENÁRIO MODELO 6 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO	52
	53	
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS: AVALIAÇÃO DA DOSIMETRIA.....	54

4.1	AVALIAÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA ELEVAÇÃO.....	54
4.2	AVALIAÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA POSIÇÃO HORIZONTAL	57
4.3	AVALIAÇÃO CENÁRIO MODELO 6 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO	60
4.4	AVALIAÇÃO CENÁRIO MODELO 11 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO	61
5.	SIMULAÇÕES E MEDIDAS ANTENA MONOCONE PARA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM AMBIENTES CONFINADOS.....	64
5.1	MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO COM DISPOSITIVOS PORTÁTEIS COMERCIAIS.....	64
5.1.1	Avaliação do campo eletromagnético em presença do portátil	64
5.1.2	Avaliação do campo eletromagnético em presença do telefone celular	66
5.1.3	Avaliação do campo eletromagnético em presença do Tablet.....	67
5.2	MEDIÇÕES DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTES CONFINADOS POR PAREDES DE VÁRIAS GEOMETRIAS	67
5.2.1	Antena monocone sem presença de parede.....	69
5.2.2	Propagação através de parede de tijolos de geometria circular.....	71
5.2.3	Propagação através de parede de tijolos de geometria quadrada	73
5.2.4	Variação da intensidade de campo elétrico em espaço confinado cilíndrico	74
5.2.5	Comparação dos resultados.....	77
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	81
6.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS E PESQUISAS	82
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXO A. AVALIAÇÃO DA SAR EM CABEÇAS HETEROGÊNEAS	89
A.1	ESTIMATIVAS DE ABSORÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO	89
A.1.2	CABEÇAS HETEROGÊNEAS.....	90
A.2	MODELOS DE CABEÇAS IRRADIADOS COM O DIPOLO DE MEIA ONDA	91
A.2.2	MODELO CABEÇA ADULTO 34 ANOS	91
A.2.3	MODELO CABEÇA CRIANÇA 8 ANOS	92
A.3	MODELOS IRRADIADOS COM ANTENA PIFA	93
A.3.1	MODELO CABEÇA ADULTO 34 ANOS.....	94
A.3.2	MODELO CABEÇA CRIANÇA 8 ANOS	96
	ANEXO B MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO (FDTD)	98
B.1	EQUAÇÕES DE MAXWELL.....	98
B.2	ALGORITMO DE YEE.....	101
B.3	DISPERSÃO E ESTABILIDADE NUMÉRICA.....	102
B.4	CONDIÇÃO DE CONTORNO ABSORVEDORA (PML)	103

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Parte da Família Virtual: Duke, Ella, Billie, Thelonious (esquerda à direita).	26
Figura 2 Algumas posições atingidas no modelo utilizando a ferramenta Poser.	27
Figura 3 Reflexão e transmissão na fronteira.	28
Figura 4 Lamina dielétrica de espessura finita.	29
Figura 5 Coeficiente de reflexão para concreto, madeira e tijolo na frequência de 2,4 GHz para diferentes espessuras de parede.	30
Figura 6 Coeficiente de transmissão para concreto, madeira e tijolo na frequência de 2,4 GHz para diferentes espessuras de parede.	30
Figura 7 Vista perspectiva da antena monocone de banda larga.	32
Figura 8 Dimensões físicas da antena monocone de banda larga: (a) vista lateral e (b) vista lateral com detalhe do pino de alimentação.	33
Figura 9 Diagramas de irradiação no plano vertical polar e 3D da antena monocone: (a) fmin, (b) 5fmin e (c) 10fmin.	35
Figura 10 Dipolo de meia onda utilizado	38
Figura 11 Dimensões da antena PIFA: (a) vista frontal superior, (b) vista frontal inferior, (c) vista lateral esquerda e (d) vista lateral esquerda detalhe.	39
Figura 12 (a) coeficiente de reflexão S11 da antena PIFA e (b) comportamento da impedância da antena PIFA.	40
Figura 13 Dimensões do microcomputador portátil	41
Figura 14 Localização do dipolo no canto superior direita na parte posterior da tela do microcomputador portátil: (a) vista perspectiva, (b) vista frontal, (c) detalhe vista lateral esquerda e (d) vista lateral esquerda.	42
Figura 15 Localização da PIFA no canto superior direito na parte posterior da tela do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista frontal, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.	43
Figura 16 Localização do dipolo na parte posterior do teclado do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista superior, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.	44
Figura 17 Localização da PIFA na parte posterior do teclado do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista superior, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.	45
Figura 18 Diagramas de irradiação dos elementos irradiadores utilizados: (a) PIFA no teclado, (b) dipolo no teclado, (c) PIFA na tela e (d) dipolo na tela.	46
Figura 19 Duke sentado com microcomputador portátil: (a) vista frontal posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição inicial, (c) vista lateral esquerda posição intermediária e (d) vista lateral esquerda posição final.	48
Figura 20 Exemplo da malha otimizada na pele do modelo.	49
Figura 21 Duke sentado com microcomputador portátil em frente do torso: (a) vista frontal, (b) vista lateral esquerda posição inicial, (c) vista lateral esquerda posição intermediária e (d) vista lateral esquerda posição final.	50
Figura 22 Ilustração bordas absorvedoras do cenário.	51

Figura 23 Billie deitada com microcomputador portátil tangencial ao colo (vista lateral direita).	52
Figura 24 Malha truncada no cenário de simulação da Billie.	52
Figura 25 Thelonious deitado com microcomputador portátil tangencial ao colo (vista lateral direita).	53
Figura 26 Malha truncada no cenário de simulação do Thelonious.	53
Figura 27 Distribuição da SAR no modelo com o dipolo abaixo do teclado: (a) vista perspectiva posição inicial tangencial no colo, (b) vista perspectiva posição intermediária localizado 10 cm acima do colo e (c) vista perspectiva posição final localizado 20 cm acima do colo.	55
Figura 28 Distribuição da SAR no modelo com a PIFA abaixo do teclado: (a) vista perspectiva posição inicial tangencial no colo, (b) vista perspectiva posição intermediária localizado 10 cm acima do colo e (c) vista perspectiva posição final localizado 20 cm acima do colo.	56
Figura 29 Distribuição da SAR no modelo com o dipolo na tela afastando se do torso: (a) vista em perspectiva inicial a 22 cm (b) vista em perspectiva intermediária a 32 cm e (c) vista em perspectiva final a 42 cm.	58
Figura 30 Distribuição da SAR no modelo com a PIFA na tela afastando se do torso: (a) vista em perspectiva inicial a 22 cm (b) vista em perspectiva intermediária a 32 cm e (c) vista em perspectiva final a 42 cm.	59
Figura 31 Distribuição da SAR no Thelonious com o dipolo no teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita.	61
Figura 32 Distribuição da SAR no Thelonious com a PIFA localizada na parte posterior do teclado	61
Figura 33 Distribuição da SAR na Billie com o dipolo localizado na parte posterior do teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita.	62
Figura 34 Distribuição da SAR na Billie com a PIFA localizada na parte posterior do teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita	63
Figura 35 Ilustração dos valores obtidos da intensidade de campo elétrico no portátil com o medidor de campo localizado a 10 cm respeito ao teclado: (a) vista lateral esquerda posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição intermediaria, (c) vista lateral esquerda posição intermediaria medidor de campo a 30 cm da placa Wi-Fi e (d) vista lateral esquerda posição final.	65
Figura 36 Ilustração dos valores obtidos da intensidade de campo elétrico no portátil com o medidor de campo localizado a 20 cm respeito ao teclado: (a) vista lateral esquerda posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição intermediaria, (c) vista lateral esquerda posição intermediaria medidor de campo a 30 cm da placa Wi-Fi e (d) vista lateral esquerda posição final a 40 cm da placa Wi-Fi.	66
Figura 37 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone sem presença da parede.	70
Figura 38 TOE da antena monocone simulada e medida.	70
Figura 39 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone em presença de parede de tijolo de geometria circular: (a) cenário experimental vista em perspectiva e (b) cenário simulado vista superior.	71
Figura 40 TOE da antena monocone simulada e medida em presença de parede tijolo de geometria circular.	72
Figura 41 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone em presença de parede de tijolo de geometria quadrada: (a) cenário simulado vista superior e (b) cenário simulado vista lateral.	73
Figura 42 TOE da antena monocone simulada e medida em presença de parede tijolo de geometria quadrada.	74
Figura 43 Cenário de provas medição intensidade de campo eletromagnético parede circular.	75

Figura 44 Campo elétrico medido em 2,0 GHz e 2,7 GHz dentro de área confinada por parede de tijolo cilíndrica.....	76
Figura 45 Variações do campo elétrico na direção azimutal a 6 cm da parede.....	77
Figura 46 Variações do campo elétrico na direção azimutal a 36 cm da parede.....	77
Figura 47 TOE medida de 400 MHz – 4000 MHz com e sem confinamento.....	78
Figura 48 TOE simulada de 400 MHz – 4000 MHz com e sem confinamento.....	79
Figura 49 Diferença entre o coeficiente de reflexão simulado sem presença da parede com o coeficiente de reflexão simulado em presença da parede geometria circular.	79
Figura 50 Diferença entre o coeficiente de reflexão medido sem presença da parede com o coeficiente de reflexão medido em presença da parede geometria circular.....	80
Figura 51 Fatores para determinação da SAR na cabeça.	89
Figura 52 Modelos de 8 e 34 anos heterogêneos utilizados para a estimativa da SAR.....	90
Figura 53 Modelo 34 anos em presença do dipolo de meia onda.....	91
Figura 54 Distribuição da SAR no modelo 34 anos em presença do dipolo de meia onda.....	92
Figura 55 Modelo 8 anos em presença do dipolo de meia onda.	92
Figura 56 Distribuição da SAR no modelo 8 anos em presença do dipolo de meia onda.....	93
Figura 57 Posicionamento da antena PIFA na carcaça do aparelho celular: (a) vista frontal, .	94
Figura 58 Modelo cabeça 34 anos em presença da PIFA localizada no interior da carcaça de um aparelho celular.	95
Figura 59 Distribuições da SAR em presença da PIFA no modelo 34 anos.	95
Figura 60 Modelo cabeça 8 anos em presença da PIFA localizada no interior da carcaça de um aparelho celular.	96
Figura 61 Distribuições da SAR em presença da PIFA no modelo 8 anos.	97
Figura 62 Componentes vetoriais do campo elétrico e magnético da célula de Yee (TAFLOVE,	101
Figura 63 Dispersão e estabilidade numérica.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites da SAR para público em geral.....	24
Tabela 2 Valores de condutividade equivalente e permissividade relativa para 2,4 GHz dos materiais mencionados.	31
Tabela 3 Descrição parâmetros físicos da antena monocone banda larga.....	34
Tabela 4 Dimensões físicas otimizadas do dipolo.....	38
Tabela 5 Valor em milímetros dos diversos parâmetros físicos da antena PIFA.....	39
Tabela 6 Valores de psSAR no modelo variando a elevação do computador portátil respeito ao colo.	54
Tabela 7 Valores de psSAR no modelo variando a distância horizontal do microcomputador portátil respeito ao torso utilizando o dipolo e a PIFA para cada caso.	57
Tabela 8 Valores de psSAR no Thelonious com o microcomputador portátil localizado tangencialmente no colo.....	60
Tabela 9 Valores de psSAR na Billie com o microcomputador portátil localizado tangencialmente no colo.....	62
Tabela 10 Valores registrados no medidor de campo localizado a varias distancias da placa Wi-Fi do computador portátil.....	65
Tabela 11 Valores registrados no medidor de campo localizado a varias distancias da placa Wi-Fi do computador portátil.....	66
Tabela 12 Dimensões da antena monocone.....	69
Tabela 13 Tecidos identificados nos modelos de cabeça utilizados.....	90
Tabela 14 Valores de psSAR no modelo 34 anos em presença do dipolo.	92
Tabela 15 Valores de psSAR no modelo 8 anos em presença do dipolo.	93
Tabela 16 Valores de psSAR no modelo 34 anos em presença da PIFA.	95
Tabela 17 Valores de psSAR no modelo 8 anos em presença da PIFA.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda (m)
c	Velocidade de onda no vácuo (m/s)
σ	Condutividade elétrica (S/m)
μ	Permeabilidade magnética (H/m)
α	Angulo de abertura (graus)
Z_0	Impedância característica (Ω)
S_{11}	Coefficiente de reflexão (dB)
ρ	Densidade de massa do tecido (Kg/m^3)
ϵ_0	Permissividade do vácuo (F/m)
ϵ_r	Permissividade dielétrica relativa
E	Intensidade do campo elétrico (V/m)
η_0	Impedância intrínseca no vácuo (Ω)

LISTA DE ABREVIATURAS

ABC: "Absorbing Boundary Condition" - Condições de Contorno
AM: Amplitude Modulada
BW: Largura de banda
CPU: "Central Processing Unit" - Unidade Central de Processamento
CT: Tomografia Computorizada
DELET: Departamento de Engenharia Elétrica
EM: Eletromagnético
ERB: Estação Rádio Base
FDTD: Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FM: Frequência Modulada
ISM: Faixa Industrial, Científica e Médica
ITU: União Internacional das Telecomunicações
LACOM: Laboratório de Comunicações
MRI: Imagens de Ressonância Magnética
PIFA: Antena Impressa de Formato F-invertido
PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
psSAR: Pico Espacial da Taxa de Absorção Específica
RAM: "Random Access Memory"
RF: Radiofrequência
SAR: "Specific Absorption Rate" - Taxa de Absorção Específica
Smartphone: Telefone Móvel Inteligente
Tflop: Tera flop
TOE: Taxa de Onda Estacionária
VSWR: Voltage Standing Wave Ratio
Wi-Fi: "Wireless Fidelity" - Fidelidade sem Fio
WLAN: "Wireless Local Area Network" - Rede de área local sem fio

1. INTRODUÇÃO

Campos eletromagnéticos produzidos por emissoras de TV, estações de rádio AM e FM, estações rádio base (ERB), transmissores de rádio frequência (RF), roteadores sem fio, dispositivos “bluetooth” e outras fontes para comunicações estão presentes há várias décadas. Atualmente tecnologias sem fio estão sendo amplamente utilizadas em dispositivos de uso diário tais como telefones celulares inteligentes, computadores portáteis, computadores de mesa, tablets, reprodutores de áudio, consoles de jogos, até em eletrodomésticos. Segundo (CISCO SYSTEMS INC., 2014), o número de dispositivos sem fio como computadores portáteis e telefones inteligentes vai ultrapassar o número de habitantes do planeta para o ano de 2014 podendo gerar um tráfego mensal de até 15 exabytes (1 exabyte = 10^9 gigabytes) através de internet para o 2018. Tais dados mostram que estudos e pesquisas de possíveis efeitos biológicos nos usuários expostos a ambientes Wi-Fi tornam-se importantes dada a penetração agressiva no mercado.

1.1 MOTIVAÇÃO

A rápida e crescente utilização de dispositivos sem fio que operam na faixa ISM (Industrial, Científica e Médica), em ambientes como residências e escritórios, já estão causando preocupação nos usuários. Isso advém dos possíveis efeitos biológicos gerados pela longa exposição a campos eletromagnéticos de baixa intensidade irradiados por esses dispositivos (ISHAK, 2011).

A presença desses campos eletromagnéticos depende entre outros, da distância do usuário da fonte de irradiação e dos obstáculos entre ele e a fonte. Assim, quanto maior a distância e o número de obstáculos tanto menor a intensidade do campo. Entretanto, quando a fonte encontra-se no mesmo ambiente do usuário, as paredes podem aumentar a intensidade dos campos, através da ocorrência de ondas estacionárias (RAMO, 1981) com o consequente aumento dos riscos. Assim, torna-se importante a avaliação da intensidade de campo eletromagnético em ambientes confinados. Se não for possível eliminar a fonte de dentro do ambiente, podem ser projetadas paredes transparentes a certas frequências, de modo a evitar reflexões indesejadas que possam afetar o usuário com altos níveis de campos eletromagnéticos. Essa última consideração leva à avaliação do comportamento de paredes construídas com materiais comuns na construção civil no que diz respeito à incidência de campos eletromagnéticos sobre as mesmas.

Note-se que a avaliação do comportamento das paredes deve ser feita em banda larga pois se desconhece o valor da permissividade do material (tanto da parte real quanto das perdas dielétricas). Entretanto, tal avaliação não se dá sem alguma dificuldade. Como mostra em (KRAZEWSKI, 1996) são escolhidas as frequências com baixa TOE para executar as medições. Isso porque as variações da TOE nas antenas corneta são bastante significativas. Contorna-se esse problema com a escolha de uma antena que apresente pequenas variações da TOE com a frequência. Opta-se então pela antena monocone que, além de variações muito pequenas da TOE com a frequência, possui simetria cilíndrica, o que permite a realização de medidas com incidência praticamente perpendicular desde que se utilize uma parede cilíndrica. Pode-se também, a partir dessa situação ideal de incidência perpendicular, elaborar situações mais reais, como a parede quadrada, com um padrão para efetuar-se comparações experimentais.

1.2 OBJETIVOS

Os seguintes itens constituem os objetivos desse trabalho:

- avaliar a taxa de absorção específica (SAR) no corpo humano em duas situações típicas de exposição quando do uso de microcomputador portátil que emita sinal na faixa Industrial, Científica e Médica (ISM), no entorno de 2,45 GHz, onde opera o padrão “Wireless Fidelity” (Wi-Fi). Os resultados obtidos nas simulações serão comparados com os níveis permitidos pelas normas e recomendações internacionais mais difundidas.

- avaliar o campo eletromagnético gerado por alguns dispositivos de uso pessoal, geradores de sinais de Wi-Fi. Tal avaliação é necessária para que se tenham estimativas iniciais do campo gerados por eles. A diversidade dos equipamentos disponíveis no mercado é tal que torna impossível a definição “equipamento padrão”. Assim, busca-se com estas medidas avaliar a qualidade das simulações quanto ao nível aproximado de campo gerado por estes equipamentos.

- mostrar os níveis de redução da intensidade do campo eletromagnético (EM) obtidos em ambientes confinados quando se utiliza projeto adequado de paredes com dimensões e materiais adequados para a faixa de 2,4 GHz.

Este trabalho aplica uma metodologia teórico-experimental para atingir os objetivos propostos. De forma geral, as seguintes etapas foram realizadas:

- levantamento das informações disponíveis na literatura,
- coleta de dados dos modelos discretos que representam seres humanos e simulações analíticas e numéricas sobre os mesmos,
- avaliação dos resultados,
- experimentação envolvendo interação de ondas eletromagnéticas com paredes de ambientes confinados e
- comparação dos resultados experimentais com os modelados.

Nas informações disponíveis na literatura, coletam-se os dados dos modelos discretos que representam seres humanos. Com as simulações analíticas e numéricas sobre os mesmos, monta-se situação experimental que represente adequadamente a interação de ondas eletromagnéticas nos modelos e em ambientes confinados e comparam-se os resultados experimentais com os modelados.

1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido em várias fases. Primeiramente foram selecionados no banco de dados do laboratório de comunicações (LACOM) da UFRGS os modelos heterogêneos a serem utilizados. O critério de seleção foi baseado em características como o número de tecidos e a resolução. Os modelos selecionados para o corpo inteiro foram de um adulto masculino de 34 anos, uma criança feminina de 11 anos e uma criança masculina de 6 anos. As articulações do modelo de 34 anos são móveis sendo possível modificar-se sua posição. Na segunda etapa, foi feito o processo de caracterização dos tecidos correspondentes aos modelos escolhidos. Na sequência, foram projetados e simulados os elementos irradiadores: um dipolo de meia onda e uma antena impressa de formato de F-invertido (PIFA), que operam na faixa de 2,45 GHz. A seguir foram estabelecidas situações típicas de exposição dos modelos aos elementos irradiadores. Modificações na malha, escolha do tempo de simulação e definição das condições de contorno absorvedoras (ABC) foram feitas nos cenários antes de rodar a simulação. Após, os resultados foram analisados e comparados com os valores dos níveis das recomendações e padrões internacionais. Na sequência é feita uma experiência utilizando uma antena monocone de banda larga para avaliar a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes confinados analisando as perturbações causadas pelas reflexões da parede

1.4 REVISÃO DA LITERATURA

Neste item é feita a revisão dos principais resultados apresentados na literatura relativos aos efeitos da radiação em ambientes Wi-Fi e ao cálculo da SAR em seres humanos.

Em (GUTERMAN et. al., 2007a) é avaliada a interação entre uma antena impressa de formato F-invertido (PIFA) na faixa ISM de 2,4 GHz e o corpo humano para várias localizações da antena no laptop. Os valores de SAR registrados variaram de acordo às diferentes localizações da antena no laptop. Em (SHABANI et. al., 2008) é medida a intensidade do campo elétrico em ambientes Wi-Fi simulando uma onda plana incidente para avaliar a distribuição do SAR em mais de vinte órgãos do corpo humano, onde é mencionado que os efeitos de longo tempo de exposição devem ser pesquisados ainda mais para poder ter resultados mais objetivos. Em (ELSAYED et. al., 2011) são feitas duas diferentes aproximações para avaliar a exposição em ambientes Wi-Fi confinados nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz, onde na primeira faixa é analisada a propagação eletromagnética em cenários vazios, enquanto na segunda faixa, as medições são feitas em cenários reais. Diferentes valores de intensidade de campo elétrico são atingidos dependendo da localização do elemento irradiador. (BORNKESSEL, et al., 2006) consideravam os pontos de acesso e os terminais móveis com uma potência máxima de 100 mW e as medidas da exposição em torno de roteadores sem fio e terminais móveis bem como cenários misturados. (KAYS, 2006) tenta identificar e avaliar métodos para reduzir a potência de irradiação em ambientes internos para sistemas de transmissão baseados no padrão IEEE 802.11a/g, fazendo otimizações na camada física implementando uma maior robustez numa relação sinal-ruído (SNR) ruim, para tolerar uma maior redução da potência de transmissão. Em (FINDLAY et. al., 2010) são executados cálculos nas faixas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz usando um modelo do corpo inteiro de uma criança de 10 anos para avaliar a exposição deste a campos eletromagnéticos em ambientes Wi-Fi nas escolas gerados por dipolos de meia onda e antenas F invertida (IFA). (MARTÍNEZ – BÚRDALO, 2009) faz um estudo da exposição do corpo humano a campos eletromagnéticos gerados por dispositivos sem fio na faixa de 2,4 GHz utilizando dipolos de meia onda e cenários com paredes metálicas e de concreto. Em (DIMBYLOW, 1996) é feita uma avaliação da dosimetria num modelo de corpo inteiro heterogêneo composto de 37 tipos de tecidos diferentes utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Foi desenvolvido um modelo empírico de uma criança de 6 anos visando determinar a relação entre a permissividade relativa, a condutividade equivalente e a distância entre as antenas na faixa de 2,45 GHz (KURUP et. al., 2011). Em (LEEN et. al., 2010; FOSTER, 2007) foi feito

um procedimento para determinar de maneira experimental a intensidade de campo em redes de área local sem fio (WLAN) na faixa de 2,4 GHz levando em consideração largura de banda, ciclo de trabalho (“duty cycle”) entre outros parâmetros para avaliar os limites dosimétricos permitidos pelas normas internacionais mais difundidas para público em geral. Em (BERNARDI, 1998; KESHVARI, 2006) é feita uma análise da exposição do usuário próximo a antenas em ambientes Wi-Fi onde se assume que o campo eletromagnético é maior causando ameaças contra a saúde devido à exposição prolongada e fazendo especial interesse nos efeitos de natureza térmica no usuário. Em (ÁLVAREZ, 2011) são feitas várias análises e estudos dos efeitos da radiação na faixa de 2,4 GHz em animais pequenos como ratos onde os resultados mostraram uma variação em algumas proteínas nos animais irradiados. É feita uma avaliação da SAR em zonas específicas, com modelo heterogêneo, utilizando dipolos de meia onda para simular dispositivos portáteis perto do corpo em várias faixas incluindo a faixa de 2,45 GHz, e os resultados são comparados com a norma IEC 62209 parte 2 (KANGAS, 2011). Em (PEYMAN et. al., 2011) foi feita uma análise experimental com laptops para estabelecer o diagrama de radiação, distribuição de potência do campo elétrico para identificar os ângulos nos quais a intensidade de campo é máximo num raio de 50 cm.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2, está descrita a fundamentação teórica base da pesquisa. Conceitos fundamentais da SAR e seus efeitos térmicos e não térmicos. É feita uma descrição física dos modelos heterogêneos de corpos inteiros modelados e dos limites dosimétricos recomendados pelas principais normas internacionais de segurança referentes às radiações não ionizantes. Também é feita uma avaliação teórica experimental do princípio de transmissão e reflexão de uma onda plana incidindo normalmente num dielétrico com espessura finita.

No Capítulo 3, é feita uma descrição física de cada um dos elementos irradiadores utilizados nas simulações que são um dipolo de meia onda e uma antena PIFA. A seguir são descritos os cenários de simulação onde os modelos de corpo inteiro são expostos a várias situações típicas em ambientes Wi-Fi. Na primeira delas, o modelo de 34 anos está sentado, e a elevação do microcomputador portátil é variada verticalmente com respeito ao colo. Na segunda situação este modelo está sentado, e o microcomputador é afastado horizontalmente avaliando a dosimetria em 3 posições com respeito ao torso. Para o caso dos modelos das crianças estes se encontram deitados com o portátil localizado tangencialmente no colo. Os

resultados obtidos das simulações são comparados aos limites descritos nas recomendações internacionais relacionadas à dosimetria no corpo humano.

No Capítulo 4, são mostrados os resultados dos níveis dosimétricos obtidos nas simulações com os modelos de corpos inteiros visando compará-los aos limites de exposição permitidos pelas normas internacionais mais relevantes.

No Capítulo 5, são feitas algumas simulações para analisar a propagação de ondas eletromagnéticas através de paredes transparentes para a faixa de Wi-Fi com uma antena monocone de banda larga projetada no software comercial Antenna Magus. São apresentados os requisitos de projeto, as dimensões da antena projetada, as estimativas de desempenho, a simulação da antena, fotos da antena construída e resultados do desempenho da antena até 6 GHz medidos em analisador vetorial. Nesta etapa foram medidos e analisados os campos gerados por alguns dispositivos portáteis comerciais para logo serem comparados aos limites permitidos pela lei 8896/02 de Porto Alegre para frequências superiores a 1700 MHz e pela lei nacional No. 11.934 de 05/05/2009 da Anatel.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões de temas para trabalhos posteriores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são mostrados os principais fundamentos teóricos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, como aspetos relacionados com o conceito da SAR, uma relação das recomendações internacionais e seus limites às exposições a campos eletromagnéticos na faixa de radiações não ionizantes. Também é descrito o modelo utilizado de corpo inteiro heterogêneo de alta resolução.

2.1 TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA - (SAR)

Conforme (WBA, 2012) nos últimos anos o uso de terminais móveis tais como telefones celulares, microcomputadores portáteis e outros dispositivos eletrônicos operando na faixa de rádio frequência tem crescido rapidamente. Preocupações de como se pode afetar a saúde humana por causa da radiação proveniente das antenas pode resultar em taxas elevadas em certas zonas específicas do corpo. A exposição variante no tempo a campos eletromagnéticos é usada para medir quantidades específicas de dosimetria que levam em consideração diferentes faixas de frequências (KANGAS, 2011). A medida usada para medir a dosimetria devido à radiação é denominada SAR, a qual é medida em Watts por kilograma de tecido (W/kg) ou equivalentemente em miliWatt por grama de tecido (mW/g). A SAR é a medida da taxa na qual a energia é absorvida pelo corpo humano quando exposto a um campo EM (ISHAK, 2011). Segundo a norma (IEEE 1528) de 2003, a SAR é definida como a taxa de variação temporal da energia incremental (dW) dissipada numa massa incremental (dm) contida em um elemento de volume (dV) de densidade (ρ).

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{\rho dV} \right) \quad (1)$$

A SAR se pode relacionar ao campo elétrico num ponto por:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (2)$$

Onde:

σ :condutividade equivalente do tecido (S/m)

ρ :densidade do tecido (Kg/m³)

|E| :módulo do campo elétrico (V/m) [rms]

O “peak spatial average SAR” (psSAR) é determinado mediante uma média numérica ou experimental dos valores locais da SAR em cubos de 1 grama ou 10 gramas na grade usando algoritmos para realizar a integração e é expressa em W/kg.

2.2 PRINCIPAIS NORMAS

Os efeitos de curto e longo tempo de exposição a campos eletromagnéticos têm chamado especial atenção na comunidade científica devido às consequências que estes podem causar na saúde das pessoas. Na continuação, são descritas as normas que se destacam e que são referência da presente pesquisa.

A norma (IEC 62209-1), de 2005, trata de assuntos relacionados à exposição a campos eletromagnéticos gerados por dispositivos de comunicação sem fio, instrumentação e procedimentos de medição da SAR para dispositivos portáteis usados próximos à orelha nas faixas de frequência de 300 MHz até 3 GHz.

A norma (IEC 62209-2), de 2010, trata da avaliação à exposição a campos eletromagnéticos gerados por dispositivos sem fio próximo ao corpo humano na faixa de frequências de 30 MHz até 300 GHz. O padrão aplica para qualquer dispositivo afastado do corpo humano numa distância de até 200 mm, como por exemplo, quando é sustentado pela mão, perto do rosto ou localizado perto de qualquer parte do corpo.

A norma (IEEE C95.1), de 2005, trata da limitação a campos eletromagnéticos e às correntes, induzidas ou de contato, a fim de proteger as pessoas dos possíveis efeitos prejudiciais associados a estes fenômenos físicos. Em particular, minimizar os efeitos adversos para a saúde associados com o aquecimento nas frequências de 100 KHz a 300 GHz.

A Federal Communications Commission (FCC) nos Estados Unidos, tem adotado e implementado padrões de segurança desde 1985. As recomendações da FCC para a exposição do corpo humano a campos de rádio frequência (RF) foram derivados das recomendações da National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) e o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

A International Radiation Protection Association's (IRPA) junto com a International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) publicam as recomendações relacionadas com a exposição a fontes de RF e micro-ondas que são utilizados pelos países da União Europeia (EU) e outros países industrializados fora da Europa.

Os limites da SAR permitidos para a exposição do público em geral de algumas recomendações internacionais e nacionais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Limites da SAR para público em geral

Descrição	ICNIRP	IEEE	FCC
Ano	1998	2006	1997
Corpo Inteiro (W/kg)	0.08	0.08	0.08
Cabeça e Tronco (W/kg)	2	2	1.6
Massa Tecido (g)	10	10	1

Fonte: Kangas, 2011.

2.3 EFEITOS DE CURTO E LONGO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E MODELOS ANATÔMICOS UTILIZADOS

A interação dos campos eletromagnéticos com os sistemas biológicos pode resultar em alterações nestes. Estes efeitos podem ser classificados como:

1.) “Agudos”, ou de curto tempo de exposição, ou “térmicos”: as normas mais difundidas internacionalmente, p.ex., ICNIRP, FCC/IEEE, lei nacional (2009), etc., são baseadas unicamente nestes efeitos; e

2.) “Crônicos”, ou de longo tempo de exposição, ou “não térmicos”, p. ex., as pessoas que trabalham ou habitam próximas de Estações Rádio Base e outras fontes de RF e micro-ondas estão sendo irradiadas várias horas por dia.

Atualmente vários estudos e normas (p. ex., ICNIRP, 1998) que estão relacionados com os efeitos biológicos se baseiam nos efeitos de curto tempo de exposição a fontes de RF, p. ex., poucos minutos até um par de horas. É insuficiente o conhecimento acerca dos efeitos de longo tempo de exposição. Redes de acesso pessoal sem fio (WPAN) ou redes de área local sem fio (WLAN), são exemplos de ambientes nos quais se pode encontrar um sem número de aparelhos como p. ex., microcomputadores portáteis, aparelhos celulares inteligentes, dispositivos “bluetooth”, assistentes digitais pessoais (PDA), pontos de acesso ou roteadores sem fio, perto ao corpo irradiando constantemente durante tempos prolongados vários dias por semana. Em (AVENDAÑO et. al., 2012) são avaliados os efeitos de longo tempo de exposição nos espermatozoides a radiações emitidas pelos microcomputadores portáteis quando trabalhando na faixa de 2,45 GHz. Em (LEE et. al., 2005) são analisados os efeitos da exposição a campos eletromagnéticos na faixa de 2,45 GHz e os resultados indicam que pode existir uma alteração na expressão do gene em células humanas cultivadas. Em

(NITTBY, 2008; FINNIE, 2002) mostram que o longo tempo de exposição a um aparelho celular na faixa de 900 e 1800 MHz entre 1 - 6 horas diárias durante várias semanas produziu uma alteração no córtex do cérebro e no hipocampo dos ratos analisados no laboratório. Em (EGER, 2004) foi estudado por vários anos de exposição constante de certa população numa área próxima a uma ERB com aquela fora da sua zona de exclusão. Os resultados mostraram que a população exposta teve entre três e quatro vezes mais risco de contrair câncer num raio aproximado de 350 a 400 metros respectivamente quanto àquela fora destes raios. Em (SAGE, 2009) é feita uma pesquisa relacionada com os efeitos na saúde humana como câncer de cérebro causados por tecnologias de baixa intensidade como “digital enhanced cordless telecommunications” (DECT) utilizada em telefones sem fio, “wireless local area network” (WLAN) e sistemas tipo “worldwide interoperability for microwave access” WiMAX. Em (SHANIN, 2014) são reportados os efeitos de longo tempo de exposição e suas prejudiciais consequências no sistema biológico em ratos, como p. ex., baixa qualidade do esperma, redução e degeneração no diâmetro dos ductos renais, entre outros. Em (SANGUM, 2014) são reportados os efeitos dos campos electromagnéticos na faixa de 2450 MHz no crescimento e desenvolvimento de ratos femininos. O ganho de massa corpórea registrado no grupo irradiado foi significativamente menor do que o grupo isolado e controlado. Também foram registrados alterações e atrasos na puberdade dos ratos femininos.

2.3.1 Estimativas Avançadas da SAR Através de Modelos Heterogêneos

Na sequência vão ser descritos alguns projetos científicos que desenvolvem modelos para fazer estimativas da SAR mediante simulações ou processos experimentais. Em seguida será descrito o modelo de corpo inteiro heterogêneo modelado nos cenários de exposição a ambientes Wi-Fi.

Com os modelos heterogêneos se pode ter uma aproximação mais exata do corpo humano. São diversificados os projetos e pesquisas relacionadas com o desenvolvimento dos modelos heterogêneos na atualidade. O projeto humano visível (“Visible Human Project”) foi a primeira pesquisa extensiva relacionada com a elaboração uma biblioteca digital de modelos digitais representando a anatomia feminina e masculina baseados cortes fotográficos de alta resolução de cadáveres selecionados. O Golem é um modelo baseado em um homem de 38 anos desenvolvido pela National Research Centre for Environment and Health in Germany (GSF) composto por imagens com resolução de 2,08 mm x 32,08 mm de tomografia computadorizada (CT) representando um total de 121 tipos de tecidos. Alguns modelos de

cabeça e corpo inteiro foram reduzidos considerando as proporções diferentes de cabeças de crianças (GANDHI et. al., 1996). O projeto da família virtual foi desenvolvido baseado em modelos anatomicamente corretos. Alguns deles são um adulto masculino de 34 anos, uma adulta feminina de 26 anos e duas crianças de 11 e 6 anos para fazer avaliações de dosimetria. Os modelos foram obtidos mediante a reconstrução de imagens de ressonância magnética (MRI) de alta resolução. Até 80 tecidos diferentes foram identificados das MRI (CHRIST et. al., 2010).

Fonte: Christ, 2010.

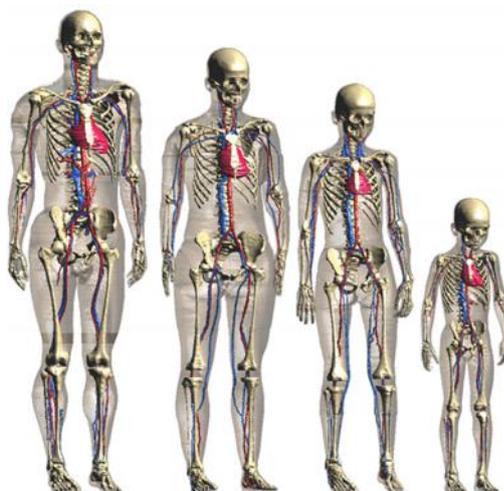


Figura 1 Parte da Família Virtual: Duke, Ella, Billie, Thelonious (esquerda à direita).

2.4 MODELOS DE CORPOS INTEIROS UTILIZADOS

O modelo de corpo inteiro selecionado de 34 anos – Duke Phantom - foi o de um adulto de 34 anos masculino denominado Duke pertencente à população virtual. Com um peso de 72,4 kg e de 1,74 m. de altura, é um modelo de alta resolução que está composto por 77 tecidos e 75 ossos devidamente identificados e proporcionados como p. ex., pele, músculo, gordura, nervo, sangue, matéria branca, matéria cinzenta, cerebelo, etc. Este modelo faz parte do SEMCAD X® “Poser Package” foi desenvolvido para permitir a deformação da posição da anatomia humana modificando suas posturas. Na Figura 2 estão mostradas algumas posições que podem ser atingidas nos modelos da família virtual mediante a ferramenta do “Poser Package”. O modelo de 11 anos – Billie Phantom – foi de uma criança de 11 anos feminino denominado Billie população à família virtual. Com um peso de 35,4 kg e de 1,47 m. de altura, é igualmente um modelo de alta resolução composto por 75 tecidos devidamente identificados. O –Thelonious Phantom – é um modelo de masculino de 6 anos de 19,3 kg de peso e 1,17 m. de altura. O Thelonious está composto por 76 tecidos identificados.

Fonte: SPEAG, 2009.

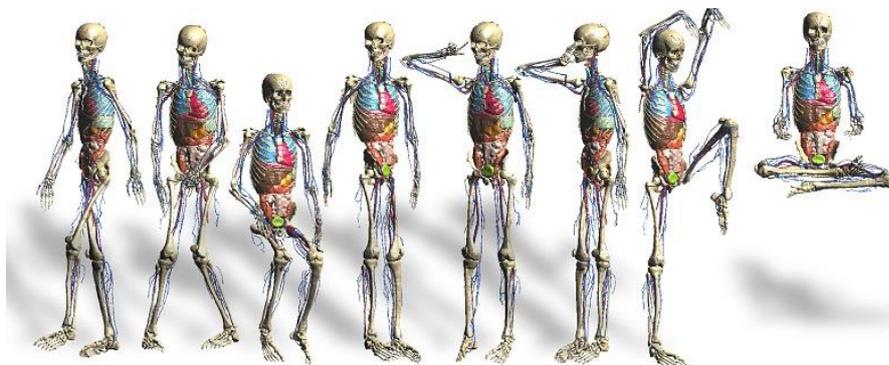


Figura 2 Algumas posições atingidas no modelo utilizando a ferramenta Poser.

2.5 PROPAGAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM AMBIENTES CONFINADOS

A propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes confinados por paredes pode ser analisada através de modelos analíticos e modelos numéricos. A incidência de uma onda eletromagnética em uma parede pode resultar em reflexão e transmissão. Assim, parte da energia da onda é refletida e parte transmitida. Os coeficientes de reflexão e de transmissão dependem das propriedades dielétricas dos meios atravessados como a permissividade relativa (ϵ_r) e a condutividade equivalente (σ), da frequência e do ângulo de incidência (RAMO, 1981).

Considere-se a Figura 3, que apresenta dois dielétricos distintos, uniformes e ocupando infinitamente os espaços à esquerda e à direita da interface entre os dois. Considere-se ainda que uma onda transversal eletromagnética (TEM) se propaga do meio 1 (esquerda) para o meio 2 (direita), e incide nesta interface perpendicularmente. Nesse caso, o campo elétrico e o campo magnético são tangenciais à superfície da interface. A condição de continuidade impõe que o valor total de ambos deve ser o mesmo na região imediatamente próxima à interface. Considerando que não se possui onda incidente do meio 2 para o meio 1, se assumirmos a presença de uma onda refletida no meio 1, o campo total, será dado pela soma vetorial do campo incidente com o campo refletido. Poderá então ser feito igual ao campo transmitido servindo de condição de contorno para a solução das equações de Maxwell (SEVERO, 2003).

Fonte: Severo, 2003.

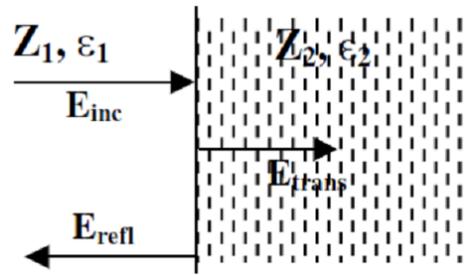


Figura 3 Reflexão e transmissão na fronteira.

2.5.1 Impedância intrínseca do meio e vácuo

Quando uma onda plana uniforme incide num dielétrico sem perdas (ou ideal), a impedância característica (ohms) é um número real (campos elétrico e magnético temporalmente em fase). Se a onda incidir num dielétrico real com baixas perdas, a impedância intrínseca torna-se um valor complexo (campo magnético atrasado ligeiramente no tempo em relação ao campo elétrico). Na sequência, as equações (3) até (10) são obtidas de (SEVERO, 2003). Tipicamente a impedância intrínseca no vácuo é,

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega = 377 \Omega \quad (3)$$

A impedância intrínseca num dielétrico qualquer é obtida pela relação entre a impedância no vácuo e a permissividade relativa no dielétrico,

$$Z = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

2.5.2 Coeficientes de reflexão e de transmissão

Ao considera-se meios com extensão infinita pode-se calcular o coeficiente de reflexão ρ_{12} baseado nas impedâncias intrínsecas dos meios,

$$\rho_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

Para a situação onde as ondas planas incidem normalmente num dielétrico com espessura (D), (Figura 4) tem-se,

Fonte: Severo, 2003.

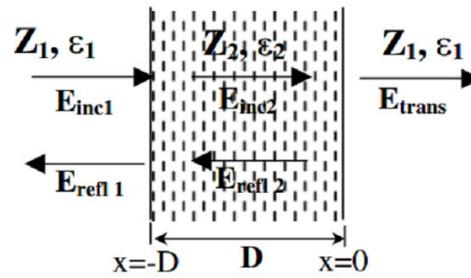


Figura 4 Lamina dielétrica de espessura finita.

Em $x = -D$ (Figura 4) calcula-se o coeficiente de reflexão ρ pela expressão,

$$\rho = \frac{\rho_{12}(1 - e^{-2jk_2D})}{1 - \rho_{12}^2(e^{-2jk_2D})} \quad (6)$$

Da maneira similar, calcula-se o coeficiente de transmissão τ , cuja expressão é dada por,

$$\tau = \frac{(1 - \rho_{12}^2)e^{-2jk_2D}}{1 - \rho_{12}^2(e^{-2jk_2D})} \quad (7)$$

Nas equações (6) e (7) o parâmetro k_2 é dado por,

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{mat}}} \quad (8)$$

e D é a espessura do material:

Onde λ_{mat} do material (λ_{mat}) é definido pela expressão,

$$\lambda_{\text{mat}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

Na expressão (9), o comprimento de onda (λ_0) é o comprimento de onda na frequência de 2,4 GHz, no vácuo, igual a 0,125 m. Para realizar uma análise das reflexões e transmissões das ondas eletromagnéticas incidindo normalmente num dielétrico, pode-se variar o parâmetro λ_{mat} .

2.5.3 Incidência perpendicular de campo eletromagnético em paredes de diferentes espessuras

Os coeficientes de reflexão e de transmissão quando uma onda plana incide normalmente em materiais como concreto, madeira e tijolo são mostrados na Figura 5 e Figura 6, variando o comprimento de onda do material desde $\frac{\lambda_{\text{mat}}}{4}$ até λ_{mat} para 2,4 GHz (VON HIPPEL, 1954). Os gráficos foram obtidos a partir das equações (6) e (7) com a espessura 'D' expressa em comprimentos de onda.

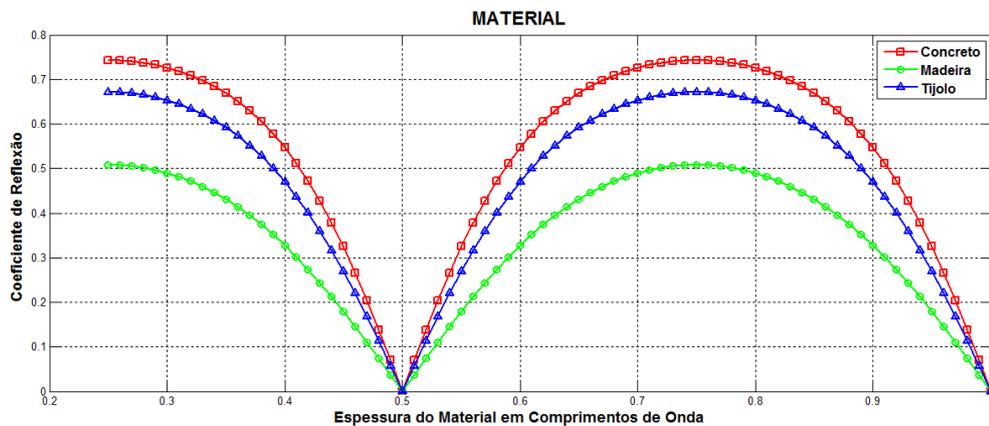


Figura 5 Coeficiente de reflexão para concreto, madeira e tijolo na frequência de 2,4 GHz para diferentes espessuras de parede.

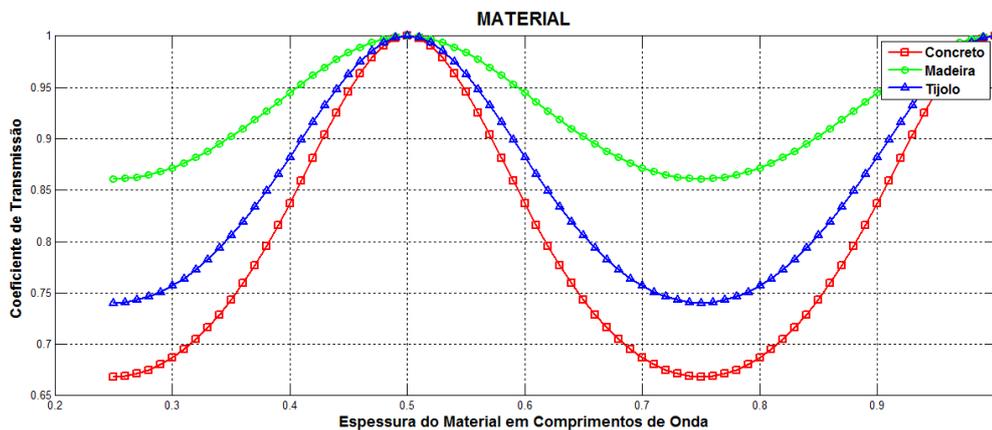


Figura 6 Coeficiente de transmissão para concreto, madeira e tijolo na frequência de 2,4 GHz para diferentes espessuras de parede.

Pode-se notar nos gráficos que a transmissão máxima de campo eletromagnético acontece quando a espessura da parede chega a valores entorno de $n * \frac{\lambda_{\text{mat}}}{2}$ onde n é um inteiro positivo. De outra forma a reflexão máxima ocorre quando a espessura da parede chega a valores em torno a $\frac{\lambda_{\text{mat}}}{4}$ e valores entorno a $n * \left(\frac{\lambda_{\text{mat}}}{2} + \frac{\lambda_{\text{mat}}}{4} \right)$, onde n é um inteiro positivo.

Os valores de condutividade equivalente e permissividade relativa dos materiais mencionados para 2,4 GHz estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 Valores de condutividade equivalente e permissividade relativa para 2,4 GHz dos materiais mencionados.

Material	Condutividade Equivalente (σ)	Permissividade Relativa (ϵ_r)
Madeira	0,06 S/m	3,07
Tijolo	0,028 S/m	5,1
Concreto	0,027 S/m	6,8

Fonte: Andreuccetti, 1995; Martínez - Búrdalo, 2009.

2.6 ANTENA DE BANDA LARGA PARA CARACTERIZAÇÃO DE PAREDES COM INCIDÊNCIA PERPENDICULAR DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Para analisar o comportamento de campos eletromagnéticos em ambientes confinados, consideram-se apenas os campos cuja incidência seja perpendicular. Para se montar uma situação experimental que comprovasse a correção dos modelos matemáticos e numéricos utilizados, optou-se por uma fonte de irradiação capaz de irradiar a mesma intensidade de campo no plano horizontal. Além disso, a fonte deve possuir um comportamento suave, com pouca variação da impedância de entrada, em toda sua faixa de frequência. Uma antena ou fonte capaz de atender tais especificações é a antena monocone (KAWAKAMI e SATO, 1987).

A antena monocone como mostrada na Figura 7, é um monopolo de estrutura física modificada e é considerada uma variação da antena bicônica. As modificações dos dipolos usualmente são feitas para obter operações numa largura de banda maior sem aumentar a complexidade da estrutura. As antenas bicônicas são conhecidas por sua grande largura de banda e diagrama omnidirecional em um plano. O plano de terra da antena monocone deve ser relativamente grande, com o propósito de simular um plano de terra infinito.

Por suas características de largura de banda, as antenas bicônicas têm sido implementadas nas faixas de frequência de VHF e UHF (BALANIS, 2010).

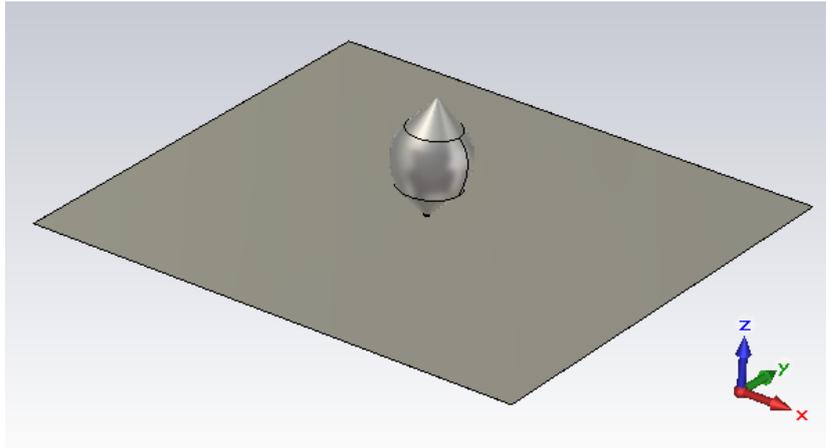


Figura 7 Vista perspectiva da antena monocone de banda larga.

2.6.1 Método de alimentação

Conforme (KAWAKAMI e SATO, 1987) a clássica antena monocone utiliza geralmente dois possíveis métodos de alimentação. O primeiro deles utiliza a um cabo coaxial através do cone. Para isto, o condutor exterior tem sua terminação na ponta do cone e é eletricamente conectado nessa parte, enquanto o cabo condutor central é conectado ao plano de terra. O segundo método utiliza o cabo coaxial através do plano de terra conectado diretamente à antena na base desta, e a malha do coaxial é conectado ao plano de terra. Nesse método de alimentação, a tampa encerra a parte superior do monocone e evita qualquer perturbação à alimentação da antena. Otimizações adicionais no espaço correspondente entre a antena e o plano de terra são sugeridos para lograr um bom casamento de impedância.

2.6.2 Mecanismo de operação

O princípio de operação é basicamente o mesmo daquele monopolo cônico ou da meia antena bicônica com plano de terra finito. Para a antena monocone o valor da impedância de entrada é igual à metade do valor da impedância da antena bicônica com as mesmas dimensões. As características de irradiação no semi espaço são as mesmas da antena bicônica se um plano de terra infinito é usado.

Em (STUTZMAN et. al., 1998), para frequências elevadas, o desempenho da antena bicônica é aproximado ao de uma antena bicônica de dimensões infinitas. A energia que sai do ponto de alimentação espalha-se por toda a superfície do cone e uma quantidade relativamente pequena de energia alcança a parte final do cone, onde as ondas eletromagnéticas que são refletidas podem alterar o desempenho da antena. As dimensões do

ponto de alimentação pode também causar alterações nas suas características de operação quando a antena estiver operando em altas frequências.

Em (VOLAKIS, 2007), em frequências baixas, a antena bicônica finita pode ser analisada como um dipolo modificado. O diagrama de irradiação do dipolo é formado pela superposição da irradiação direta do ponto de alimentação (campo incidente) e a forte difração onde o fio termina. A relação da magnitude e fase entre as ondas incidentes e difratadas determina o diagrama de irradiação e a impedância da antena. Modificando estrutura física do dipolo numa estrutura bicônica, são adicionados mais pontos de difração resultando numa operação de banda larga. Isto ocorre quando o ângulo de abertura fica (α) entre 60° e 120° . Na Figura 8 se pode observar a descrição física da antena monocone. A definição dos parâmetros físicos está descrita na Tabela 3.

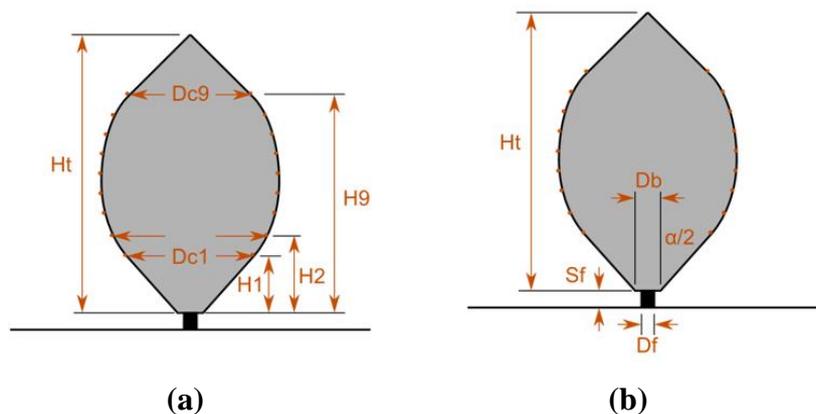


Figura 8 Dimensões físicas da antena monocone de banda larga: (a) vista lateral e (b) vista lateral com detalhe do pino de alimentação.

Tabela 3 Descrição parâmetros físicos da antena monocone banda larga.

Parâmetro	Descrição
Sf	Espaço entre o plano de terra e o cone
Df	Diâmetro do pino de alimentação
DB	Diâmetro da base do cone
Ht	Altura total do cone
Dc1	Diâmetro do cone 1
Dc2	Diâmetro do cone 2
Dc3	Diâmetro do cone 3
Dc4	Diâmetro do cone 4
Dc5	Diâmetro do cone 5
Dc6	Diâmetro do cone 6
Dc7	Diâmetro do cone 7
Dc8	Diâmetro do cone 8
Dc9	Diâmetro do cone 9
H1	Altura do cone 1
H2	Altura do cone 2
H3	Altura do cone 3
H4	Altura do cone 4
H5	Altura do cone 5
H6	Altura do cone 6
H7	Altura do cone 7
H8	Altura do cone 8
H9	Altura do cone 9
α	Angulo de abertura

Segundo (KAWAKAMI e SATO, 1987) a adição da tampa na parte superior da antena monocone tradicional pode fornecer uma largura de banda adicional. A junção entre a tampa e o cone pode causar uma descontinuidade na geometria do cone causando alterações na taxa de onda estacionária (TOE) já que a distribuição de corrente tem uma variação abrupta nessa junção. Para alcançar uma boa impedância ao longo da largura de banda, esta junção deve ser suave e precisa. Esta continuidade faz com que a onda viajante seja facilmente excitada e a impedância de entrada se mantenha uniforme ao longo de toda a banda.

2.6.3 Desempenho

A antena monocone tem ganho baixo, diagrama de radiação omnidirecional no plano normal a seu eixo e largura de banda extensa (McDONALD, 2008). Parâmetros como a impedância de entrada e o diagrama de radiação da antena dependem entre outros do ângulo de abertura do cone. Na Figura 9 pode-se observar os diagramas de irradiação para três frequências de operação da antena monocone.

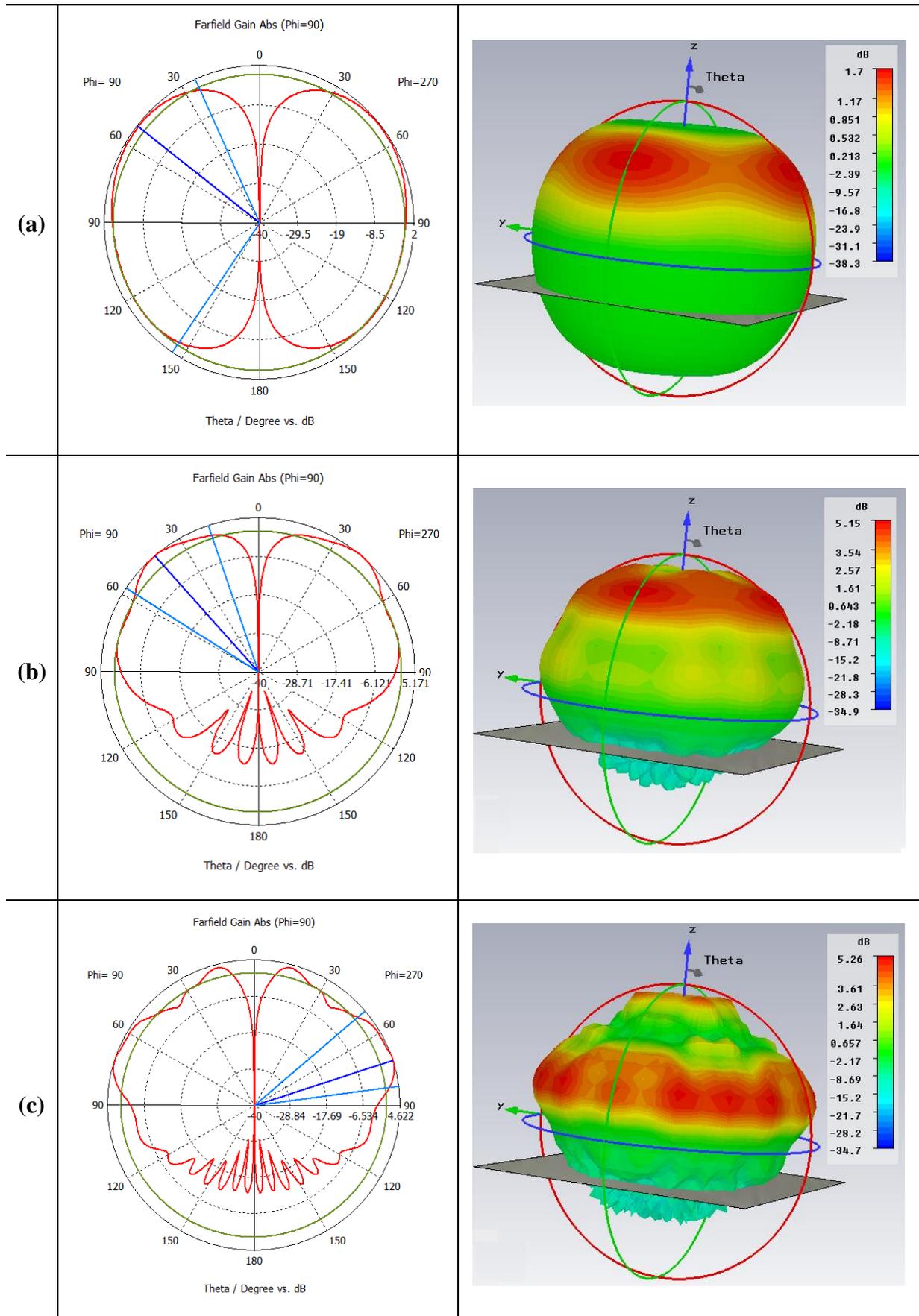


Figura 9 Diagramas de irradiação no plano vertical polar e 3D da antena monocone: (a) f_{min} (400 MHz), (b) $5f_{min}$ (2000 MHz) e (c) $10f_{min}$ (4000 MHz).

2.7 RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Todas as simulações neste trabalho foram realizadas utilizando computador equipado com processador Intel Core i5 3470 @ 3,4 GHz equipado com 32 GB de memória RAM, uma placa Nvidia Tesla C1060 e sistema operacional Windows 7 Professional x64, disponível no laboratório de comunicações (LACOM). Como aplicação de simulação para os cenários do modelo heterogêneo e a estimativa da SAR foi utilizado o SEMCAD X que utiliza o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Os cenários relacionados com a antena monocone foram simulados no CST Microwave Studio 2013. Algumas simulações foram realizadas utilizando o Cluster Sun Fire (Newton) do (CESUP, 2014) com um desempenho teórico de pico de 12.94 Tflops, 8 GPUs nVIDIA Tesla em 2 unidades S1070, 16 GB de RAM por servidor e um total de 188TB de capacidade de armazenamento.

3. DESCRIÇÃO CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS INTEIROS

Neste capítulo são descritos os elementos irradiadores utilizados, o modelo de computador implementado e as situações de exposição onde é avaliada a dosimetria nos modelos. Primeiramente, o modelo de 34 anos encontra-se com o microcomputador portátil localizado no colo e na sequência a sua elevação é variada em três posições com respeito ao colo, paralelamente ao torso. Na sequência, este modelo encontra-se com o computador em frente dele na altura do torso posicionado horizontalmente em três posições. Para o caso dos modelos das crianças, estas se encontram deitadas com o computador localizado tangencialmente no colo.

A utilização de diferentes antenas permite avaliar e comparar a dosimetria induzida por cada uma delas no modelo exposto. O objetivo é determinar o impacto de uma antena comercial como é o caso da PIFA e de um dipolo. Para a resolução da malha dos cenários, o erro numérico (dispersão) do FDTD depende da relação do comprimento de onda com o tamanho das células de sua malha. No corpo, o comprimento de onda diminui por causa da elevada permissividade dos tecidos. Além disso, se tem que considerar a sua geometria e a malha tem que reproduzir todos os detalhes importantes. Por isso se faz uma resolução mais fina no corpo, e fora do corpo as células podem crescer em tamanho para economizar recursos computacionais. Os valores de permissividade relativa e condutividade equivalente a ser atribuídos a cada tecido dos modelos simulados são obtidos de (GABRIEL, 1996). O método FDTD tem provado ser uma técnica robusta e flexível para a solução de vários tipos de problemas em eletromagnetismo, no entanto este método tem uma desvantagem em malhas não uniformes o que tem um impacto na classificação da precisão dos resultados (CHRIST, 2002). No Anexo B são explicados os conceitos mais relevantes do FDTD incluindo o erro de velocidade de fase, critérios de dispersão e estabilidade numérica, condições de borda absorvedora, entre outros.

3.1 ELEMENTOS IRRADIADORES UTILIZADOS

Para a avaliação da SAR local no modelo de corpo inteiro foram utilizados um dipolo de meia onda e uma antena tipo PIFA localizada no interior da carcaça que simula um microcomputador portátil. A seguir, são descritos os elementos irradiadores mencionados, descrevendo suas dimensões físicas e parâmetros como eficiência, coeficiente de reflexão (S11), largura de banda e taxa de onda estacionária (TOE).

3.1.1 Dipolo de meia onda

As dimensões deste elemento irradiador estão otimizadas levando em consideração que o comprimento de onda no material dielétrico é mais curto do que no ar (KANGAS, 2011). Os dipolos são estruturas padrão fáceis de projetar e a distribuição de energia no diagrama de radiação permite simular uma situação crítica de exposição. Esta antena foi simulada fazendo uma excitação harmônica estabelecendo como frequência central 2,45 GHz. O tempo de simulação foi de 30 períodos junto com uma fonte de alimentação com 50 Ω de impedância característica. O tamanho de cada célula foi de 6 mm para um total de 0,0074 milhões na malha proporcionando até 25 células por comprimento de onda para se obter uma boa exatidão na simulação. Foram definidas as condições de absorção de borda (ABC) com uma capacidade de absorção elevada do campo eletromagnético incidente. As dimensões físicas do dipolo e seus valores estão mostrados na Figura 10 e descritos na Tabela 4.

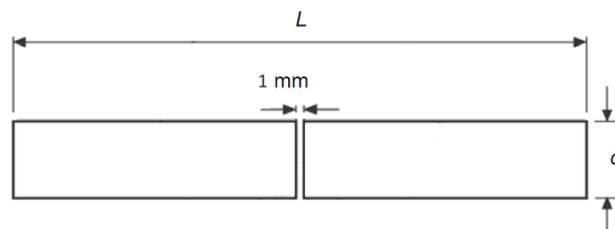


Figura 10 Dipolo de meia onda utilizado

Tabela 4 Dimensões físicas otimizadas do dipolo

Frequência (GHz)	L (mm)	d (mm)
2,45	51,5	3,6 mm

Fonte: Kangas, 2011.

Os resultados da simulação do dipolo forneceram uma largura de banda aproximada de 325 MHz em -10 dB, um coeficiente de reflexão (S11) de aproximadamente -15,5 dB, uma eficiência de 97%, uma TOE de aproximadamente 1,5 em 2,45 GHz e um ganho de 2,1 dBi.

3.1.2 Antena Impressa de Formato de F-invertido (PIFA)

Posteriormente o modelo de corpo inteiro é exposto num cenário onde se tem um microcomputador portátil com uma antena tipo PIFA projetada no software Antenna Magus e avaliada posteriormente no CST Microwave Studio. Foi estabelecida como frequência central 2,4 GHz com uma fonte de alimentação casada em aproximadamente 50 Ω de impedância característica. O número total de células da malha da simulação foi de 0,16 milhões proporcionando até 15 células por comprimento de onda. As bordas ABC foram

estabelecidas com absorção elevada do campo eletromagnético incidente. As dimensões físicas da PIFA e seus valores estão mostrados na Figura 11 e Tabela 5 respectivamente. Esta antena, fornece uma largura de banda de 284,5 MHz em -10 dB e um S11 de -24,5 dB em 2,4 GHz e de -20 dB em 2,45 GHz.

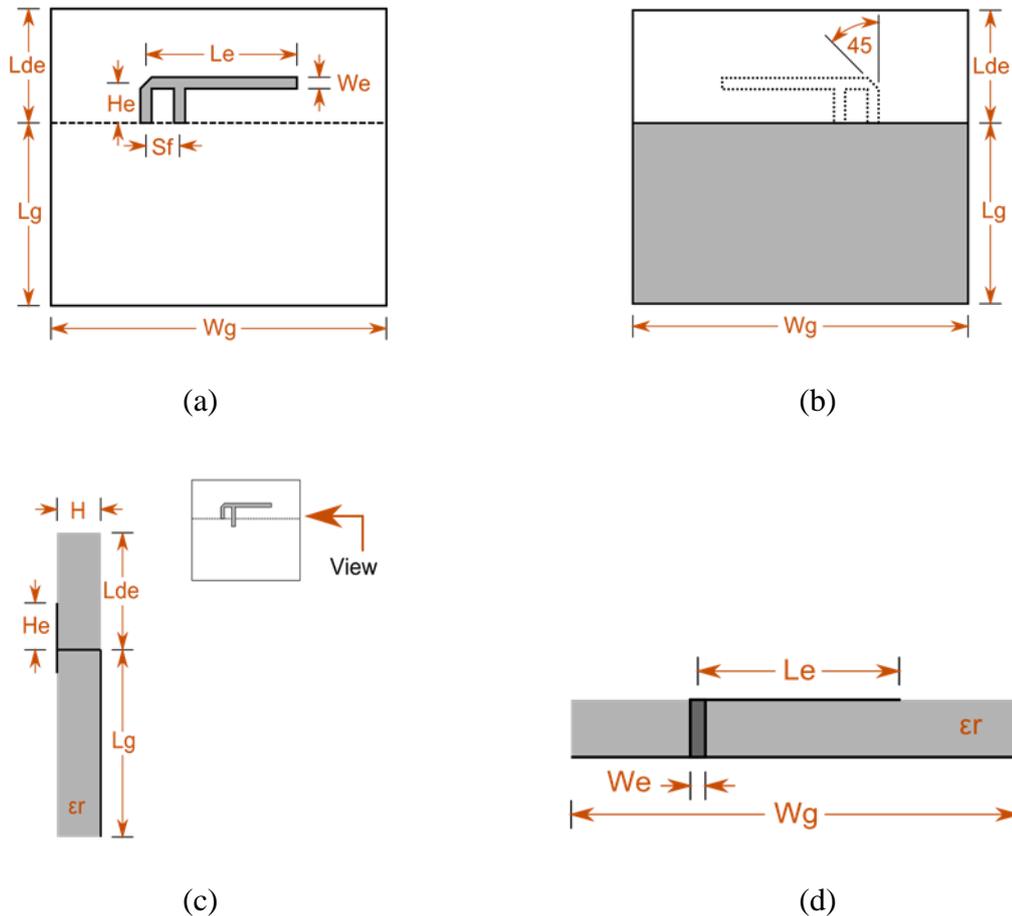


Figura 11 Dimensões da antena PIFA: (a) vista frontal superior, (b) vista frontal inferior, (c) vista lateral esquerda e (d) vista lateral esquerda detalhe.

Tabela 5 Valor em milímetros dos diversos parâmetros físicos da antena PIFA

Parâmetro	Descrição	Valor
L_e	Comprimento do elemento	24,55 mm
W_e	Largura do elemento	1,091 mm
H_e	Altura do elemento	4,473 mm
S_f	Espaçamento sonda alimentação e pino de aterramento	4,364 mm
W_g	Largura do plano de terra	52,56 mm
L_g	Comprimento do plano de terra com relação ao substrato	23,36 mm
L_{de}	Extensão do plano de terra	11,68 mm
H	Altura do substrato	1,73 mm
ϵ_r	Permissividade relativa	2,7

Da simulação, o ganho da PIFA ficou entorno aos 2,65 dBi e a eficiência de radiação foi de 99,6% em 2,4 GHz. Outros parâmetros desta antena são mostrados na Figura 12.

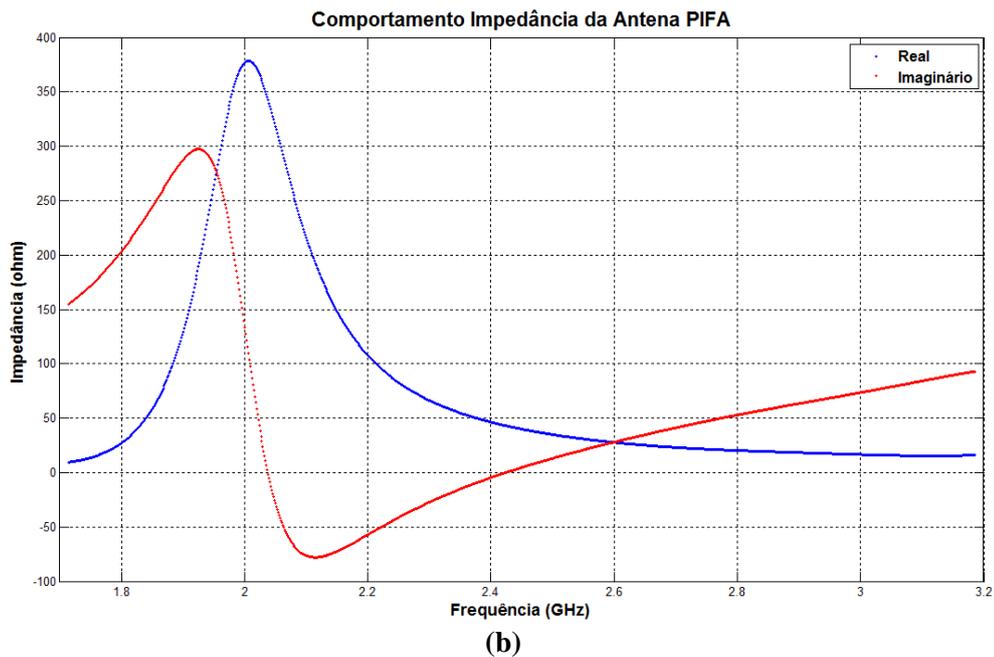
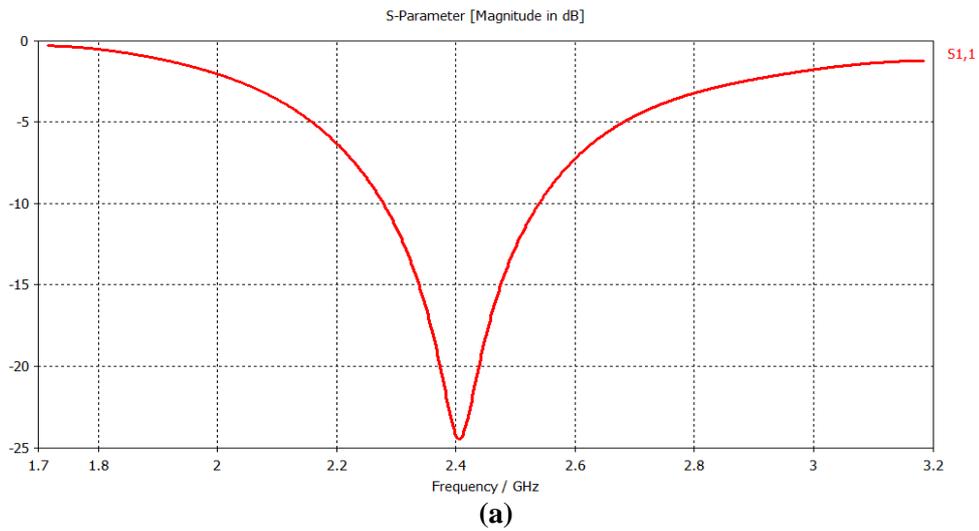


Figura 12 (a) coeficiente de reflexão S11 da antena PIFA e (b) comportamento da impedância da antena PIFA.

3.2 MODELO DO MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL

O modelo do microcomputador portátil utilizado nas simulações de corpo inteiro tem 35,9 cm de largura, 1,65 cm de altura e 24,68 cm de comprimento dimensões que correspondem a um microcomputador portátil comercial de 15,4 polegadas. A tela do computador é praticamente transparente aos campos eletromagnéticos na faixa de 2,45 GHz. A permissividade relativa da carcaça é de 2,3, e a condutividade equivalente é igual a 0,0001

S/m. (FINDLAY et. al., 2010). O modelo tridimensional de computador é apresentado na Figura 13.

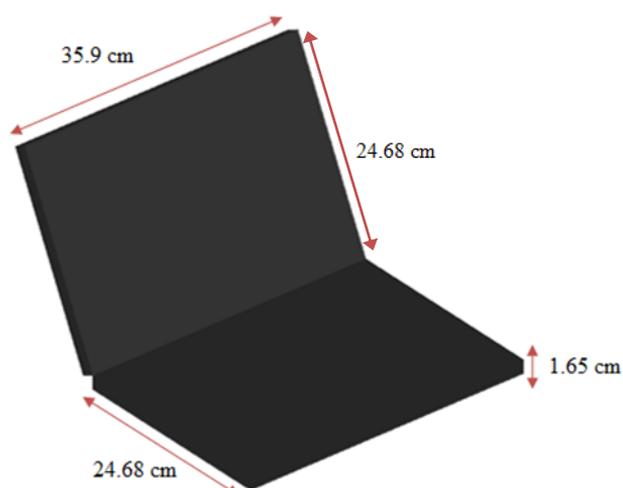
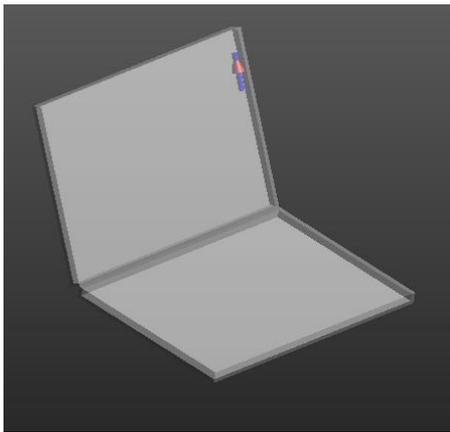
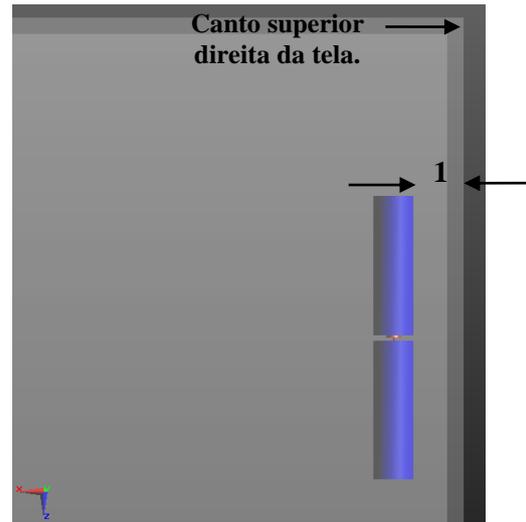


Figura 13 Dimensões do microcomputador portátil

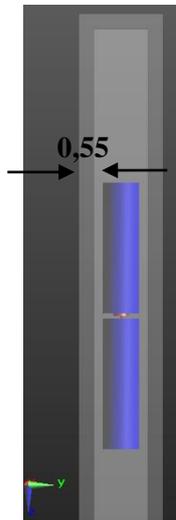
Foram simuladas duas posições e orientações de cada elemento irradiador no computador como descrito em (GUTERMAN et. al., 2007a; GUTERMAN et. al., 2007b; FINDLAY et. al., 2010). Na primeira cada elemento irradiador se localiza na parte posterior da tela. Numa segunda posição cada antena foi posicionada abaixo do teclado à direita do microcomputador portátil. Da Figura 14 à Figura 17 se podem observar detalhadamente as localizações de cada elemento irradiador conforme mencionado. Todas as distâncias são dadas em cm.



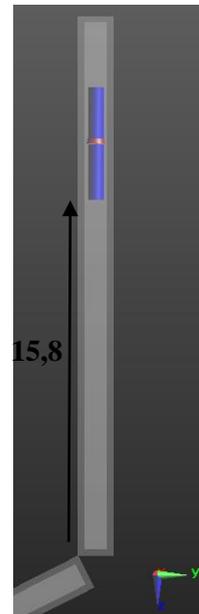
(a)



(b)

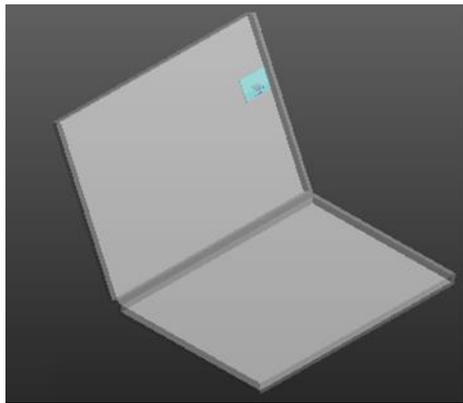


(c)

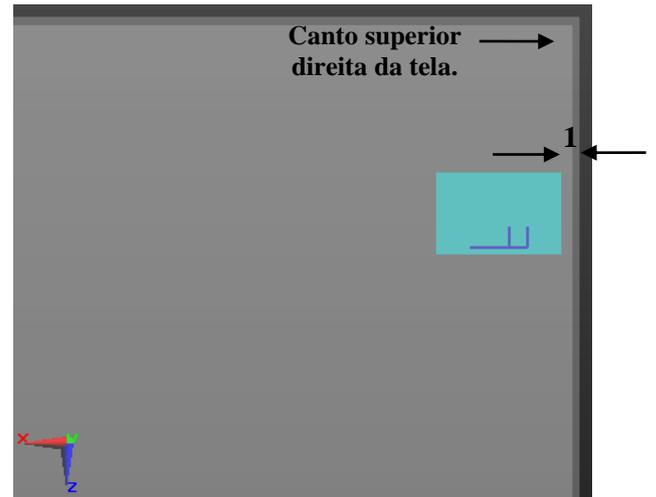


(d)

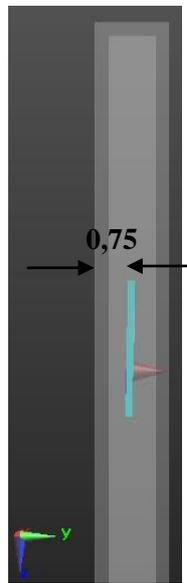
Figura 14 Localização do dipolo no canto superior direita na parte posterior da tela do microcomputador portátil: (a) vista perspectiva, (b) vista frontal, (c) detalhe vista lateral esquerda e (d) vista lateral esquerda.



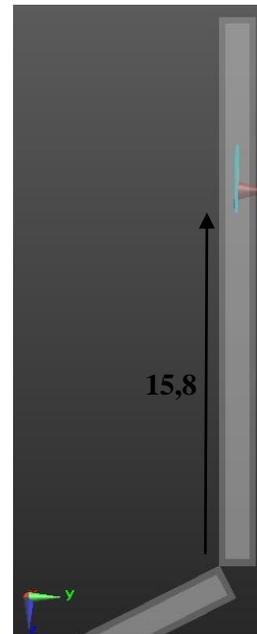
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15 Localização da PIFA no canto superior direito na parte posterior da tela do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista frontal, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.

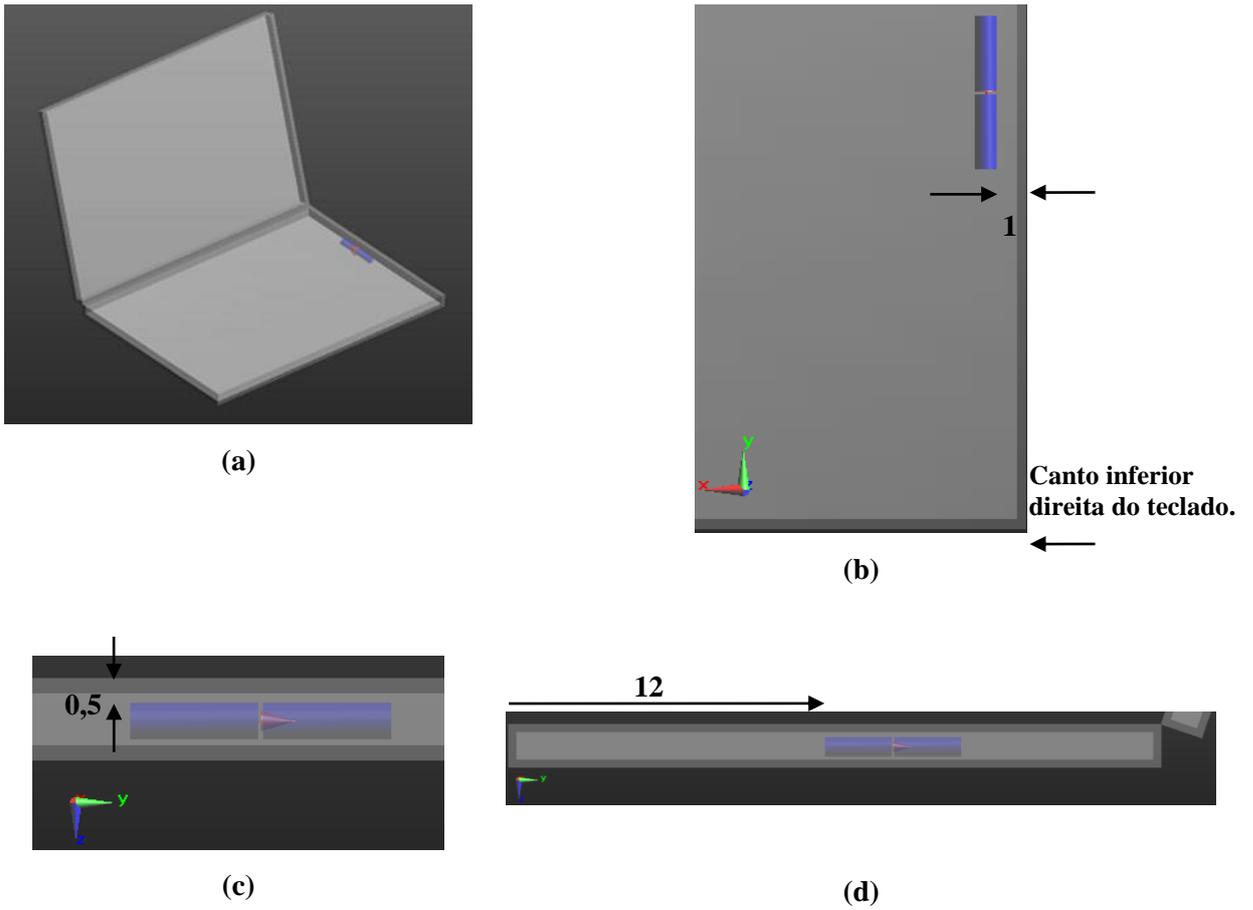


Figura 16 Localização do dipolo na parte posterior do teclado do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista superior, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.

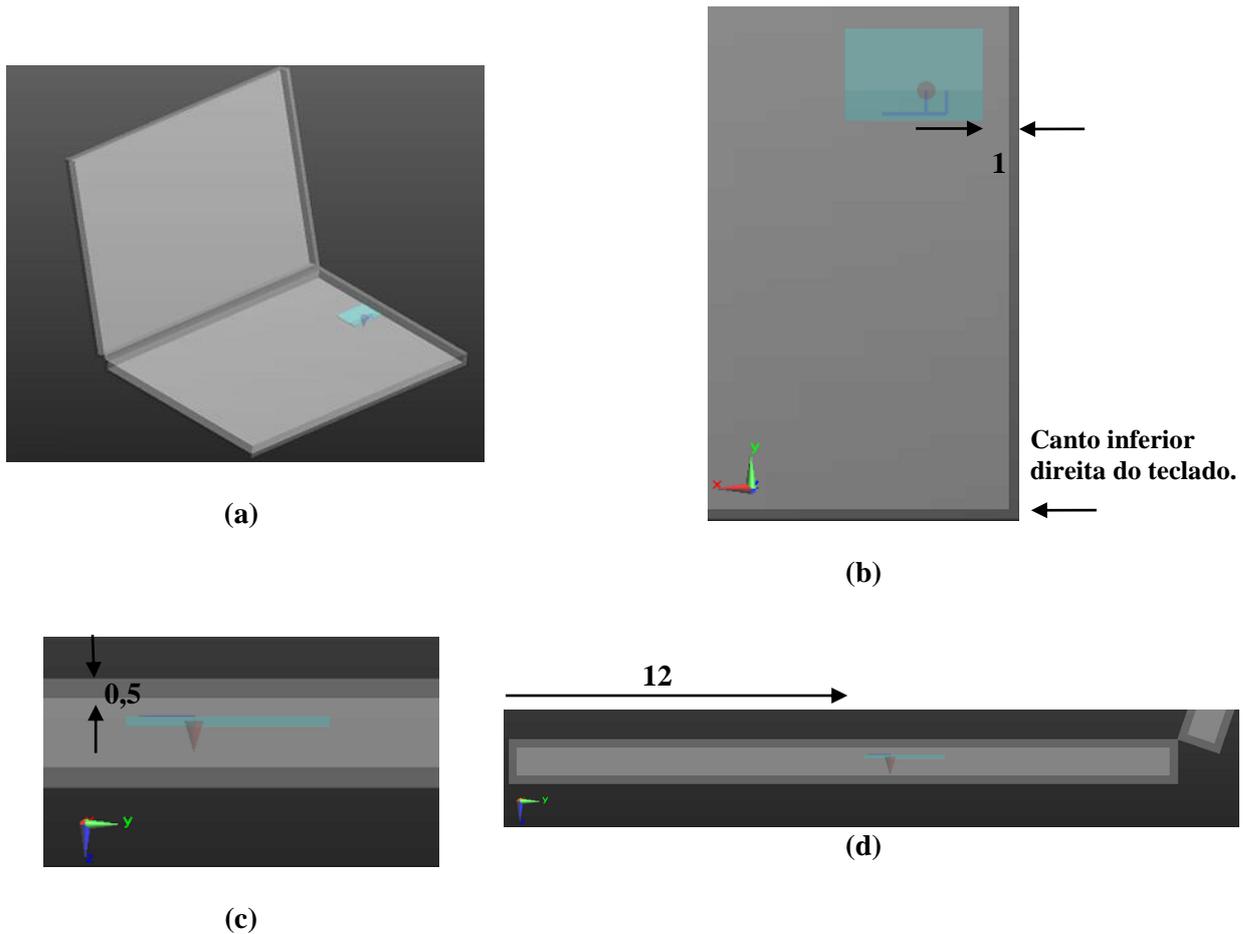


Figura 17 Localização da PIFA na parte posterior do teclado do microcomputador portátil: (a) vista em perspectiva, (b) vista superior, (c) detalhe vista lateral direita e (d) vista lateral direita.

3.3 DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO ANTENAS EM PRESENÇA DA CARÇAÇA DO COMPUTADOR

Conforme (LIU et. al., 2003) os requerimentos de uma antena de um microcomputador portátil são ter largura de banda que permita atender os requerimentos das diversas aplicações e serviços que operam na faixa de 2,4 GHz e ter um diagrama de irradiação omnidirecional ou quase omnidirecional que permita uma boa conectividade independente da orientação do terminal computacional. A polarização da antena usualmente não é considerada como um parâmetro crítico dado à situação de que os portáteis são primariamente usados em ambientes confinados onde as reflexões e espalhamento das ondas são intensos (GUTERMAN et. al., 2007c).

Na Figura 18 se mostram os diferentes diagramas de irradiação dos elementos irradiadores envolvidos na pesquisa quando localizados na parte interior da carcaça nas posições mencionadas no terminal computacional sem presença do usuário.

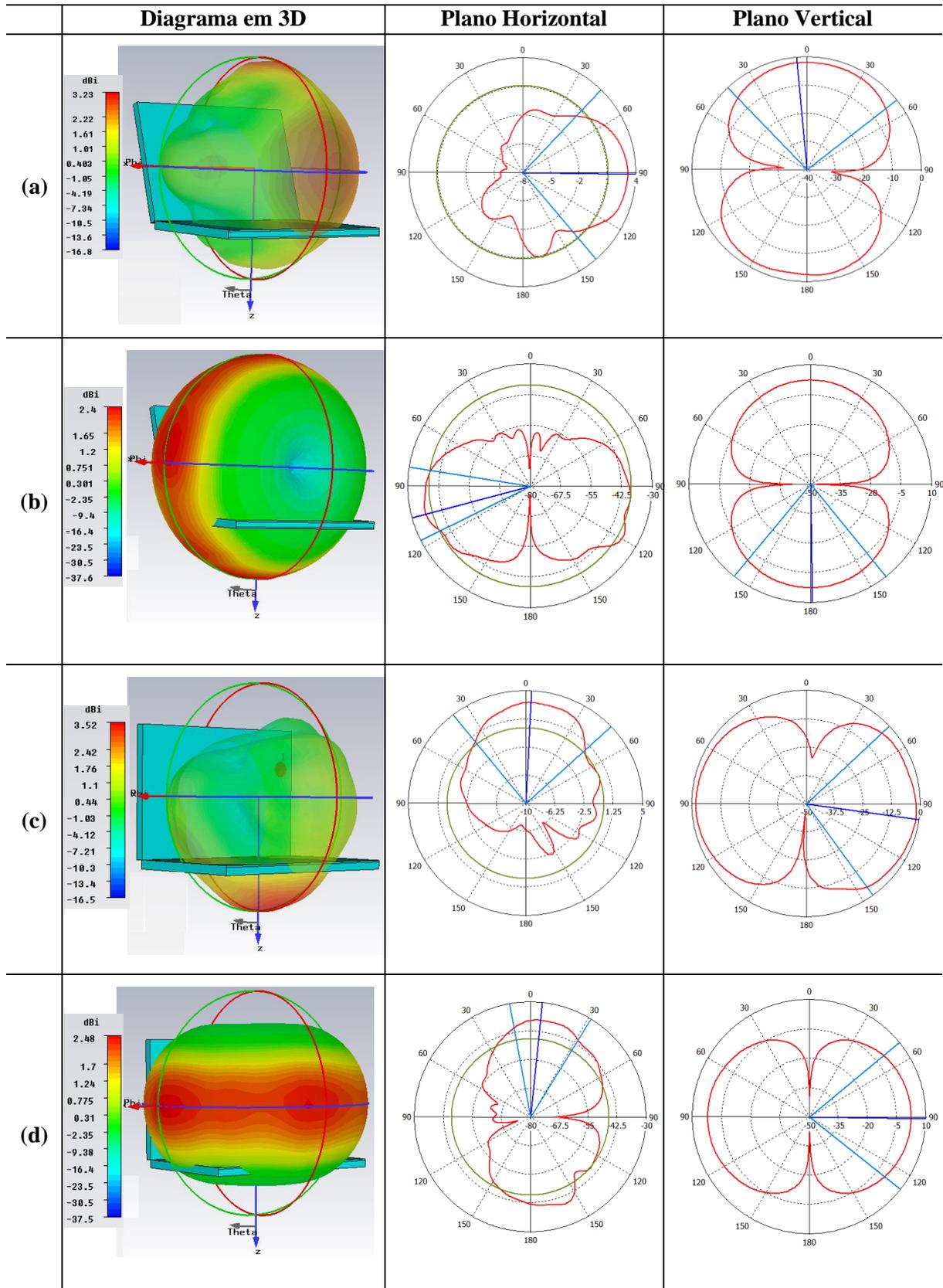


Figura 18 Diagramas de irradiação dos elementos irradiadores utilizados: (a) PIFA no teclado, (b) dipolo no teclado, (c) PIFA na tela e (d) dipolo na tela.

Devido ao valor da permissividade relativa da carcaça do computador, os diagramas de irradiação dos elementos irradiadores são levemente alterados. O ganho do dipolo

localizado na parte posterior do teclado e na tela ficou entorno de 2,4 dBi para cada caso. O ganho da PIFA para os mesmos casos ficou entorno de 3,37 dBi. A eficiência de irradiação dos elementos irradiadores para todas as localizações fica entorno de 0,97.

3.4 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA ELEVAÇÃO

Para este cenário mostrado na Figura 19 foi feita uma simulação de tipo harmônica com frequência central em 2,4 GHz. Nesta modelagem FDTD o tempo de simulação estabelecido foi de 30 períodos para atingir o estado estacionário da simulação. Adicionalmente na simulação é usado um sensor na fonte para obter os valores do coeficiente de reflexão e impedância do elemento irradiador. As condições de borda absorvedora (ABC) do cenário são estabelecidas em um nível de absorção elevado do campo eletromagnético incidente para evitar reflexões das ondas ao interior do cenário de simulação. A altura do computador foi variada em três posições respeito ao torso do modelo. Inicialmente o computador se localiza tangencial no colo, depois este é deslocado 10 e 20 cm verticalmente ao longo do eixo Z com relação à posição inicial. Esta variação na altura do computador com relação ao modelo permite avaliar a SAR em diferentes posições com respeito ao corpo. As distâncias entre os diferentes elementos do cenário são dadas em cm. A localização dos elementos irradiadores (dipolo e PIFA) no computador para cada situação de simulação está na parte posterior direita do teclado como mostrado na Figura 16 e Figura 17 respectivamente. Quando o computador portátil localiza-se no colo do modelo, a distância mínima entre o dipolo e o colo deste é de aproximadamente 0,7 cm. A distância mínima registrada entre a antena PIFA e o colo do modelo é de aproximadamente 0,6 cm.

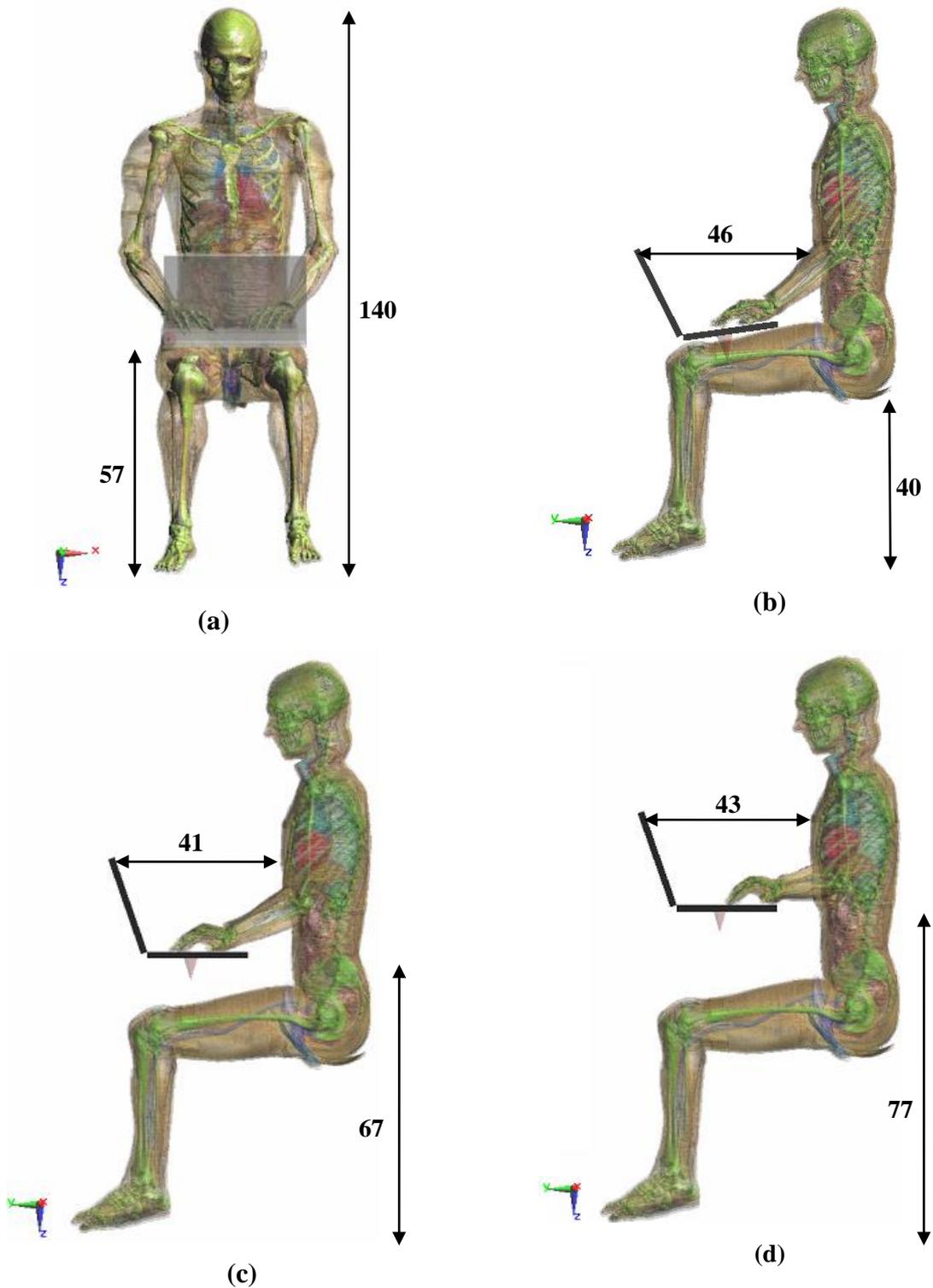


Figura 19 Duke sentado com microcomputador portátil: (a) vista frontal posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição inicial, (c) vista lateral esquerda posição intermediária e (d) vista lateral esquerda posição final.

Na configuração das propriedades locais o tamanho do passo no “background” do cenário foi estabelecido em 10 mm nas três direções axiais. O tamanho do passo máximo (“max step”) da malha correspondente à pele foi de 2 mm nos três eixos em modo “bounding

box” para otimizar a estrutura da malha mediante linhas base e reduzir o custo computacional. O tamanho total da malha foi de 142,91 milhões de células como mostrado na Figura 20.

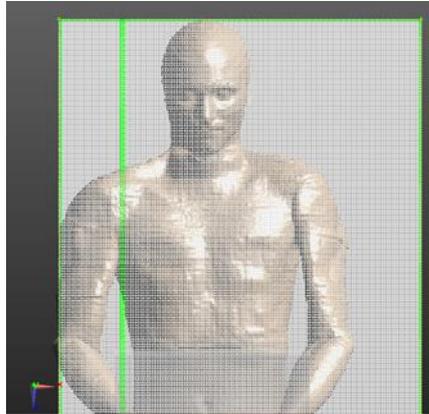


Figura 20 Exemplo da malha otimizada na pele do modelo.

3.5 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA POSIÇÃO HORIZONTAL

O terminal computacional foi inicialmente posicionado em frente do modelo à altura do torso para depois ser afastado em mais duas posições horizontalmente. A tela tem 90 graus de inclinação em relação à horizontal. Os elementos irradiadores (dipolo e PIFA) para este cenário foram localizados na parte posterior direita da tela do computador (ver Figura 14 e Figura 15). A descrição gráfica e as distâncias em cm entre os diferentes elementos do presente cenário estão mostradas na Figura 21.

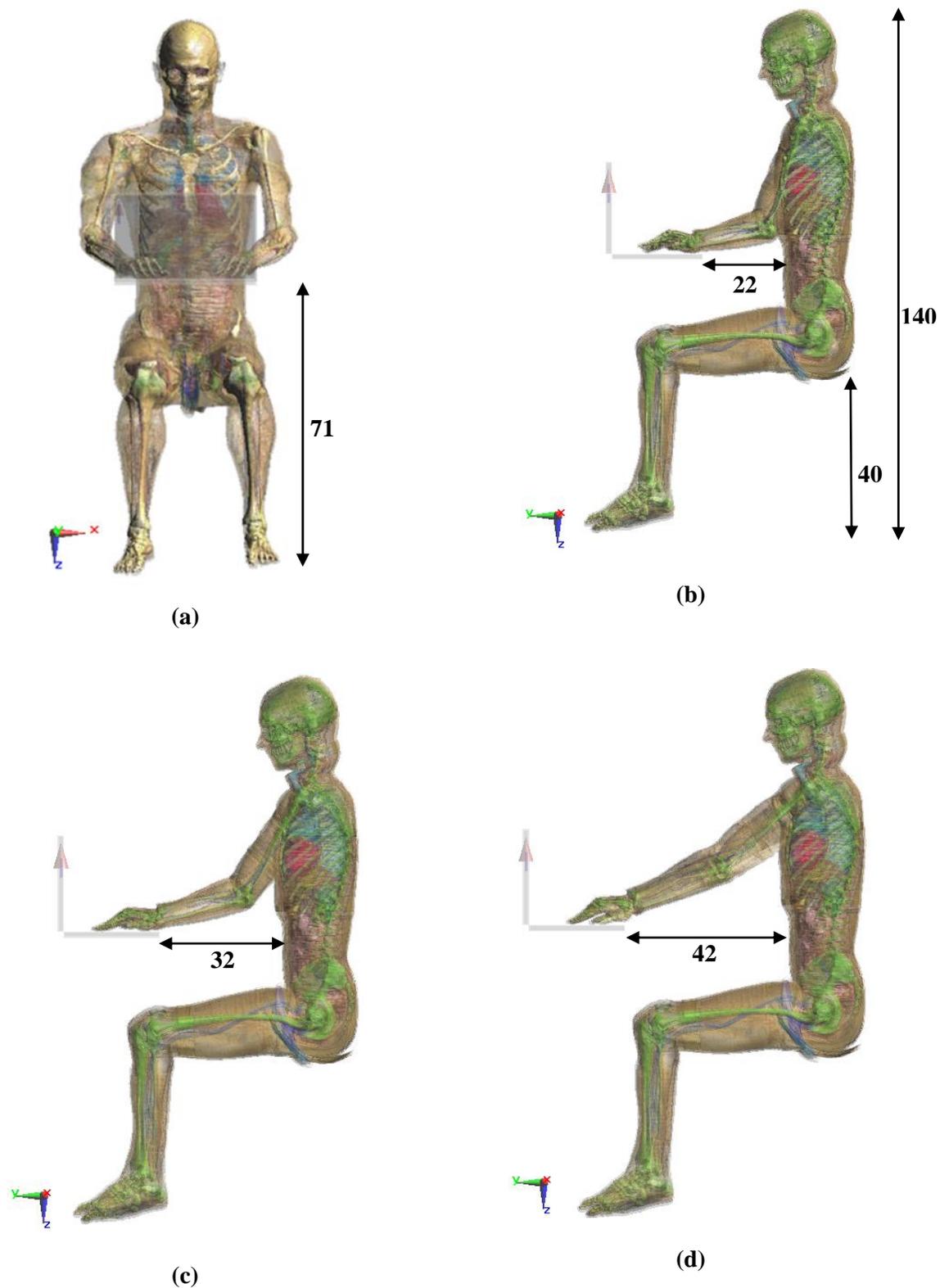


Figura 21 Duke sentado com microcomputador portátil em frente do torso: (a) vista frontal, (b) vista lateral esquerda posição inicial, (c) vista lateral esquerda posição intermediária e (d) vista lateral esquerda posição final.

O tipo de simulação para este cenário foi harmônica por ser só uma frequência de interesse com tempo de simulação de 30 períodos. De maneira similar como o cenário

anterior, às paredes absorvedoras do espaço tridimensional de simulação foram configuradas com uma capacidade de absorção elevada da onda incidente para evitar que as ondas eletromagnéticas voltem ao domínio computacional. Na Figura 22 estão mostradas as bordas absorvedoras do cenário com o modelo no interior. Também foi localizado um sensor de fonte para obter parâmetros como o coeficiente de reflexão (S11) e impedância na banda.

A dimensão máxima do passo na malha foi de 10 mm para cada célula do plano (background) em cada um dos três eixos axiais. Com relação ao tecido da pele do modelo o tamanho do passo foi estabelecido em 2 mm no modo “bounding box” para um total de 144,9 milhões de células aproximadamente na malha do cenário.

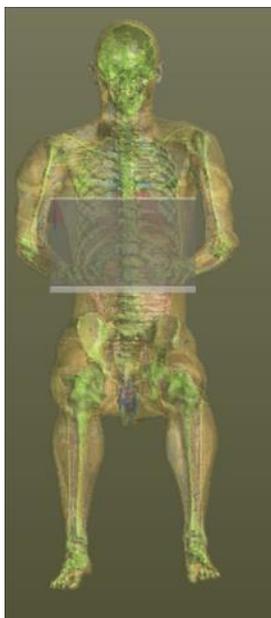


Figura 22 Ilustração bordas absorvedoras do cenário.

3.6 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO MODELO 11 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO

Uma posição típica de exposição é aquela onde o microcomputador portátil é localizado tangencialmente no colo. Para simular esta situação foram escolhidos dois modelos de crianças, a primeira de 11 anos chamada Billie e a segunda de 6 anos chamado Thelonious (cujo cenário será descrito na sequência) os quais se encontram deitados com o terminal computacional localizado tangencialmente no colo, como mostrado e descrito na Figura 23. A distância do terminal computacional com respeito a cabeça é dada em cm. Esta situação foi simulada com os elementos irradiadores localizados na parte posterior direita do teclado do

portátil. Para este cenário, o espaço computacional foi limitado para diminuir o tamanho da malha para excluir partes do corpo que não são expostas e consequentemente reduzir o tempo de simulação (ver Figura 24). A resolução da malha foi deixada para escolha automática pelo SEMCAD X mediante o “interactive grid generator”. O SEMCAD X ajusta a malha levando em conta os parâmetros geométricos (mínima e máxima dimensão) da estrutura e a frequência da fonte. Parâmetros do cenário como tempo de simulação, nível de absorção das ABC, tipo de excitação e sensores são os mesmos que os cenários mencionados anteriormente. O número total de células do cenário utilizando a PIFA foi de 91,2 milhões, e utilizando o dipolo de meia onda foi de 78,6 milhões. Quando o computador portátil localiza-se no colo do modelo, a distância mínima entre o dipolo e o colo deste é de aproximadamente 0,7 cm. A distância mínima registrada entre a antena PIFA e o colo do modelo é de aproximadamente 0,6 cm. Este modelo de corpo inteiro não é posar, consequentemente não pode-se deformar a posição anatômica modificando suas posturas.

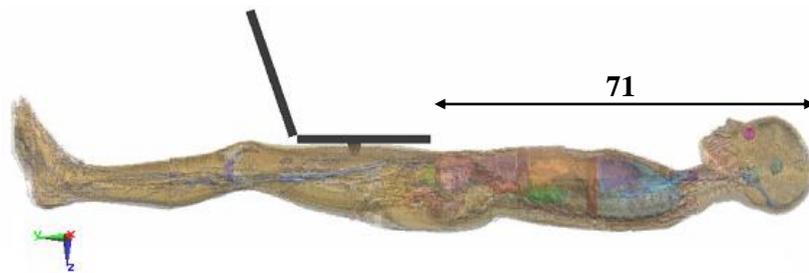


Figura 23 Billie deitada com microcomputador portátil tangencial ao colo (vista lateral direita).

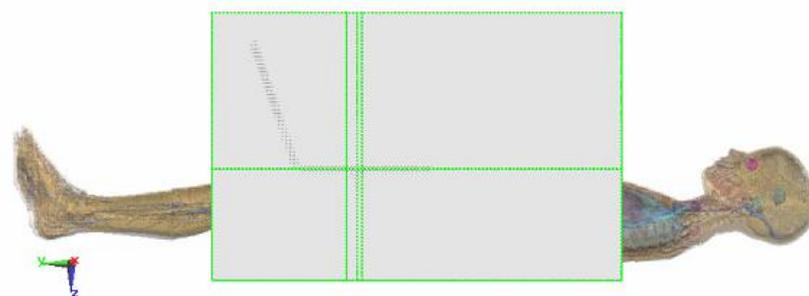


Figura 24 Malha truncada no cenário de simulação da Billie.

3.7 DESCRIÇÃO CENÁRIO MODELO 6 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO

Para o cenário mostrado na Figura 25 como no cenário prévio o modelo de 6 anos foi deitado e o portátil foi localizado tangencialmente no colo. Os elementos irradiadores (dipolo de meia onda e a antena PIFA) foram situados na parte posterior direita do teclado do terminal

computacional. Como mostrado na Figura 26, a malha do cenário foi truncada para reduzir o tempo de simulação e economizar recursos computacionais, também para excluir partes do modelo que não são expostas consideravelmente à radiação. Foram implementados as mesmas configurações dos parâmetros para o cenário como tempo de simulação, nível de absorção das bordas ABC, tipo de excitação e sensores como descrito nos cenários anteriores. A resolução da malha foi deixada para escolha automática do SEMCAD X fornecendo 67,5 milhões de células quando se usou a antena PIFA e de 57,3 milhões em presença do dipolo de meia onda. A distância do portátil com respeito à cabeça é dada em cm. Quando o computador portátil localiza-se no colo do modelo, a distância mínima entre o dipolo e o colo deste é de aproximadamente 0,9 cm. A distância mínima registrada entre a antena PIFA e o colo do modelo é de aproximadamente 0,8 cm. Como acontece como o modelo de corpo inteiro anterior, este modelo não é posar, por conseguinte não pode-se deformar a posição anatômica modificando suas posturas.

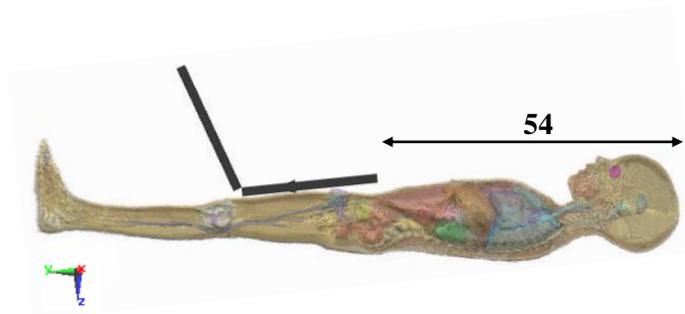


Figura 25 Thelonious deitado com microcomputador portátil tangencial ao colo (vista lateral direita).

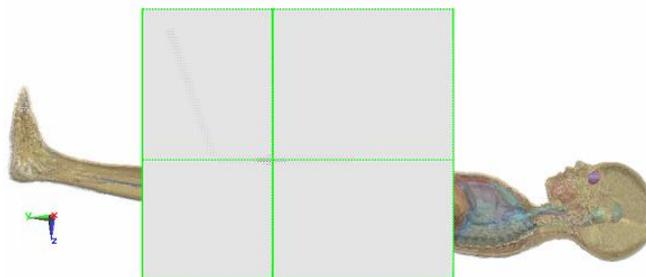


Figura 26 Malha truncada no cenário de simulação do Thelonious.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS: AVALIAÇÃO DA DOSIMETRIA

Neste capítulo são comparados os resultados obtidos nas simulações feitas com os diferentes modelos de corpo inteiro heterogêneo descritas no capítulo anterior. A SAR local atingida nas diferentes situações é comparada com os níveis de dosimetria permitidos pela (FCC, 1997) em cubos de 1 g e pelas (IEEE C95.1) e (ICNIRP, 1998) em cubos de 10 g.

O processo de extração dos valores da SAR local no SEMCAD X foi feito mediante a ferramenta SAR Statistics (with Spatial Peak SAR [IEEE]) em cubos de massa de 1 g e 10 g. Conforme (IEEE 802.11, 2012) a potência entregue aos elementos irradiadores foi normalizada em 100 mW.

4.1 AVALIAÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA ELEVAÇÃO.

Na Figura 27 e Figura 28 estão mostradas as distribuições da SAR no Duke Phantom com o microcomputador portátil variando sua posição vertical com respeito ao colo utilizando seja o dipolo ou a PIFA para cada cenário. Os valores atingidos quando o modelo está exposto ao dipolo de meia onda, foram maiores do que aqueles atingidos com a PIFA. Na Tabela 6 estão apresentados os valores máximos espacial da SAR em cubos de 1 g, 10 g e a SAR no corpo inteiro.

Tabela 6 Valores de psSAR no modelo variando a elevação do computador portátil respeito ao colo.

Antena e Posição	psSAR 1g (W/kg)	psSAR 10g (W/kg)
PIFA posição inicial	1,40	0,67
PIFA posição intermediária	0,56	0,36
PIFA posição final	1,01	0,55
Dipolo posição inicial	3,02	1,36
Dipolo posição intermediária	0,30	0,20
Dipolo posição final	0,31	0,20

Os níveis de psSAR descritos na Tabela 6 não ultrapassam o nível tolerado pela norma (IEEE C95.1; ICNIRP, 1998) em cubos de 10 g mas quando comparado com a (FCC, 1997) o psSAR obtido com dipolo na situação mais próxima ao colo referenciado a 1 g de tecido ultrapassa esta recomendação, porém quando o psSAR é referenciado à PIFA nesta mesma circunstância não supera o limite permitido pela norma mencionada.

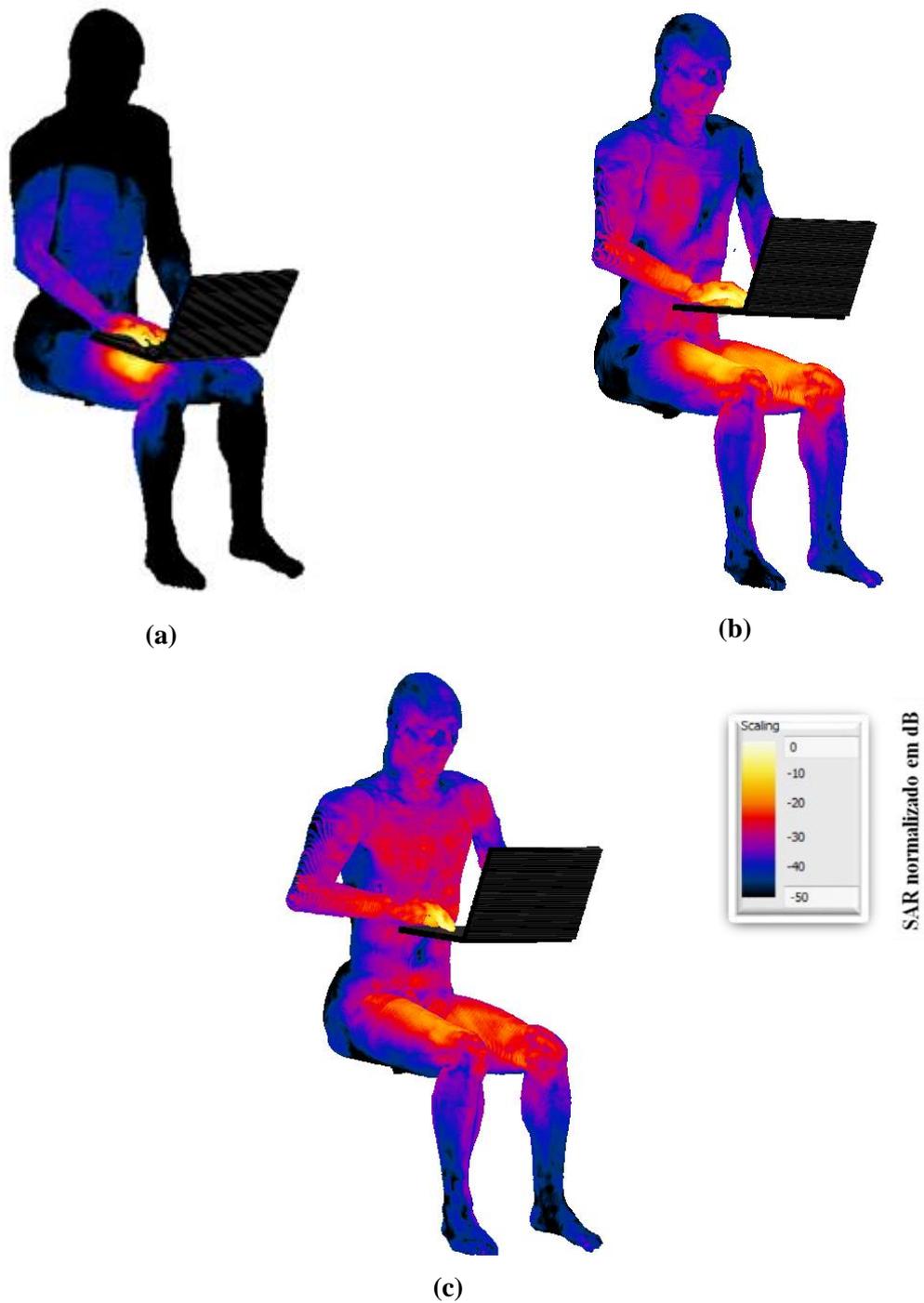


Figura 27 Distribuição da SAR no modelo com o dipolo abaixo do teclado: (a) vista perspectiva posição inicial tangencial no colo, (b) vista perspectiva posição intermediária localizado 10 cm acima do colo e (c) vista perspectiva posição final localizado 20 cm acima do colo.

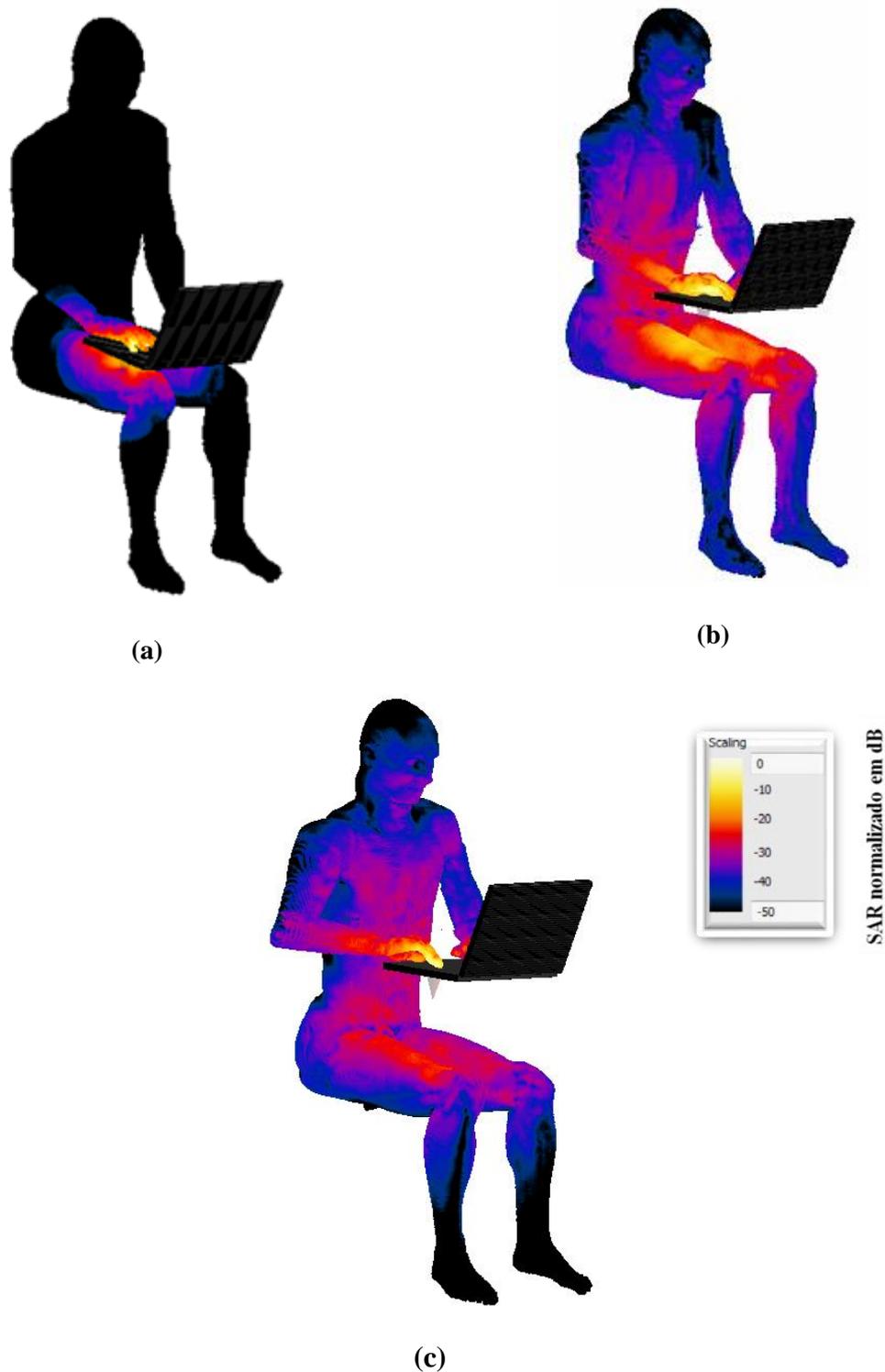


Figura 28 Distribuição da SAR no modelo com a PIFA abaixo do teclado: (a) vista perspectiva posição inicial tangencial no colo, (b) vista perspectiva posição intermediária localizado 10 cm acima do colo e (c) vista perspectiva posição final localizado 20 cm acima do colo.

A Figura 27 e Figura 28 mostram a distribuição de campo eletromagnético no modelo quando irradiado com o dipolo e a PIFA respectivamente localizados na parte posterior do teclado do terminal computacional. Como se pode esperar os órgãos mais

próximos como as mãos e o colo do modelo são atingidos com uma intensidade de campo maior.

4.2 AVALIAÇÃO DO CENÁRIO MODELO 34 ANOS COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL VARIANDO SUA POSIÇÃO HORIZONTAL

Na sequência foram analisados os níveis da SAR local obtidos no cenário do modelo Duke com o computador variando sua posição horizontal com respeito ao torso no qual os elementos irradiadores se localizam na parte posterior direita da tela. Na Figura 29 e Figura 30 estão mostradas as distribuições da SAR obtidas no modelo para cada um dos elementos irradiadores.

Na Tabela 7 estão descritos os valores máximos espacial da SAR em cubos de 1 g e de 10 g. Os níveis de psSAR obtidos não ultrapassam o nível tolerado pela norma (IEEE C95.1) e (ICNIRP, 1998) em cubos de 10 g e pela norma (FCC, 1997) quando referenciado a 1 g de tecido. Como o campo elétrico (e a densidade de potência associada) decresce substancialmente com o aumento da distância, então isto justifica a variação significativa da dosimetria neste cenário quando comparado com o cenário anterior.

Tabela 7 Valores de psSAR no modelo variando a distância horizontal do microcomputador portátil respeito ao torso utilizando o dipolo e a PIFA para cada caso.

Antena	psSAR 1g (W/kg)	psSAR 10g (W/kg)
PIFA posição inicial	0,030	0,017
PIFA posição intermediária	0,036	0,018
PIFA posição final	0,026	0,016
Dipolo posição inicial	0,018	0,010
Dipolo posição intermediária	0,017	0,008
Dipolo posição final	0,016	0,009

Os níveis de psSAR descritos na Tabela 7 em nenhuma das 6 situações ultrapassam o nível tolerado pela norma (IEEE C95.1; ICNIRP, 1998) em cubos de 10 g e (FCC, 1997) quando referenciado a cubos de 1 g. Observa-se que os resultados de psSAR tanto para 1 g como para 10 g da Tabela 7 estão substancialmente abaixo dos limites das recomendações internacionais. A principal razão disto é a distância maior em relação ao modelo.

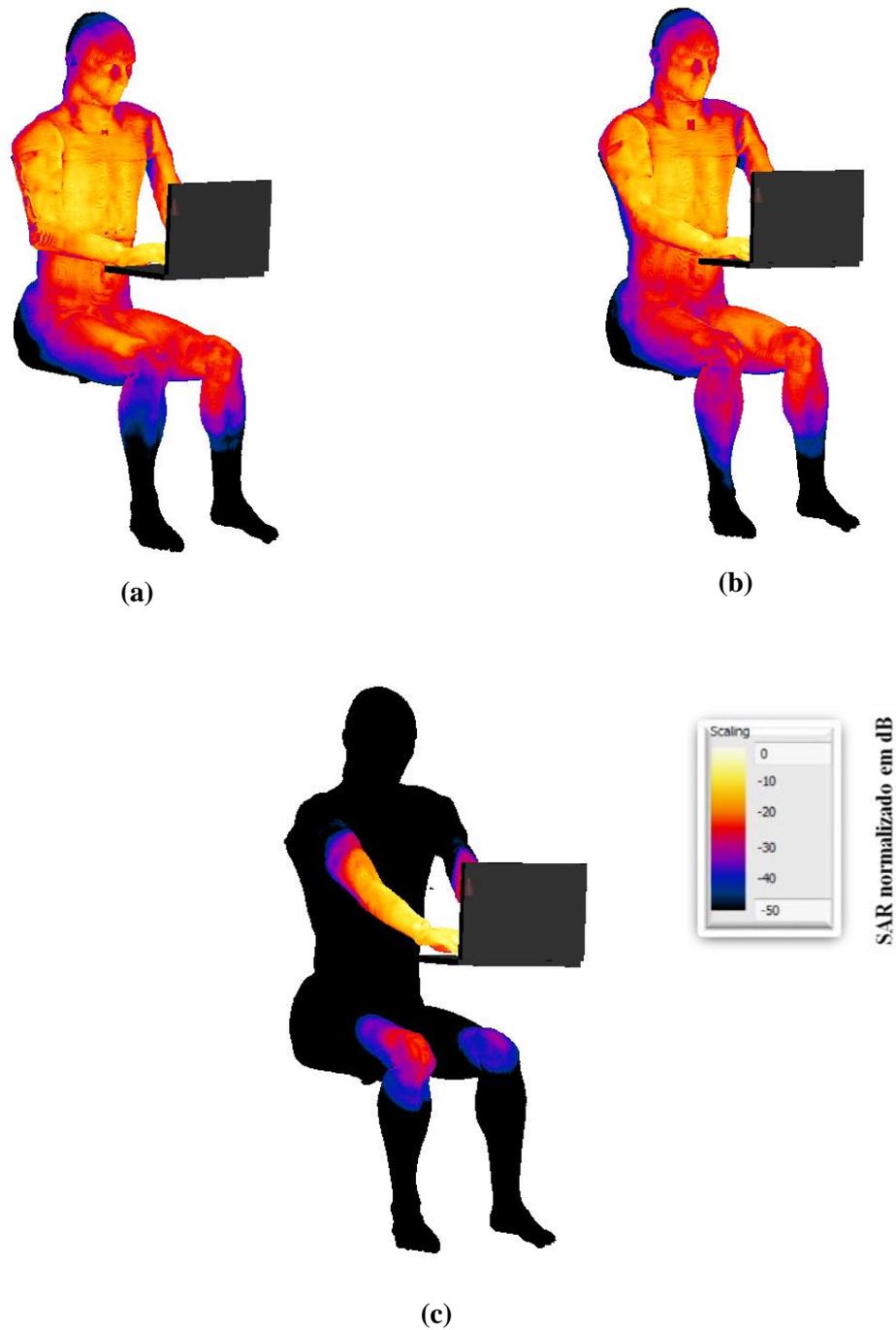


Figura 29 Distribuição da SAR no modelo com o dipolo na tela afastando se do torso: (a) vista em perspectiva inicial a 22 cm (b) vista em perspectiva intermediária a 32 cm e (c) vista em perspectiva final a 42 cm.



Figura 30 Distribuição da SAR no modelo com a PIFA na tela afastando se do torso: (a) vista em perspectiva inicial a 22 cm (b) vista em perspectiva intermediária a 32 cm e (c) vista em perspectiva final a 42 cm.

Deve-se observar que tanto as recomendações (IEEE C95.1), como (FCC,1997) e (ICNIRP,1998) consideram somente exposições de curto tempo de duração. Como estes computadores portáteis podem ser utilizados durante longos tempos próximos ao corpo, recomendações considerando isto deveriam existir e ser respeitadas, o que não ocorre atualmente. Estudos feitos avaliando a exposição do corpo em situações semelhantes às anteriormente reveladas (FINDLAY, 2010; GUTERMAN, 2007a) mostram que os valores de dosimetria atingidos nestes estudos não ultrapassaram a recomendação da (IEEE C95.1) como

(ICNIRP, 1998) utilizando elementos irradiadores como p. ex., dipolo de meia onda e PIFA situados no interior de um microcomputador portátil localizado em frente do modelo a uma distância de 35 cm em relação ao torso, isto é razoável desde que sabe-se que a SAR cresce com a aproximação ao corpo. Outros estudos feitos experimentalmente (SHABANI, 2008) onde é avaliada a intensidade de campo presente em ambientes Wi-Fi nas instalações físicas do campus da universidade para após fazer uma estimativa da SAR num manequim plano (“flat phantom”) resultam em níveis de exposição menores que aqueles sugeridos pela (ICNIRP, 1998) e a (IEEE C95.1).

4.3 AVALIAÇÃO CENÁRIO MODELO 6 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO

Na Tabela 8 são mostrados os valores de psSAR em 1 g e 10 g respectivamente obtidos no modelo de 6 anos deitado com o microcomputador portátil localizado tangencialmente no colo em duas situações: a primeira em presença da antena PIFA e a segunda em presença do dipolo de meia onda, os dois elementos irradiadores localizados na parte inferior direita do teclado.

Tabela 8 Valores de psSAR no Thelonious com o microcomputador portátil localizado tangencialmente no colo.

Antena	psSAR 1g (W/kg)	psSAR 10g (W/kg)
PIFA	0,81	0,46
Dipolo	0,75	0,42

Como se pode observar na Figura 31 o colo (parte superior dos quadríceps) e parte da mão direita do modelo são mais atingidos pela distribuição da SAR, já que estas partes do corpo estão mais próximas à localização do elemento irradiador do portátil. Regiões mais distantes como o antebraço, parte baixa do torso e parte inferior das pernas são atingidas em proporções menores.

Os valores de psSAR no Thelonious mostrados na Tabela 8 não ultrapassam os limites sugeridos pela (FCC,1997) para uma massa de 1 g e pela (IEEE C95.1) e (ICNIRP, 1998) para uma massa de 10 g.

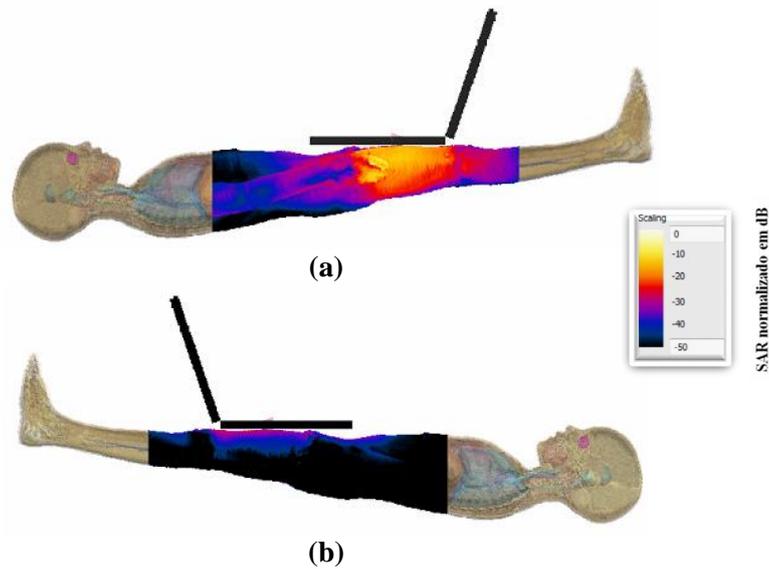


Figura 31 Distribuição da SAR no Thelonious com o dipolo no teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita.

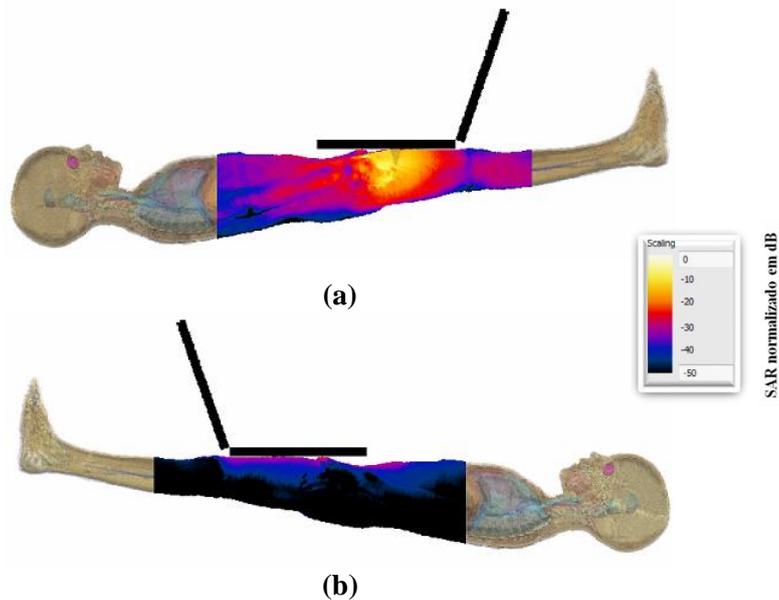


Figura 32 Distribuição da SAR no Thelonious com a PIFA localizada na parte posterior do teclado

4.4 AVALIAÇÃO CENÁRIO MODELO 11 ANOS DEITADO COM MICROCOMPUTADOR PORTÁTIL TANGENCIAL NO COLO

Os resultados da SAR local no modelo de 11 anos, estão descritos na Tabela 9 a seguir. Os valores atingidos para este cenário em nenhum caso ultrapassam os limites

permitidos pela (FCC, 1997) para 1 g de tecido e (IEEE C95.1) e (ICNIRP, 1998) para uma massa de 10 g.

Tabela 9 Valores de psSAR na Billie com o microcomputador portátil localizado tangencialmente no colo.

Antena	psSAR 1g (W/kg)	psSAR 10g (W/kg)
PIFA	0,50	0,34
Dipolo	0,37	0,25

Na Figura 33 e Figura 34 está mostrada a distribuição da SAR no modelo avaliado. Como se espera, os tecidos mais próximos aos elementos irradiadores como a mão direita, parte inferior do torso e parte superior das pernas são mais atingidos pelo campo gerado pelos elementos irradiadores. As extremidades superiores do modelo são pouco atingidas pela irradiação das antenas.

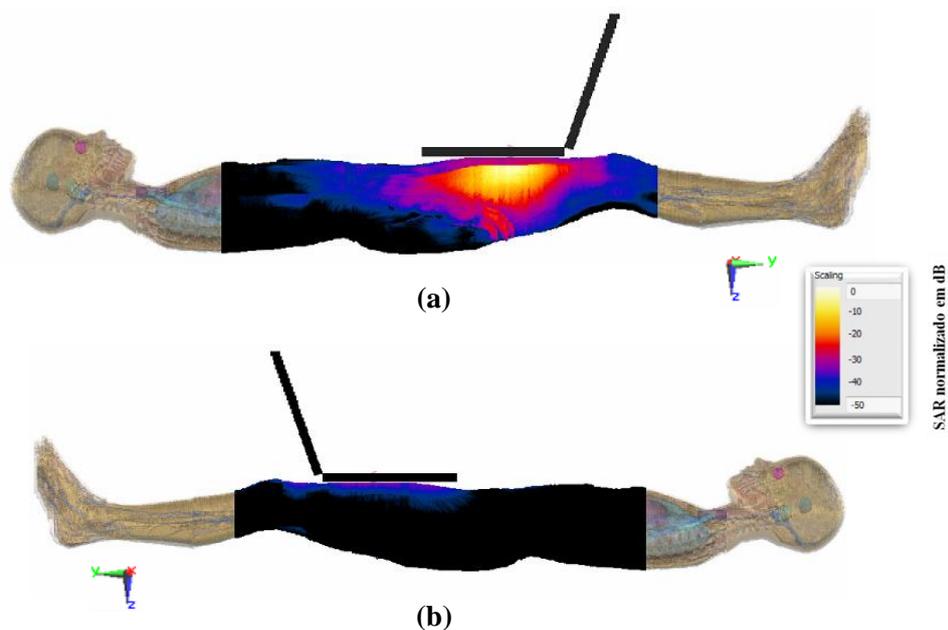


Figura 33 Distribuição da SAR na Billie com o dipolo localizado na parte posterior do teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita.

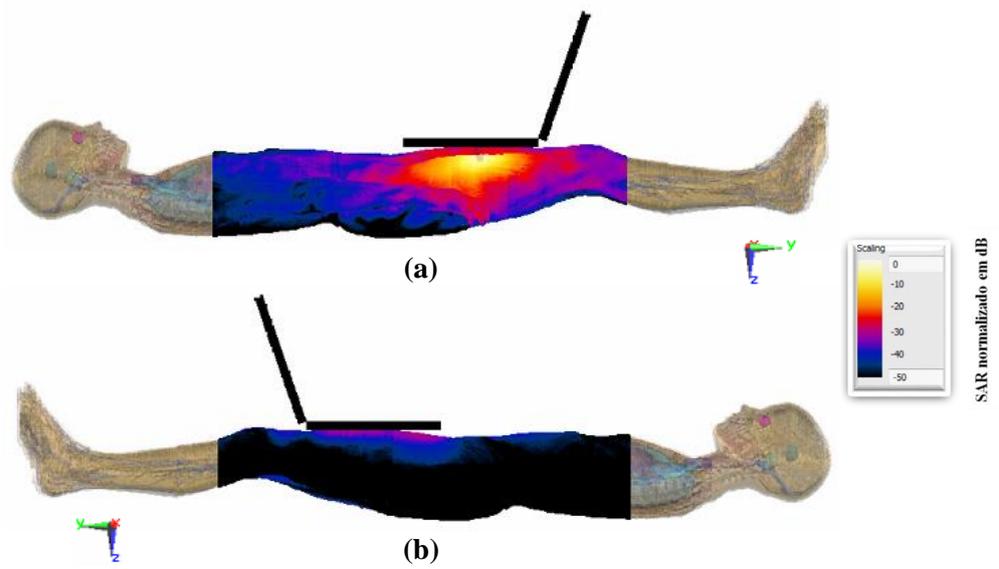


Figura 34 Distribuição da SAR na Billie com a PIFA localizada na parte posterior do teclado: (a) vista lateral esquerda e (b) vista lateral direita

5. SIMULAÇÕES E MEDIDAS ANTENA MONOCONE PARA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM AMBIENTES CONFINADOS

Neste capítulo serão mostrados os cenários de provas feitos para a medição da intensidade de campo eletromagnético gerado por dispositivos de uso pessoal comerciais gerados de sinal de Wi-Fi. Além disto, são mostrados os resultados obtidos nas diferentes simulações e medidas feitas com a antena monocone para analisar a propagação de ondas eletromagnéticas sem presença de parede, em presença de parede de tijolo de forma circular e de forma quadrada.

5.1 MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO COM DISPOSITIVOS PORTÁTEIS COMERCIAIS

No LACOM foi feita uma experiência com vários dispositivos portáteis comerciais com o objetivo de avaliar a intensidade de campo elétrico gerados por estes. Os dispositivos estudados foram um microcomputador portátil MacBook Pro de 17", um Ipad 2 e um Iphone 4s. Como medidor de campo foi utilizado o EMR-300 da Narda com ponteira de prova isotrópica tipo 18C 2244/90.23 que opera em frequências desde 100 KHz até 3 GHz. Na sequência são descritos os diferentes cenários analisados nesta experiência. Os diferentes resultados foram comparados com os limites permitidos pela lei 8896/02 de Porto Alegre para frequências superiores a 1700 MHz (6 V/m) e pela lei federal 11.934 de 05/05/2009 para frequências acima de 1700 MHz (60 V/m).

5.1.1 Avaliação do campo eletromagnético em presença do portátil

Primeiramente foram registrados os valores de campo utilizando o portátil da Apple modelo MacBook Pro de 17 polegadas. A placa Wi-Fi deste dispositivo localiza-se na parte inferior central da tela. A partir desta posição o medidor de campo foi afastado horizontalmente com respeito à placa Wi-Fi 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm registrando o valor de campo para cada posição. O medidor de campo representado pela esfera cor azul, sempre esteve a 10 cm e 20 cm com respeito ao teclado do portátil dependendo da situação de avaliação estudada. Na Figura 35 se podem observar as posições do medidor de campo localizado 10 cm com respeito ao teclado. A tela tem 110° de inclinação.

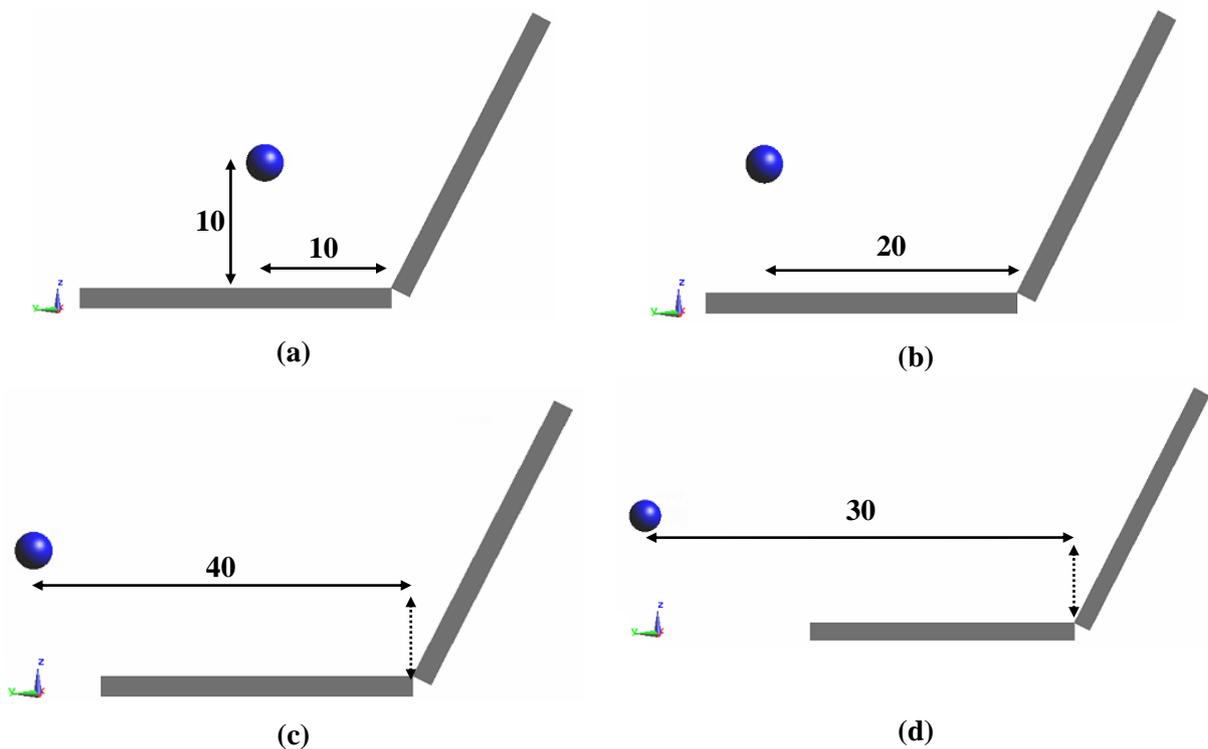


Figura 35 Ilustração dos valores obtidos da intensidade de campo elétrico no portátil com o medidor de campo localizado a 10 cm respeito ao teclado: (a) vista lateral esquerda posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição intermediária, (c) vista lateral esquerda posição intermediária medidor de campo a 30 cm da placa Wi-Fi e (d) vista lateral esquerda posição final.

Os valores da intensidade de campo registrados para cada posição mostrada na Figura 35 estão descritos na Tabela 10.

Posição do medidor de campo (cm)	Intensidade de Campo (V/m)
10	6,5
20	4,3
30	2,8
40	1,8

Tabela 10 Valores registrados no medidor de campo localizado a várias distancias da placa Wi-Fi do computador portátil.

O valor atingido pelo medidor de campo quando localizado a 10 cm da tela é o único que ultrapassa o limite estabelecido pela lei 8896/02 de Porto Alegre (6 V/m). Os demais valores registrados não ultrapassam aquele limite. Todos os valores da Tabela 10 não ultrapassam o limite permitido pela lei nacional 11.934 de 05/05/2009 (30 V/m).

Na Figura 36 se podem observar as posições do medidor de campo localizado 20 cm com respeito ao teclado. A tela do portátil tem 110° de inclinação.

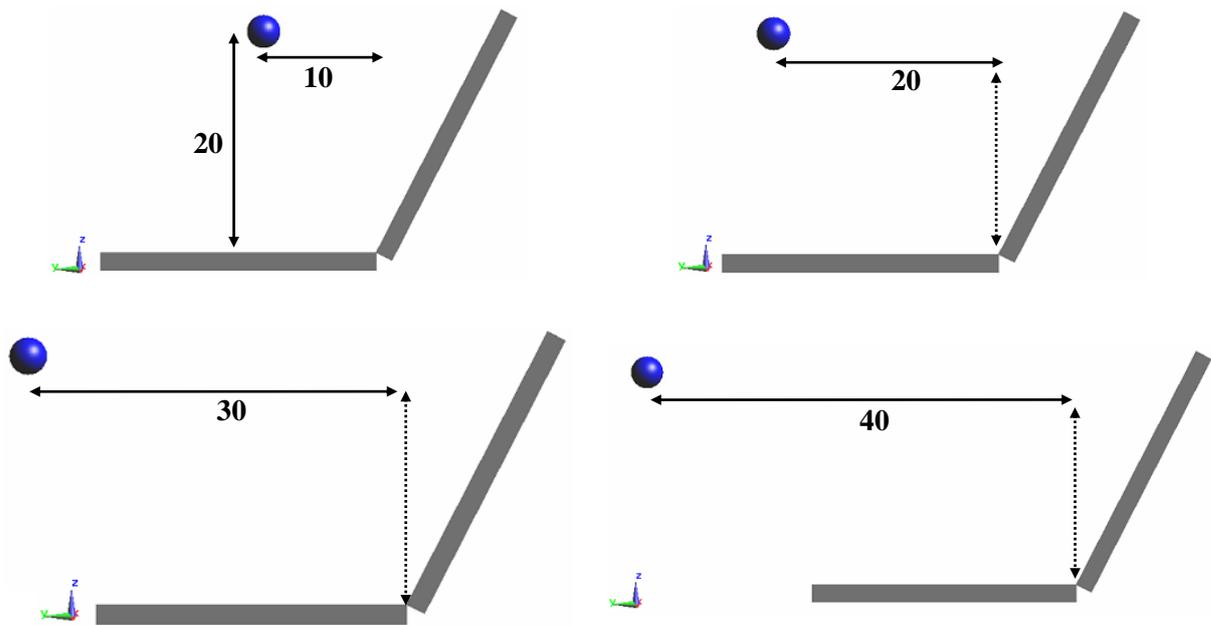


Figura 36 Ilustração dos valores obtidos da intensidade de campo elétrico no portátil com o medidor de campo localizado a 20 cm respeito ao teclado: (a) vista lateral esquerda posição inicial, (b) vista lateral esquerda posição intermediária, (c) vista lateral esquerda posição intermediária medidor de campo a 30 cm da placa Wi-Fi e (d) vista lateral esquerda posição final a 40 cm da placa Wi-Fi.

Os valores da intensidade de campo registrados para cada posição mostrada na Figura 36 estão descritos na Tabela 11.

Posição do medidor de campo (cm)	Intensidade de Campo (V/m)
10	4,4
20	2,9
30	2,3
40	2

Tabela 11 Valores registrados no medidor de campo localizado a várias distancias da placa Wi-Fi do computador portátil.

Conforme a Tabela 11, os valores registrados pelo medidor localizado 20 cm com respeito ao teclado do portátil de campo em todas as posições avaliadas não ultrapassam os limites recomendados pela lei 8896/02 de Porto Alegre e a lei nacional 11.934 de 05/05/2009.

5.1.2 Avaliação do campo eletromagnético em presença do telefone celular

Foi avaliado a intensidade do campo elétrico gerado por um telefone celular Apple Iphone 4s. O medidor de campo Narda EMR-300 localizou-se tangencialmente a tela do telefone. Os valores do campo foram obtidos em duas situações: primeiramente foi feita uma

ligação desde o aparelho celular e os registros do campo foram obtidos com o medidor de campo localizado tangencialmente na parte frontal do telefone. Na sequência foi feita uma ligação desde o aparelho celular e simultaneamente foi enviado um arquivo (“upload”) a internet. Os valores do campo elétrico foram registrados com o medidor localizado tangencialmente na parte frontal do telefone.

O valor máximo de campo registrado para a primeira situação no telefone ligando foi de 23 V/m ultrapassando claramente só o limite permitido pela lei de 8896/02 de Porto Alegre. Na segunda situação o valor máximo de campo elétrico registrado pelo medidor de campo foi de 33 V/m, ultrapassando os limites permitidos pelas leis 8896/2 de Porto Alegre (6 V/m) e 11.934 de 05/05/2009 (30 V/m). Os valores fornecidos pelo medidor de campo EMR-300 da Narda têm um erro intrínseco de $\pm 15\%$ para frequências entre 300 KHz e 1,2 GHz e para frequências entre 1,2 GHz e 3 GHz o erro de leitura é de $\pm 19\%$.

5.1.3 Avaliação do campo eletromagnético em presença do Tablet

A avaliação da intensidade do campo elétrico gerado pelo Ipad 2 foi feita localizando o medidor de campo tangencial na parte inferior esquerda da tela. A leitura foi registrada enviando um arquivo à internet desde o Ipad 2. O valor de campo elétrico máximo gerado pelo Ipad 2 foi de 13 V/m sobre passando claramente o limite permitido pela norma 8896/02 de Porto Alegre, mas fica abaixo da recomendação da norma nacional 11.934 de 05/05/2009.

5.2 MEDIÇÕES DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTES CONFINADOS POR PAREDES DE VÁRIAS GEOMETRIAS

Como mencionado o projeto da antena monocone foi realizado utilizando a ferramenta comercial Antenna Magus e as simulações dos cenários são feitas utilizando o CST Microwave Studio estabelecendo 400 MHz como frequência mínima de operação da antena e normalizando a potência entregue em 30 dBm. As medidas da etapa experimental foram realizadas com o analisador vetorial N9912A do Agilent Technologies que possui uma largura de banda desde 2 MHz até 6 GHz. O comprimento e largura do plano de terra da antena monocone é de 50 cm. A potência entregue a antena para a etapa experimental foi -10 dBm. A permissividade relativa do tijolo foi estimada em 3,66 a partir da resposta em frequência na incidência perpendicular do campo gerado pela antena. Essa estimativa foi feita a partir da espessura média da parede de 27 mm e da frequência de 2700 MHz, onde o tijolo mostrou-se transparente. Este processo para o cálculo da permissividade relativa do tijolo vai

ser explicado na sequência. Como meio de alimentação, foi utilizado o cabo coaxial conectado à base da antena monocone com malha ligada ao plano de terra. Na Tabela 12 estão mostradas as dimensões da antena monocone utilizada nos experimentos.

Sabemos que o comprimento de onda dentro do material é dado pela expressão (9):

$$\lambda_{\text{mat}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

Como mostrado na Figura 47 a frequência onde a parede é transparente é $f = 2,7$ GHz e como:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = 11,11 \text{ cm (no ar)} \quad (10)$$

A parede empregada possui uma espessura de $\lambda_{\text{mat}} = 2,9$ cm, como na transparência esse é o valor da metade do comprimento de onda λ_{mat} , temos que:

$$\lambda_{\text{mat}} = 2 * 2,9 \text{ cm} \quad (11)$$

Substituindo em (9), temos que:

$$\epsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{2 * \lambda_{\text{mat}}} \right)^2$$

$$\epsilon_r = 3,66$$

Este deve então ser o valor da constante dielétrica relativa do material utilizado.

Parâmetro	Descrição	Valor (mm)
Sf	Espaço entre o plano de terra e o cone	1,874
Df	Diâmetro do pino de alimentação	0,82
DB	Diâmetro da base do cone	7,5
Ht	Altura total do cone	175
Dc1	Diâmetro do cone 1	93
Dc2	Diâmetro do cone 2	102
Dc3	Diâmetro do cone 3	108
Dc4	Diâmetro do cone 4	111,4
Dc5	Diâmetro do cone 5	112,5
Dc6	Diâmetro do cone 6	110,7
Dc7	Diâmetro do cone 7	105,2
Dc8	Diâmetro do cone 8	95,38
Dc9	Diâmetro do cone 9	79,55
H1	Altura do cone 1	42,76
H2	Altura do cone 2	53,95
H3	Altura do cone 3	63,13
H4	Altura do cone 4	76,32
H5	Altura do cone 5	87,5
H6	Altura do cone 6	97,44
H7	Altura do cone 7	107,4
H8	Altura do cone 8	117,3
H9	Altura do cone 9	127,3
α	Angulo de abertura	90°

Tabela 12 Dimensões da antena monocone

5.2.1 Antena monocone sem presença de parede

A antena monocone inicialmente foi analisada num local isolado de fontes de interferência não controladas e mais livre de obstáculos físicos que pudessem alterar os resultados. A obtenção experimental da taxa de onda estacionária (TOE) foi realizada mediante configuração mostrada na Figura 37. As indicações da TOE da antena, simulada e medida, são mostradas na Figura 38.

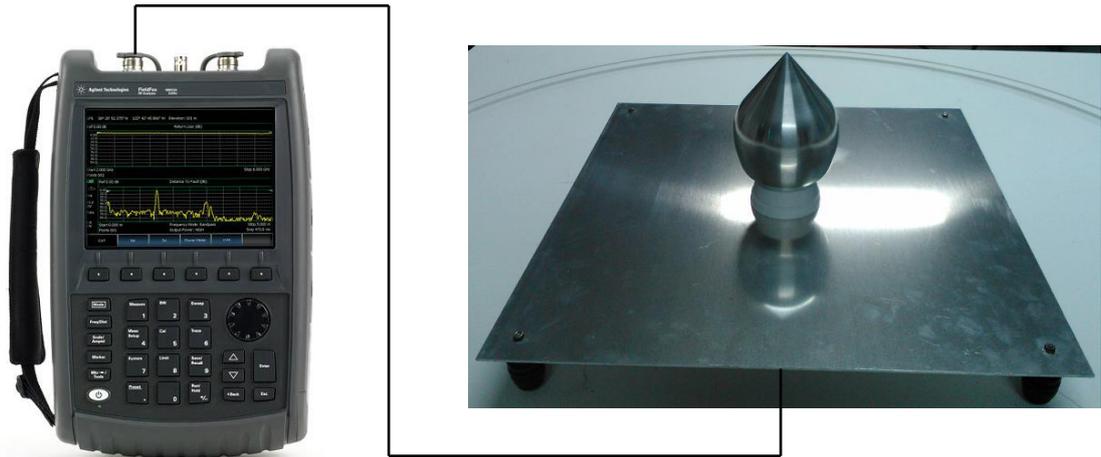


Figura 37 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone sem presença da parede.

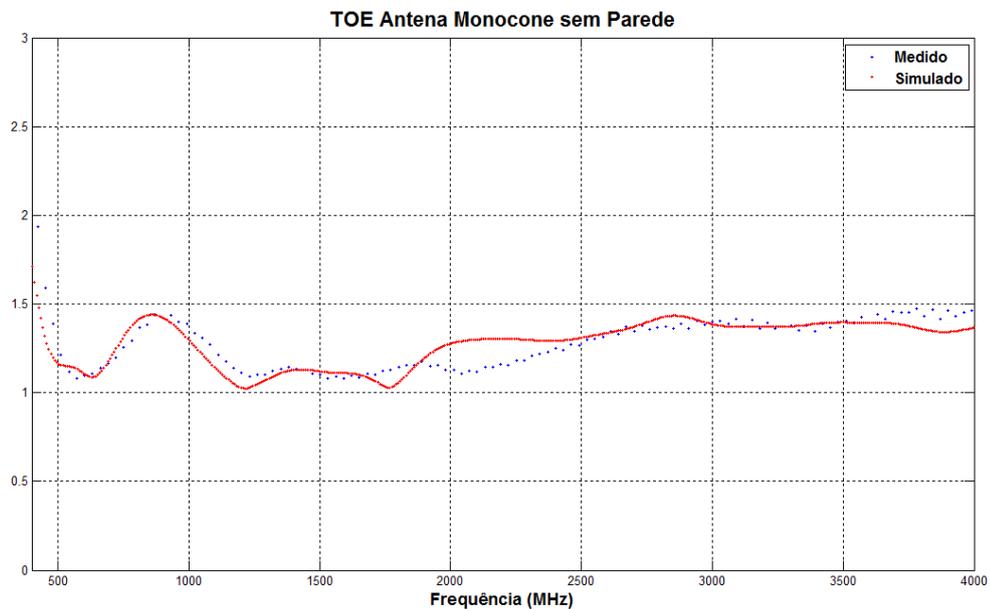
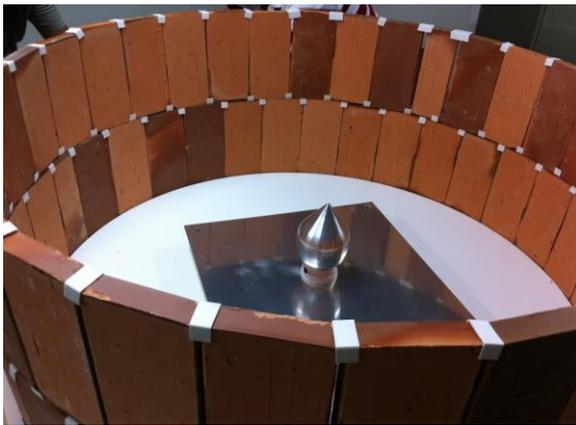


Figura 38 TOE da antena monocone simulada e medida.

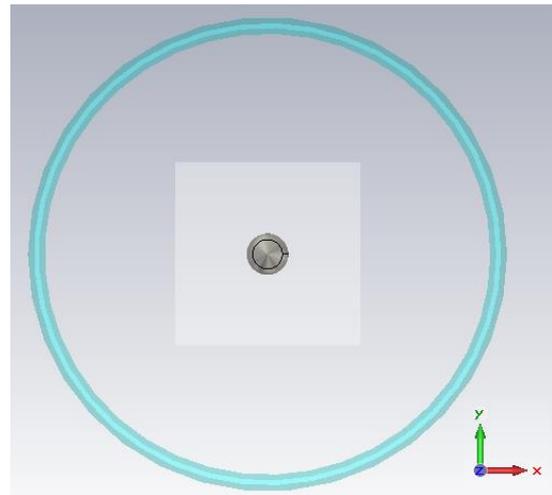
Pode-se observar uma boa correlação dos valores medidos e simulados da taxa de onda estacionária da antena monocone. Desde 2000 MHz até o entorno 4000 MHz, a TOE da antena tem um espectro quase uniforme, o que resulta em um elemento irradiador sem ressonâncias abruptas dessa faixa de frequências, o que permite, p. ex., fazer análises que permitam caracterizar a permissividade de diversos materiais. A largura de banda total da antena, foi entorno aos 5000MHz mas registrou-se uma TOE menor que 1.5, varia de 490 MHz a 4000 MHz. A impedância de entrada da antena, de 2400 MHz até 2700 MHz, está no entorno de 46.5Ω , demonstrando o bom casamento da monocone para as frequências de interesse. Conforme (McDONALD, 2008), a precisão na configuração da região de alimentação da antena monocone determina a sua resposta nas frequências superiores.

5.2.2 Propagação através de parede de tijolos de geometria circular

Nesta etapa, o cenário de provas experimentais consiste em projetar, com a antena localizada no centro, uma parede de tijolo de 2,9 cm de espessura, com geometria circular, raio interno de 60 cm e altura de 50 cm. A base onde foi montada a parede é uma lamina de madeira quadrada, com caminho circular para indicar a posição da parede de tijolos (Figura 39).



(a)



(b)

Figura 39 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone em presença de parede de tijolo de geometria circular: (a) cenário experimental vista em perspectiva e (b) cenário simulado vista superior.

Na etapa experimental, os tijolos foram sujeitos com uniões de plástico, para ficarem numa posição vertical firme. Na Figura 40 mostra a taxa de onda estacionária, medida e simulada, da antena. O analisador vetorial (VNA), modelo N9912A, possui um erro de $\pm 0,8$ dB nas leituras registradas nas experiências no laboratório.

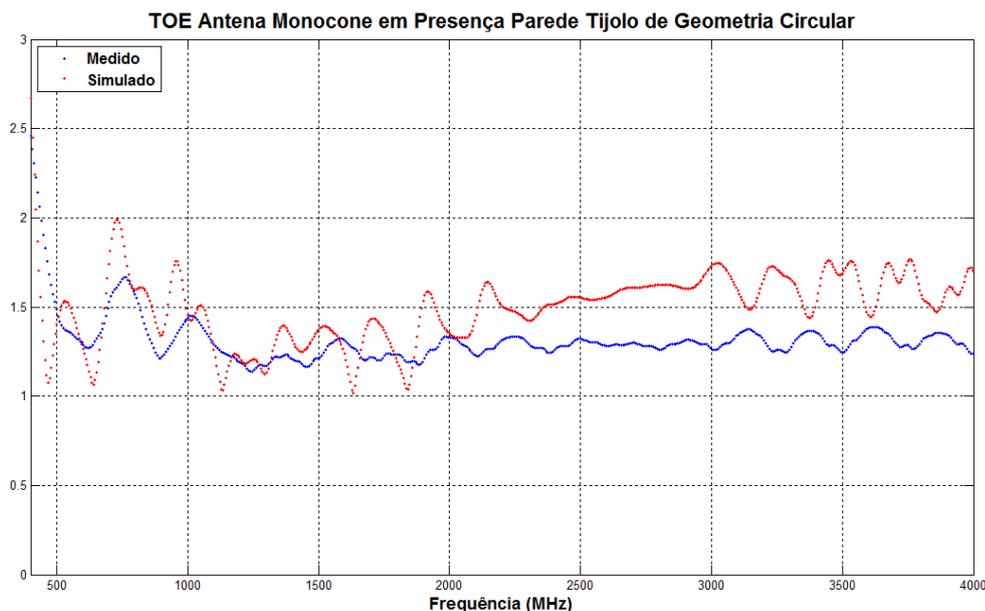


Figura 40 TOE da antena monocone simulada e medida em presença de parede tijolo de geometria circular.

Variações nos níveis obtidos da taxa de onda estacionária podem ser devidas a imperfeições na construção, acoplamento com a linha de transmissão e diferenças de reflexões ocorridas, como mencionado anteriormente. Além disso, o metal da antena simulada foi considerado como condutor elétrico perfeito (PEC), o que influencia a resposta da antena, pois a PEC tem resistência nula. A resposta em frequência do conjunto antena - parede apresenta variações na TOE causadas pela presença da parede, evidenciadas tanto na simulação quando nas medidas experimentais. A simulação, entretanto, apresenta picos e vales mais significativos que as medidas experimentais. Os fatores que contribuem para isso são a rugosidade do tijolo, que não foi modelada e faz com que a absorção do tijolo seja maior que o modelo e o desconhecimento exato do valor das perdas, que podem ser maiores no tijolo utilizado que os valores empregados no modelo. Isso mostra que é necessária uma caracterização precisa da permissividade do material empregado na parede. A instrumentação para tal ainda é indisponível no laboratório. Entretanto, esse fato não invalida a constatação de que, em uma faixa considerável de frequência, a parede é transparente. Na resposta medida (linha azul), vê-se uma tendência quase constante, sem oscilações consideráveis desde 1250 MHz até 4000 MHz, aproximadamente.

5.2.3 Propagação através de parede de tijolos de geometria quadrada

Para este cenário, é projetada uma parede de tijolo de geometria quadrada de lado 1,06 m. A altura da parede é de 50 cm e a espessura 2,9 cm. Na Figura 41 observa-se o cenário proposto, com a antena monocone localizada na parte interior da estrutura.

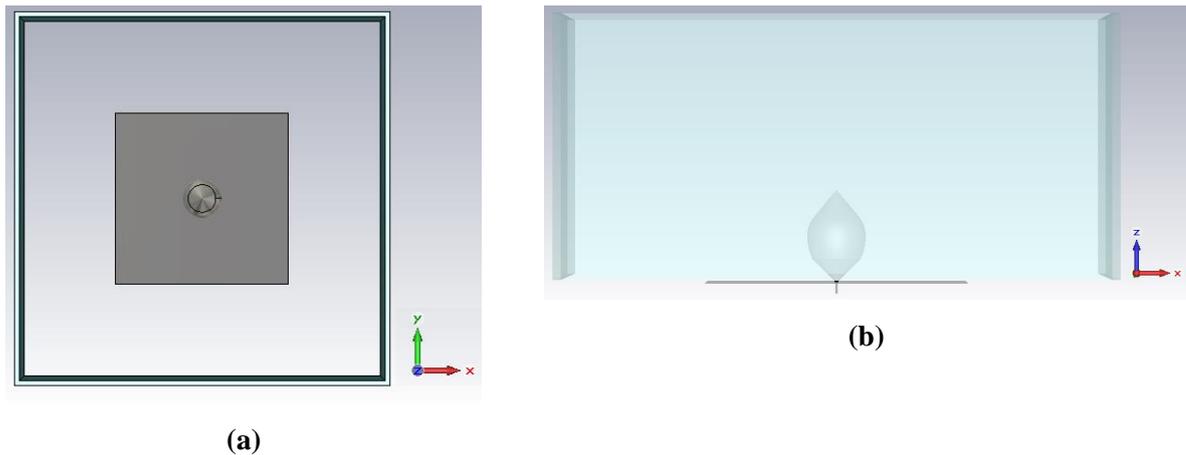


Figura 41 Configuração para obtenção da TOE da antena monocone em presença de parede de tijolo de geometria quadrada: (a) cenário simulado vista superior e (b) cenário simulado vista lateral.

Seguindo a metodologia para obtenção da estrutura experimental, os tijolos foram atados com uniões de plástico e fita para mantê-los numa posição vertical firme. Na Figura 42 estão mostrados os gráficos da TOE experimental e simulada.

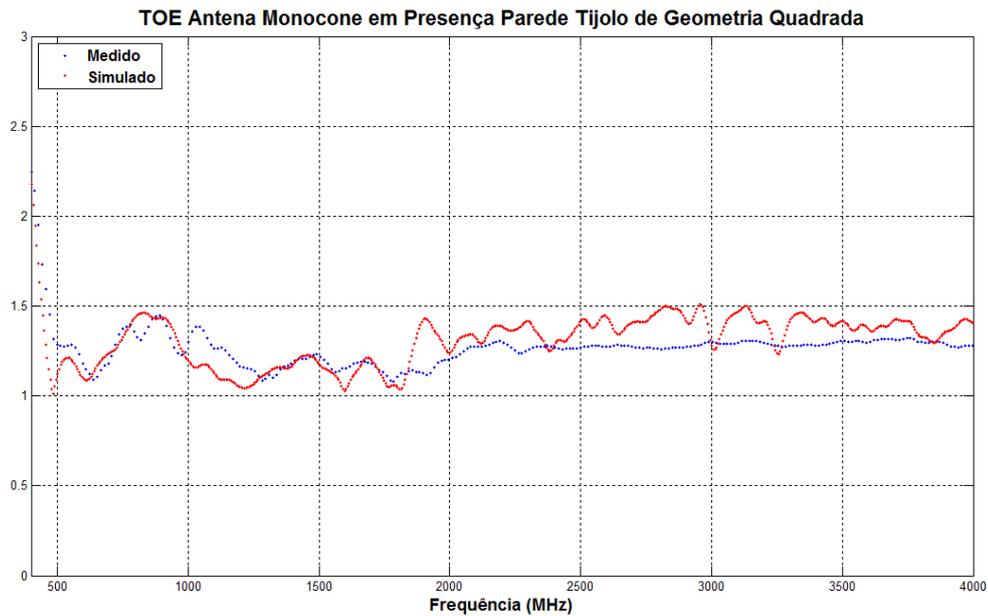


Figura 42 TOE da antena monocone simulada e medida em presença de parede tijolo de geometria quadrada.

As respostas da TOE, simulada e medida, entre os 490 MHz e 1700 MHz aproximadamente são similares. Pequenas variações podem ser devidas a vários fatores p. ex., ambiental (umidade no clima), perdas por dissipação, perdas por condução e acoplamento com a linha de transmissão. Em torno de 2700 MHz, as oscilações na TOE são mínimas, o que indica um tijolo praticamente transparente nesta frequência.

5.2.4 Variação da intensidade de campo elétrico em espaço confinado cilíndrico

Foi feita uma experiência de medição da variação do campo elétrico para identificar e analisar as reflexões no espaço confinado circular em duas frequências, 2000 MHz e 2700 MHz. O cenário de provas consta da Figura 43.



Figura 43 Cenário de provas medição intensidade de campo eletromagnético parede circular.

Para esta etapa foi utilizado o gerador de sinal R&S SMB 100A de Rohde & Schwarz e o medidor de campo EMR-300 da Narda. A potência entregue a antena monocone foi 16 dBm, nível suficiente para garantir uma boa leitura nas medições atingidas pelo medidor de campo. A partir de 30 cm de afastamento da antena, começaram a ser registradas as medições, a cada cm, até atingir 60 cm. Os registros da variação do campo eletromagnético são mostrados na Figura 44.

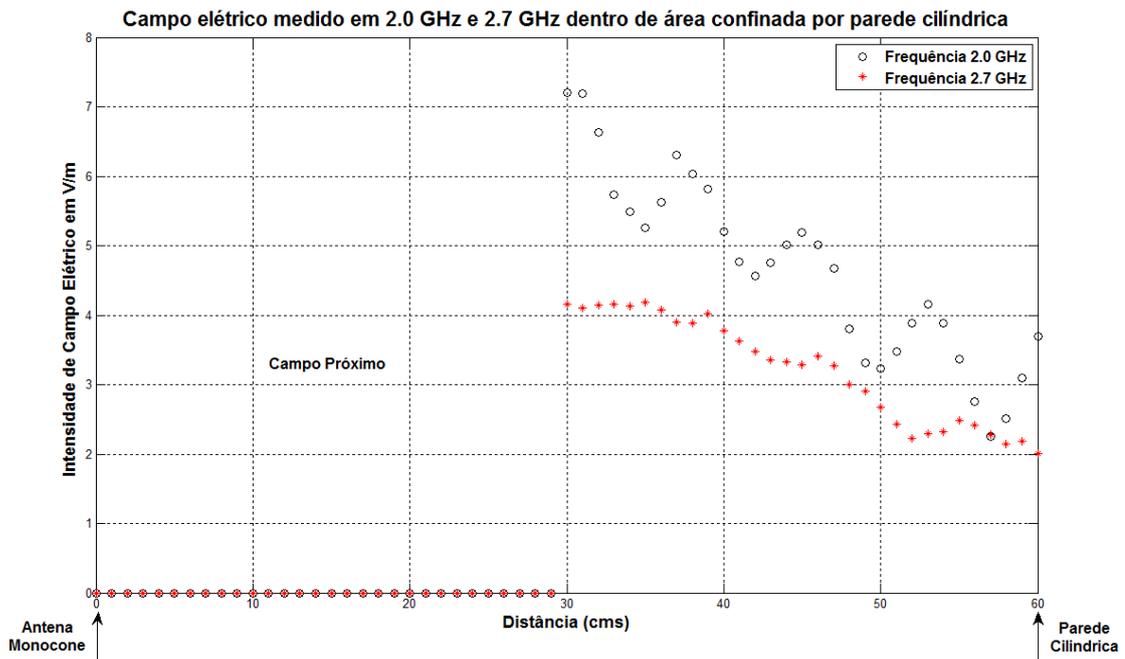


Figura 44 Campo elétrico medido em 2,0 GHz e 2,7 GHz dentro de área confinada por parede de tijolo cilíndrica.

Se pode observar que para a frequência de 2,0 GHz a variação do campo elétrico medido indica a presença de onda estacionária causada por reflexão. Caso contrário ocorre com a frequência de 2,7 GHz cujo comportamento não apresenta oscilações significativas ao longo das medições, indicando que não há reflexões, pois a parede é, nesse caso, transparente. O gerador de rádio frequência (RF) R&S SMB 100A apresenta um erro menor a 0,5 dB na faixa de frequência desde 200 KHz até 3 GHz na potência entregue à antena monocone.

Conforme a Figura 45 abaixo observa-se que as variações da intensidade de campo elétrico na direção azimutal na frequência de 2,7 GHz são da ordem da precisão do equipamento. Para este caso, foram amostradas 32 posições em ângulos diferentes localizando o medidor de campo a uma distância radial de 6 cm da parede e 16 cm em relação ao plano de terra. A média das medições foi de 3,7 V/m com desvio padrão de 0,26.

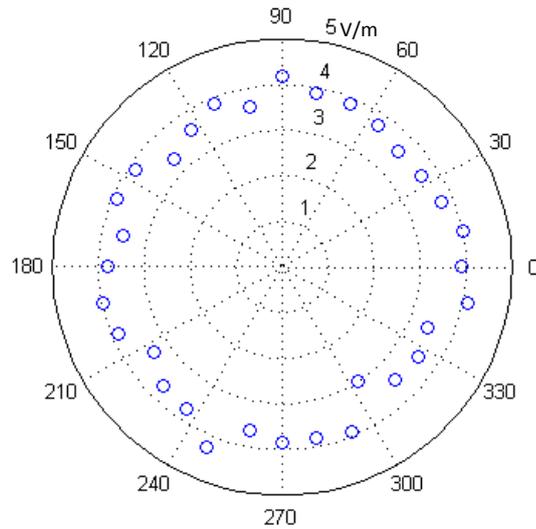


Figura 45 Variações do campo elétrico na direção azimutal a 6 cm da parede

Na Figura 46, foi feita uma experiência semelhante, amostrando 16 posições em ângulos diferentes localizando o medidor de campo a 36 cm da parede mantendo os mesmos 16 cm em relação ao plano de terra. Pode-se observar que as variações da intensidade de campo elétrico na direção azimutal na frequência de 2,7 GHz não são maiores do que 16%. A médias das medições foi de 6,2 V/m com desvio padrão de 0,32.

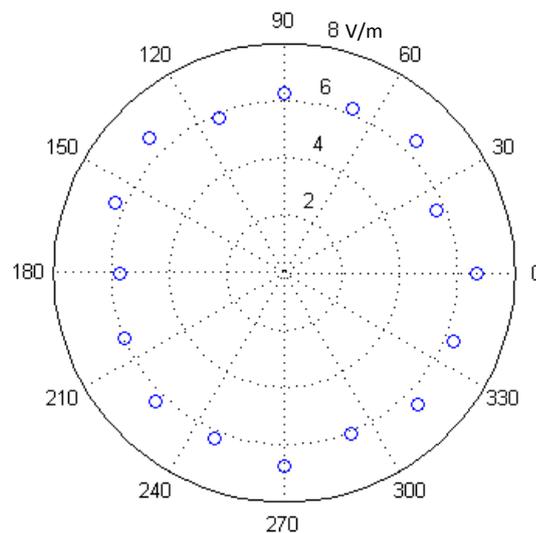


Figura 46 Variações do campo elétrico na direção azimutal a 36 cm da parede

5.2.5 Comparação dos resultados

Na Figura 47 são sobrepostas as TOE registradas experimentalmente da antena monocone nas três situações avaliadas (sem parede, em presença de parede de geometria circular e em presença de parede de geometria quadrada). Se pode observar que a frequência

onde o tijolo mostrou-se transparente é entorno a 2700 MHz e é justamente onde se têm um valor da TOE semelhante para as três situações. Comportamento similar é observado na Figura 48 com os resultados obtidos nas simulações.

Na Figura 47 e Figura 48 é mostrada a comparativa entre as TOE medidas e simuladas respectivamente. Como observado, entorno aos 2700 MHz a parede mostrou-se transparente. Na Figura 49 é mostrado o valor da diferença entre os coeficientes de reflexão simulados sem e com presença da parede de geometria circular para analisar o comportamento causado pela presença desta última. Como se pode observar, o valor que se tem entorno aos 2700 MHz é similar a aquele obtido entorno dos 5400 MHz, o que indica que a reflexão da onda é mínima nestas frequências, comprovando experimentalmente o princípio do transformador de meia onda.

A antena monocone permite analisar as perturbações causadas pelas reflexões da parede e seu comportamento em frequência, não só em banda larga, mas também que no entorno de 2700 MHz e 5400 MHz não apresenta picos e vales. Assim, na Figura 49, onde é feita uma subtração entre o sinal com a parede e o espectro de radiação da antena sem a parede mostra claramente a transparência da mesma em determinadas frequências.

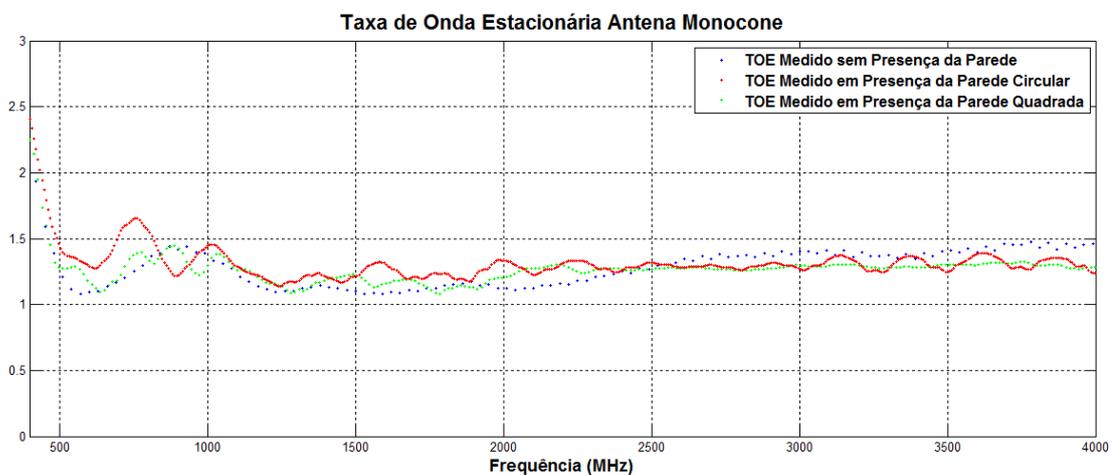


Figura 47 TOE medida de 400 MHz – 4000 MHz com e sem confinamento.

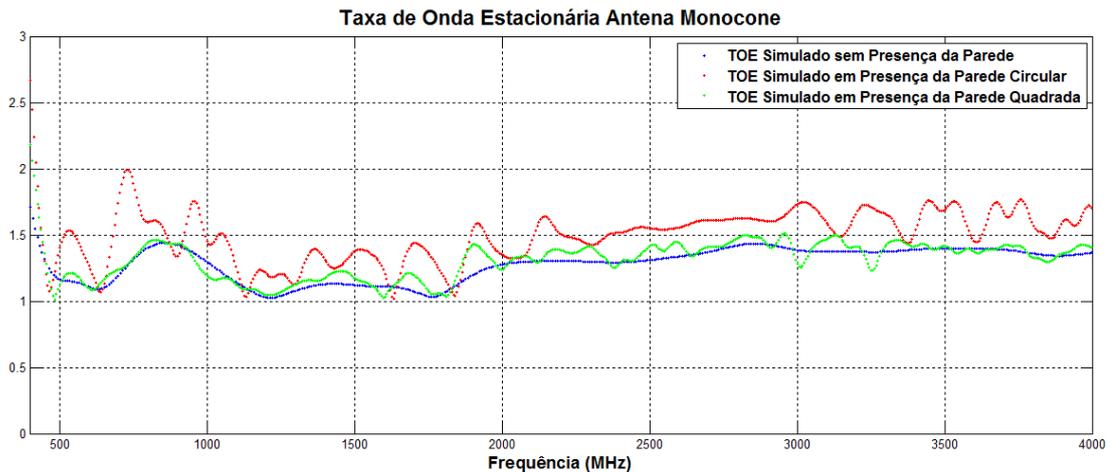


Figura 48 TOE simulada de 400 MHz – 4000 MHz com e sem confinamento.

Pode-se avaliar a atenuação produzida pela parede calculando-se a diferença entre o módulo do coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) da antena com e sem a presença da parede. Os resultados da simulação são mostrados na Figura 49 onde se pode observar uma leve atenuação entorno a 2700 MHz e seu dobro (5400 MHz). As frequências intermediárias apresentam reflexões consideráveis o que produz uma figura semelhante a “envoltória” entre 2700 MHz e 5400 MHz. De forma similar se pode observar na Figura 50 onde a diferença entre o entre o coeficiente de reflexão sem e em presença da parede obtido experimentalmente tem um comportamento semelhante.

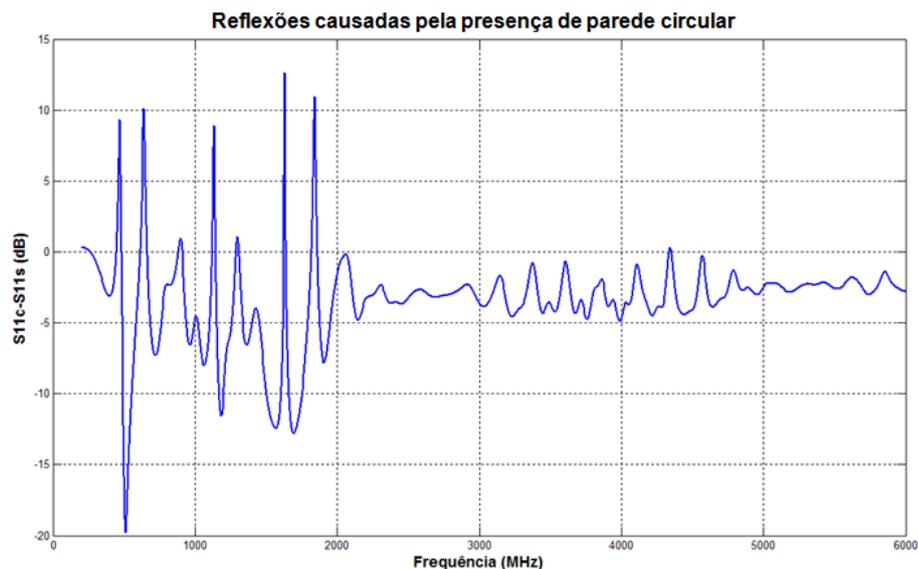


Figura 49 Diferença entre o coeficiente de reflexão simulado sem presença da parede com o coeficiente de reflexão simulado em presença da parede geometria circular.

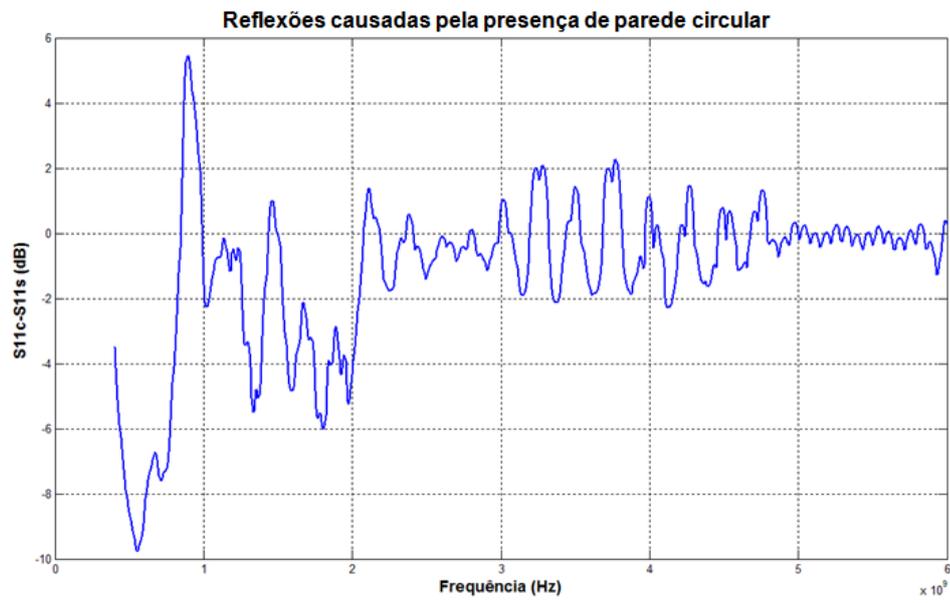


Figura 50 Diferença entre o coeficiente de reflexão medido sem presença da parede com o coeficiente de reflexão medido em presença da parede geometria circular

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Foi apresentada a interação entre o corpo humano e um microcomputador portátil equipado com dois diferentes tipos de antenas, um dipolo e uma antena planar de formato F invertido operando na faixa de 2,4 GHz utilizada para o padrão Wi-Fi. Cada antena foi modelada e simulada segundo o caso de estudo avaliado onde foi variada a elevação e a distância com relação ao torso do modelo sentado. Localizações típicas dos elementos irradiadores no computador foram consideradas como na parte posterior da tela e na parte posterior do teclado;

Observou-se que a resolução da malha do algoritmo FDTD é um parâmetro fundamental nas simulações. Ela determina a relação entre o comprimento de onda e o tamanho das células. Nos modelos utilizados, o comprimento de onda diminuiu por causa do elevado valor da permissividade relativa dos tecidos. Assim, deve-se utilizar uma resolução mais fina nos modelos. Fora deles, entretanto, o tamanho das células pode aumentar para reduzir os recursos computacionais utilizados;

Dos resultados obtidos nas simulações do modelo de corpo inteiro para os casos de estudo, o único que ultrapassou a recomendação para 1 g de tecido, fornecida pela (FCC, 1997) foi o cenário onde o dipolo estava localizado na parte posterior do teclado do computador e situado tangencial ao colo do modelo. Os demais resultados não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas normas internacionais utilizadas como referência para a pesquisa em uma massa de tecido de 1 g (FCC, 1997) e numa massa de tecido de 10 g (IEEE/ANSI, 2005) e (ICNIRP, 1998). No caso dos resultados registrados nas simulações das crianças de 6 e de 11 anos deitadas, onde o computador estava localizado sobre o colo delas, nenhum ultrapassou os limites estabelecidos pelas normas referenciadas;

Sabe-se que os microcomputadores portáteis podem ser utilizados durante longo tempo muito próximos de diferentes partes do corpo, assim, mesmo exposições de baixa intensidade podem ser danosas à saúde dos usuários, especialmente em se tratando de crianças e adolescentes. Ressalte-se que as recomendações internacionais referenciadas consideram somente os efeitos de curta duração de exposição e recomenda-se que estas normas sejam atualizadas para considerar também situações de longo tempo de exposição;

Dos resultados obtidos na fase experimental, utilizando-se antena não ressonante de banda larga, como é o caso da denominada monocone, foi possível comprovar em diferentes geometrias de paredes (circular e quadrada) a transmissão total das ondas eletromagnéticas através dos tijolos. Os valores da TOE, obtidos com o analisador de espectro, mostraram que na frequência de 2700 MHz a parede apresentou-se praticamente transparente. O resultado, diferente do previsto nos cálculos iniciais, onde se esperava uma transmissão total no entorno de 2400 MHz, ocorreu em 2700 MHz devido ao valor inicial equivocado da permissividade utilizada nas primeiras simulações. Ajustou-se o valor da parte real da permissividade para 3,66 a partir das observações experimentais. Materiais compostos, com origem muito variada, como o tijolo de construção, normalmente apresenta variabilidade grande em suas características dielétricas. Disso conclui-se que a avaliação da permissividade das paredes deve ser realizada no caso de ser necessário um projeto preciso de parede transparente. De toda forma, note-se que, apesar do uso de valores nominais encontrados na literatura (ANDREUCETTI, 1995) para permissividade do tijolo, a parede ainda se mantém adequadamente transparente para frequência de 2400 MHz. Assim, dependendo das exigências do projetista, pode-se construir, com alguma facilidade ambientes que não confinem o sinal de Wi-Fi, se esse for o interesse. No caso em que o interesse esteja voltado para o confinamento, basta empregar-se paredes com comprimento de onda múltiplos de $\frac{\lambda_{\text{mat}}}{4}$ e $n * \frac{\lambda_{\text{mat}}}{2} + \frac{\lambda_{\text{mat}}}{4}$ para um n inteiro positivo.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS E PESQUISAS

Avaliação da SAR em modelos de corpos inteiros de diferentes idades, caracterizando com maior detalhamento as propriedades dielétricas dos tecidos nas crianças com o propósito de obter resultados mais próximos da situação real;

Projeção e simulação de cenário com vários modelos de corpos inteiros de várias idades, cada um portando um microcomputador portátil, confinados numa área cercada por paredes metálicas e de diferentes materiais dielétricos, semelhantes aos utilizados em construções civis, p. ex., tijolo, concreto e madeira. Para cada situação simulada, analisar o comportamento dos campos eletromagnéticos no local e sua relação com os níveis de dosimetria registrados nos modelos;

Utilização da antena monocone em modelagem com sistemas de transmissão e caracterização de materiais dielétricos em banda larga.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, M. J. The Visible Human Project: a resource for anatomical visualization. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY REGION 8 INTERNATIONAL CONFERENCE, 1997, Prague. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 1997. p. 29 - 31.
- ÁLVAREZ, M. F. **Técnicas de Simplificación de Redes de Alimentación para el Diseño de Agrupaciones de Antenas y Cálculo Dosimétrico de Diseño de Agrupaciones de Antenas y Cálculo Dosimétrico de SAR en Animales Pequeños Mediante FDTD**. 2011. 266 p. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 2011.
- ANDREUCCETTI, D. et al. A Microwave Device for Woodworm Disinfestation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE AND HIGH FREQUENCY HEATING INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE AND HIGH FREQUENCY HEATING, 1995, Cambridge. **Proceedings...** [S.l.]: Cambridge Education, 1995. Não paginado.
- AVENDAÑO, C. et al. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. **Fertility and Sterility**, Córdoba, v. 97, n. 2, p. 39-45, Jan. 2012.
- BALANIS, C. **Antenna Theory Analysis and Design**. Hoboken: John Wiley & Sons,-2005.
- BENTO, C. **Análise da Antena Planar de F-Invertido pelo Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo**. 2011. 138 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BERENGER, J. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. **Journal of Computational Physics**, [S. l.], v.114, p. 185-200, 1994.
- BERNARDI, P. et al. SAR Distribution and Temperature Increase in an Anatomical Model of the Human Eye Exposed to the Field Radiated by the User Antenna in a Wireless LAN. In: IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 2007, Gainesville. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007. p 2074 – 2082.
- BORNKESSEL, C.; WUSCHEK, M. Exposure Measurements in Different WLAN Scenarios. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND COST 281 WORKSHOP ON EMERGING EMF TECHNOLOGIES, POTENTIAL SENSITIVE GROUPS AND HEALTH, 2006, Graz. **Proceedings...**[S.l.:s.n.] 2006. Não paginado.
- BULLA, G. **Cálculo de Taxa de Absorção Específica e Aumento de Temperatura em Modelos de Cabeça de Adulto e Criança**. 2006. 98 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CENTRO NACIONAL DE SUPER COMPUTAÇÃO (CESUP). **Acesso e utilização do sistema de filas SGE no cluster Sun Fire**. Disponível em: <<http://www.cesup.ufrgs.br>>. Acesso em: 15 Mar. 2014.

CHAVANNES, N. **SEMCAD X Tutorial and Reference Guide**. Zurich: Schmid & Partner Engineering AG, 2009.

CHO, Y. C.; HWANG, S. H.; PARK, S. O. A dual-band internal antenna with a parasitic patch for mobile handsets and the consideration of the handset case and battery. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, Daejeon, v. 4, p. 429-432, Dec. 2005.

CHRIST, A. et al. The Virtual Family—development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. **Physics in Medicine and Biology**, Zurich, v. 55, p. 23-38, Oct. 2010.

CHRIST, A. et al. Correction of Numerical Phase Velocity Errors in Nonuniform FDTD Meshes. **IEICE Transactions Communications**, [S. l.], v. E85-B, n. 12, p. 2904-2915, Dec. 2002.

CHRIST, A.; KUSTER, N. Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. **Bio Electro Magnetism**, Zurich, v.26, n. S7, p. 31-44, Sept. 2005.

CISCO SYSTEMS INC. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018**. San Jose, 2014.

DIMBYLOW, P. J. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. **Physics in Medicine and Biology - IOPscience**, London, v. 42, p. 479-490, Sept. 1996.

EGER, H. et al. The Influence of Being Physically Near to a Cell Phone Transmission Mast on the Incidence of Cancer. **Umwelt Medizin Gesellschaft**, Nalia, v. 17, Não paginado, Oct. 2004.

ELSHARBENI, A.; DEMIR, V. **The finite-difference time-domain method for electromagnetic with Matlab Simulations**. Raleigh: Scitech, 2008.

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMITTEE. **Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields**. Washington, D.C., 1997.

FINDLAY, R. P. and DIMBYLOW, P. J. SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless computer networks (Wi-Fi). **IOP Publishing - Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 55, p. 406-412, June 2010.

FINNIE, JW. et al., Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. **US National Library of Medicine National Institutes of Health**, Adelaide, v. 4, p. 344-347, Ago. 2002.

FOSTER, K. Radiofrequency Exposure From Wireless LANs Utilizing Wi-Fi Technology. In: **HEALTH PHYSICS**, 2007, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: [s.n.], 2007. p. 280-289.

GABRIEL, C. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies. **Brooks Air Force**, Kensington, v. 41, p. 2231-2249, Apr. 1996.

GARZON, J.L.T. **Desenvolvimento e Implementação de Antena Planar para Aparelhos Celulares**. 2013. 140 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

GANDHI, OP.; LAZZI, G.; FURSE, CM. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Salt Lake City, v. 44, p. 1884 - 1897, Oct. 1996.

GUTERMAN, JERZY. et al. Electromagnetic Human Interaction with ISM 2.4 GHz Laptop Antennas. In: THE SECOND EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION EuCAP 2007, 2007, Edinburgh. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007. Não paginado.

GUTERMAN, JERZY. et al. Radiation Pattern of a 2.4/5.2GHz Laptop Internal Antenna: Near Field Spherical Range Measurements and Full Wave Analysis. In: ANTENNA TECHNOLOGY: SMALL AND SMART ANTENNAS METAMATERIALS AND APPLICATIONS IWAT '07, 2007, Cambridge. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007, p. 174-177.

GUTERMAN, JERZY. et al. Radiation from Commercially Viable Antennas for PCMCIA Cards Housed in Laptops. In: IST MOBILE AND WIRELESS COMMUNICATIONS SUMMIT, 2007, Budapest. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007. Não paginado.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION - ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz). **Health Physics**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 494-522, Apr. 1998.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC62209-1**: Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices-human models, instrumentation, and procedures. Geneva, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC62209-2**: Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz). Geneva, 2010.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1528**: recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human head from wireless communications devices. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 802.11 2012: Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks** — specific requirements. New York, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEEC95.1**: Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, 2005.

ISHAK, N.H. et al. Biological Effects of WiFi Electromagnetic Radiation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SYSTEM, COMPUTING AND ENGINEERING (ICCSCE), 2011, Penag. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011 p. 551 – 556.

JAFAR, K.; RAHIM K.; SAKARI L. The Effect of Increase In Dielectric Values on Specific Absorption Rate (SAR) in Eye and Head Tissues Following 900, 1800 and 2450 MHz Radio Frequency (RF) Exposure. **Physics in Medicine and Biology**, London, v. 51, p. 1463–1477, Jan. 2006.

KAINZ, W. et al. Dosimetric comparison of the specific anthropomorphic mannequin (SAM) to 14 anatomical head models using a novel definition for the mobile phone positioning. **Physics in Medicine and Biology**, Rockville, v. 50, n. 14, p. 3423-3445, July 2005.

KANGAS, I. **Validation of tissue simulant parameters for compliance standards of body worn devices**. 2011. 86 p. Tese (Mestrado em Ciencia e Tecnologia) - Aalto University, Faculty of Electronics, Communications and Automation, Helsinki, 2011.

KAWAKAMI, H.; SATO, G. Broad-Band Characteristics of Rotationally Symmetric Antennas and Thin Wire Constructs. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [S. l.], v. 35, p. 26-32, Jan. 1987.

KAYS, R. **Minimizing the Exposure of Future Communication Systems - Optimized WLAN IEEE 802.11**. Dortmund: Universidade de Dortmund, 2006.

KURUP, D. et al. In-body Path Loss Model for Homogeneous and Heterogeneous Human Tissues. **IEEE Transactions on Electromagnetic Capability**, Istanbul, v. 54, n. 3, p. 556–564, Sept. 2011.

LEE, S. et. al. 2.45 GHz radiofrequency fields alter gene expression in cultured human cells. **FEBS Letters**, Chicago, v. 579, p. 4829-4836, Ago. 2010.

LEEN, V. et al. **Procedure for Assessment of General Public Exposure from WLAN in Offices and In Wireless Sensor Network Testbed**. Gent: Ghent University, 2010.

LIU, D. et al. Developing integrated antenna subsystems for laptop computers. **IBM Journal of Research and Development**, [S.l.], v. 47, n. 2/3, p. 355-367, Mar. 2003.

MARTÍNEZ-BÚRDALO, M. et al. FDTD Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields from WiFi and Bluetooth Devices in Some Operating Situations, **Bioelectromagnetics**, [S.l.], v. 30, p. 142-151, 2009.

McDONALD, J.L.; ILIPOVIC, D.S. On the Bandwidth of Monocone Antennas, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [S. l.]:IEEE, v. 56, p. 1196-1201, Apr. 2008.

M. ELSAYED. et al. Exposure assessment to WiFi access points by simulations and measurements. In: IEEE ELECTROMAGNETICS IN ADVANCED APPLICATIONS

(ICEAA), 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETICS IN ADVANCED APPLICATIONS, 2011, Torino. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1442-1445.

NITTBY, H. et al. Exposure to Radiation from Global System for Mobile Communications at 1800 MHz Significantly Changes Gene Expression in Rat Hippocampus and Cortex. **Springer Science Business Media**, Lund, v. 28, p. 458-465, Apr. 2008.

PEDRA, A. **Otimização de Antena de Microfita Banda Larga de Formato “E” Utilizando o Método de FDTD**. 2010. 222 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PETOUSSI-HENSS, N. et al. The GSF family of voxel phantoms. **Physics in Medicine and Biology**, Neuherberg, v. 47, p. 89 - 106, 2002.

PEYMAN, A. et al. Assessment of exposure to electromagnetic fields from wireless computer networks (Wi-Fi) in schools: results of laboratory measurements. **Health Physics**, [S.l.], v. 100, n. 6, p. 594-612. Jan. 2011.

RAMO, W. **Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

SAGE, C.; CARPENTER, D. O. Public health implications of wireless technologies. **Elsevier Pathophysiology**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 233-246, Jan. 2009.

SHABANI, HIKMA. et al. EM Radiation from Wi-LAN Base Station and Its' Effects in Human Body. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING ICECE 2008, 5., 2008, Dhaka. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2008. p. 86-91.

SEVERO, S. **Aquimetría por micro-ondas: desenvolvimento de transdutor em microfita**. 2003. 86 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TAFLOVE, A. **Computational Electrodynamics: the finite-difference time-domain method**. Norwood: ArtechHouse, 1995.

TAFLOVE, A. **Advances in Computational Electrodynamics: the finite difference time domain method**. Norwood: ArtechHouse, 1998.

VOLAKIS, JHON L. **Antenna Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill Education, 2007.

VON HIPPEL, A. R. **Dielectrics and waves**. New York: John Wiley & Sons, 1954.

WIRELESS. **Broadband Alliance**. 2012. Disponível em: <<http://www.wballiance.com/resource-center/wba-industry-report/>>. Acesso em: 10 Set. 2013.

STUTZMAN, W.L.; HIELE, G.A. **Antenna Theory and Design**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

WU, R. Specific Absorption Rate (SAR) Test Report. **Sporton International Inc. SAR Testing Laboratory**, [S.,l.], rev. 01, n. 106, sec. 1, p. 30-32 , Jan. 2007.

YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Livermore, v. 14, n. 3, p. 302-307. May. 1966.

ANEXO A. AVALIAÇÃO DA SAR EM CABEÇAS HETEROGÊNEAS

Neste apêndice foi feita uma avaliação da SAR em dois modelos de cabeças heterogêneas selecionados da base de dados disponível no LACOM da UFRGS. Foram utilizados dois elementos irradiadores para as provas, o primeiro deles é um dipolo de meia onda e o segundo foi uma antena PIFA localizada no interior de uma carcaça de um aparelho celular inteligente (“smartphone”) devidamente projetada. A SAR obtida das cabeças de uma criança de 8 anos e de um adulto masculino de 34 anos foi comparada com os limites estabelecidos pelas algumas normas internacionais. Segundo a norma (IEEE 1528, 2003) a distância entre o elemento irradiador com respeito à superfície do Phantom não deve ser superior aos 8 mm para poder determinar o psSAR com suficiente acurácia. O ângulo de inclinação do elemento irradiador no deve exceder os 30 graus.

A.1 ESTIMATIVAS DE ABSORÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Existem vários fatores que devem ser considerados na hora de fazer avaliações da SAR num modelo determinado, p. ex., num modelo de cabeça antropomórfica (CHRIST, 2005). Na Figura 51 estão mostrados vários fatores que interagem no processo para a estimativa da SAR num modelo de cabeça antropomórfica.

Fonte: Christ, 2005

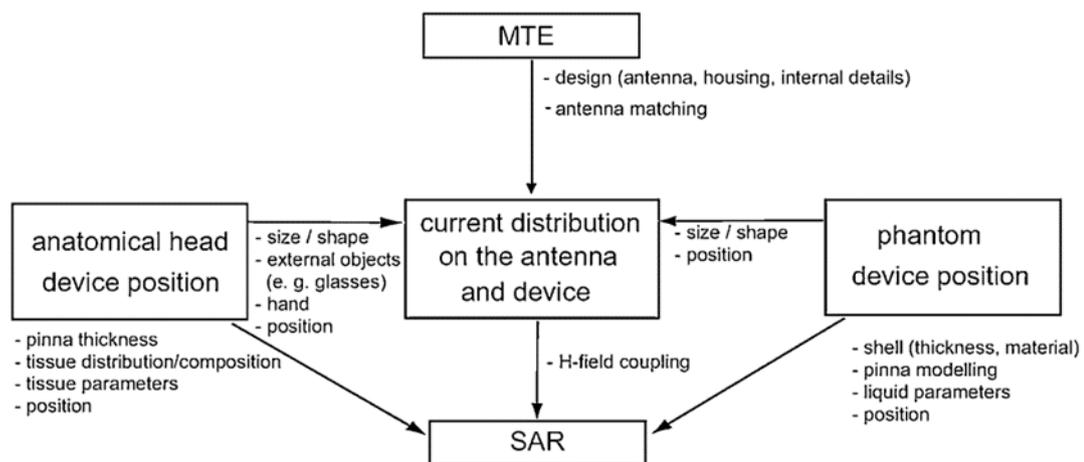


Figura 51 Fatores para determinação da SAR na cabeça.

A.1.2 CABEÇAS HETEROGÊNEAS

No LACOM da UFRGS se tem um banco de vários modelos de cabeças heterogêneas composto entre outros por três modelos de crianças de 6, 8 e 10 anos e de um adulto de 34 anos todos de alta resolução (2 mm) anatomicamente derivados de imagens de ressonância magnética (MRI) ou de tomografias computacionais (CT). Na Figura 52 são mostrados os modelos de cabeças de 8 e 34 anos selecionados a serem simulados na presente pesquisa. O modelo de 34 anos é um derivado do modelo Duke de corpo inteiro que faz parte do projeto da família virtual (CHRIST, 2010) e o modelo de 8 anos foi reconstruído a partir de imagens obtidas de MRI do Hospital Mãe de Deus. Os tecidos identificados correspondentes aos modelos de cabeças utilizados são listados na Tabela 13.



Figura 52 Modelos de 8 e 34 anos heterogêneos utilizados para a estimativa da SAR

Tabela 13 Tecidos identificados nos modelos de cabeça utilizados

Modelo 8 anos	Modelo 34 anos
Gordura	Gordura
Osso	Osso
Músculo	Matéria Cinzenta
Matéria Cinzenta	Matéria Branca
Medula	Líquido Cerebral
Pele	Músculo
Nervo Ótico	Humo Aquoso
Esclera	Pele
Cristalino	Cristalino
Humor Aquoso	Esclera
Líquido Cerebral	Humor Vítreo
Matéria Branca	Medula

A.2 MODELOS DE CABEÇAS IRRADIADOS COM O DIPOLO DE MEIA ONDA

Foram simulados os modelos de cabeças heterogêneas mencionados com um dipolo de meia onda tangencial na bochecha seguindo o procedimento de posicionamento descrito na norma (IEEE 1528, 2003). A distância do dipolo com respeito aos modelos heterogêneos foi de 1.9 mm.

A.2.2 MODELO CABEÇA ADULTO 34 ANOS

Na Figura 53, é mostrado o modelo de cabeça de 34 anos com o dipolo de meia onda tangencial a este. Com o dipolo de meia onda se podem obter resultados baseados num caso severo de exposição que correspondem a um elemento padrão. O modo de excitação para este cenário foi de tipo harmônico. O tamanho total da malha foi de 26,6 milhões elementos da malha, estabelecendo o tempo de simulação em 30 períodos de sinal. As bordas foram estabelecidas com um nível de absorção elevada da onda incidente. Adicionalmente na simulação é usado um sensor na fonte para obter os valores de parâmetros como o coeficiente de reflexão (S11) e a impedância da antena.

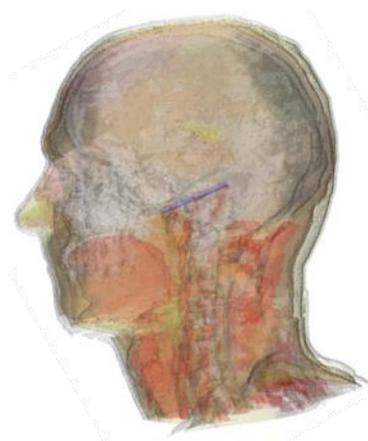


Figura 53 Modelo 34 anos em presença do dipolo de meia onda

O coeficiente de reflexão (S11) obtido foi de -12,4 dB em 2,45 GHz e o valor da impedância de entrada do dipolo foi alterado até os 78.4 Ω . A eficiência do dipolo com a presença de cabeça diminuiu consideravelmente até atingir um 8,08%. A taxa de onda estacionária ficou em 1,63. A Tabela 14 apresenta o valor máximo espacial da SAR (psSAR) em 1 e 10 gramas presentes na cabeça do usuário para a frequência de 2,45 GHz com potência entregue normalizada em 100 mW. A distribuição de campo eletromagnéticos na cabeça do modelo heterogêneo está mostrada na Figura 54.

Tabela 14 Valores de psSAR no modelo 34 anos em presença do dipolo.

Modelo	psSAR 1 g	psSAR 10 g
34 anos	5,88 (W/kg)	2,51 (W/kg)

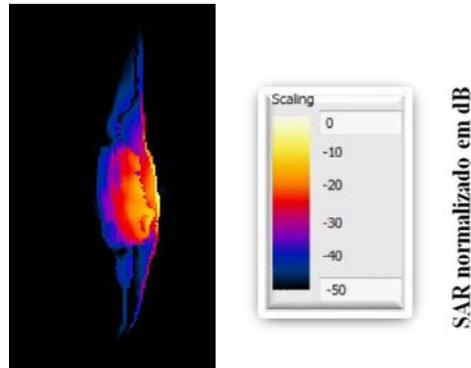


Figura 54 Distribuição da SAR no modelo 34 anos em presença do dipolo de meia onda.

A.2.3 MODELO CABEÇA CRIANÇA 8 ANOS

Foi utilizado um modelo heterogêneo de cabeça de uma criança de 8 anos reconstruído a partir de imagens de MRI, para avaliar a exposição desta população a campos eletromagnéticos. Os valores de permissividade relativa e condutividade equivalente atribuídos aos diferentes tecidos do modelo foram obtidos da base de dados de (GABRIEL, 1996). Na Figura 55 está mostrado o modelo em presença do dipolo. Foi estabelecida uma excitação harmônica e o número de células do cenário ficou em 11,1 milhões. O tempo de simulação escolhido foi de 30 períodos de sinal e o nível de absorção atribuído às ABC foi médio (nível recomendado por o SEMCAD X). Foi localizado um sensor de borda para obter os valores do coeficiente de reflexão e impedância da antena.

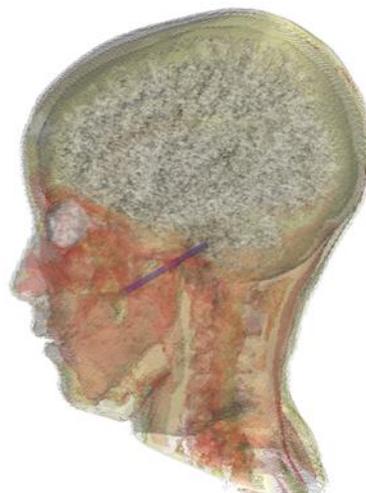


Figura 55 Modelo 8 anos em presença do dipolo de meia onda.

O coeficiente de reflexão (S11) ficou em -11,01 dB em 2,45 GHz e um deslocamento da impedância característica da antena é influenciada significativamente até atingir os 89,1 Ω . O parâmetro de taxa de onda estacionária (TOE) ficou em 1,78. A eficiência do elemento irradiador obtido foi de 8,7% valor semelhante a aquele obtido com a presença da cabeça do adulto.

O valor máximo espacial da SAR (psSAR) em 1 g e 10 g presentes na cabeça da criança estão descritos na Tabela 15 para a frequência de 2,45 GHz com uma potência entregue padrão normalizada em 100 mW. A distribuição de campo eletromagnético na cabeça do modelo está mostrado na Figura 56.

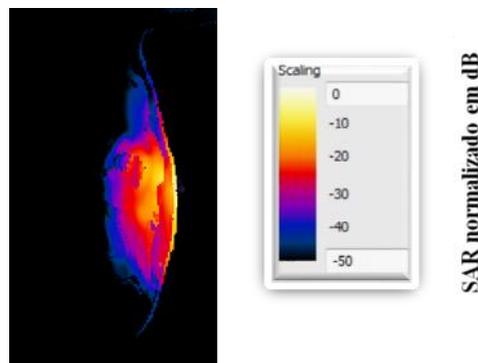


Figura 56 Distribuição da SAR no modelo 8 anos em presença do dipolo de meia onda.

Tabela 15 Valores de psSAR no modelo 8 anos em presença do dipolo.

Modelo	psSAR 1 g	psSAR 10 g
8 anos	6,71 (W/kg)	2,89 (W/kg)

Os resultados obtidos dos níveis de psSAR obtidos nos modelos das cabeças expostas ao dipolo de meia onda ultrapassam os níveis tolerados pelas normas (IEEE C95.1; ICNIRP, 1998) numa massa de 10 g e (FCC,1997) quando referenciado a uma massa de 1 g.

A.3 MODELOS IRRADIADOS COM ANTENA PIFA

Foi avaliada uma situação de exposição dos modelos de cabeças heterogêneas com uma antena tipo PIFA dentro de uma carcaça celular. O posicionamento da carcaça seguiu igualmente como foi feito com os modelos prévios, o procedimento descrito na norma IEEE 1528, de 2003. A distância da PIFA incluindo a espessura da carcaça do telefone celular com respeito aos modelos heterogêneos foi de 11 mm. Na continuação são detalhados os dois cenários modelados.

Foi utilizada uma carcaça de um aparelho celular inteligente devidamente projetada e dimensionada (GARZON, 2013) para a localização da antena PIFA em seu interior. Sua localização está na parte posterior acima da bateria para evitar obstáculos que possam alterar a irradiação da antena no ar. As dimensões da carcaça em mm e a localização da antena PIFA e outros elementos no interior desta são mostradas na Figura 57. A permissividade do plástico da carcaça é de 2,3 e a condutividade equivalente é igual a 0,0001 S/m (FINDLAY et. al., 2010). A bateria do celular tem os valores da permissividade relativa e condutividade equivalente iguais a 3 e 0,8 S/m respectivamente (CHO, 2005).

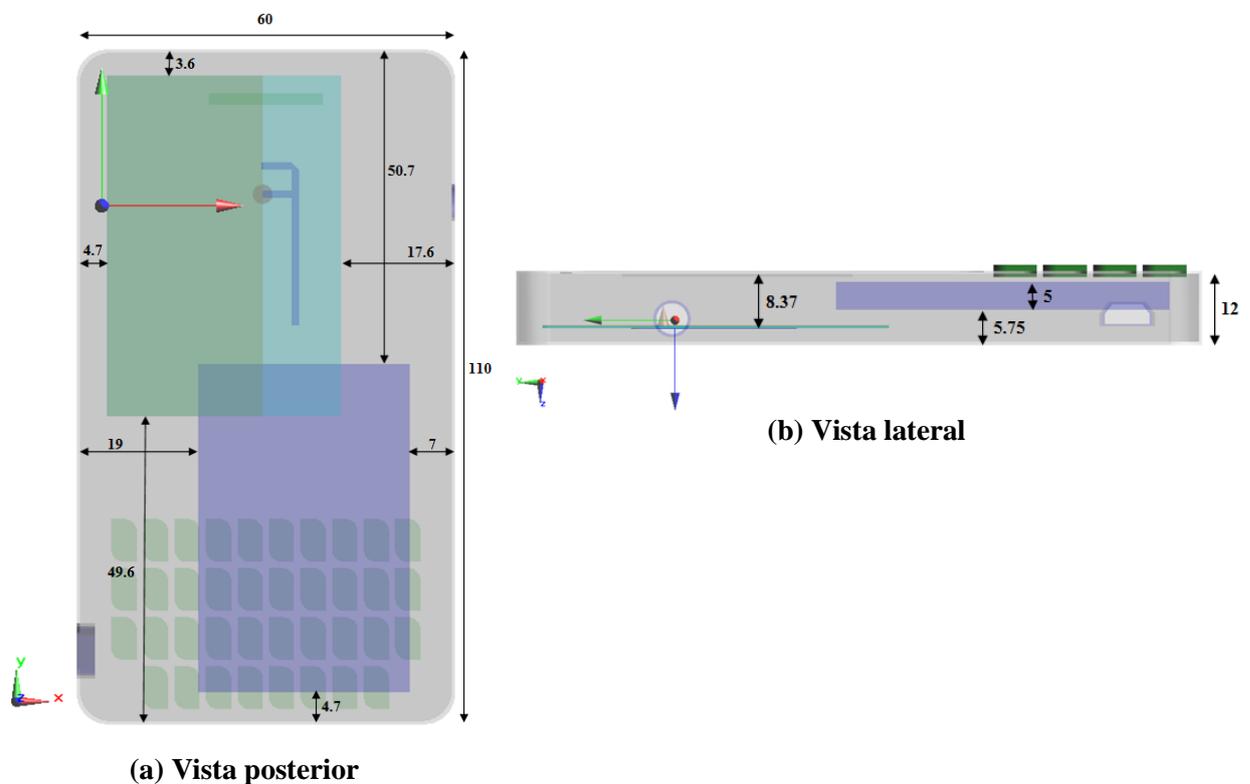


Figura 57 Posicionamento da antena PIFA na carcaça do aparelho celular: (a) vista frontal, (b) vista lateral.

A.3.1 MODELO CABEÇA ADULTO 34 ANOS

Na Figura 58 está mostrado o modelo heterogêneo da cabeça do adulto de 34 anos, com o posicionamento da carcaça de aparelho celular na bochecha. O número total de células do cenário de simulação ficou em 6,8 milhões, estabelecendo um nível médio de absorção nas camadas absorvedoras e 30 períodos de tempo de simulação.

O coeficiente de reflexão (S_{11}) obtida foi de -13,4 dB em 2,45 GHz e a impedância característica da PIFA foi alterada para 42,4 Ω devido a presença da cabeça. A taxa de onda

estacionária apresentou um valor de 1,54, o que é um valor totalmente aceitável. A eficiência da antena foi de 27,76% valor que contrasta notavelmente com a eficiência obtida sem presença da cabeça (99,6 %). A eficiência leva em consideração as perdas por descasamento e as perdas nos materiais.

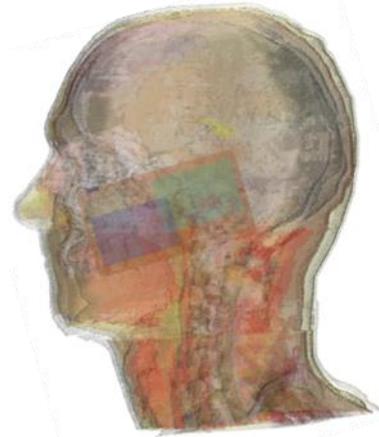


Figura 58 Modelo cabeça 34 anos em presença da PIFA localizada no interior da carcaça de um aparelho celular.

A Tabela 16 apresenta o valor máximo espacial da SAR em cubos contendo 1 e 10 gramas para a frequência de 2,45 GHz com uma potência entregue ao elemento irradiador em 100 mW. O parâmetro de distribuição de campo eletromagnético na cabeça do modelo está mostrado na Figura 59.

Tabela 16 Valores de psSAR no modelo 34 anos em presença da PIFA.

Modelo	psSAR 1 g	psSAR 10 g
34 anos	2,69 (W/kg)	1,20 (W/kg)

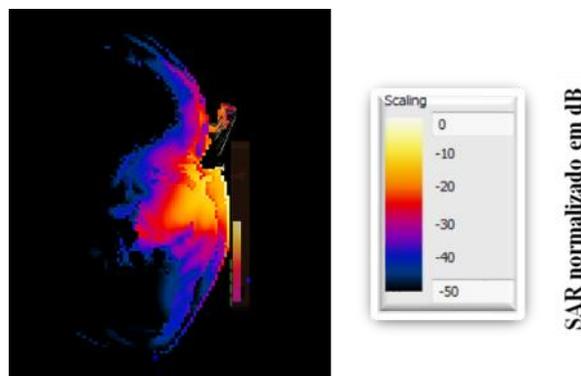


Figura 59 Distribuições da SAR em presença da PIFA no modelo 34 anos.

Observa-se na Tabela 16 que o psSAR referenciado a 1g excede o limite da (FCC, 1997).

A.3.2 MODELO CABEÇA CRIANÇA 8 ANOS

Com o propósito de ter uma avaliação dos efeitos em entornos Wi-Fi nas crianças, foi utilizado um modelo de 8 anos de alta resolução. Os valores de permissividade relativa e condutividade equivalente atribuídos aos diferentes tecidos do modelo foram obtidos da base de dados de (GABRIEL, 1996) tal qual foi mencionado anteriormente no cenário feito com o dipolo. Na Figura 60 se pode observar a cabeça da criança com o aparelho celular situado na bochecha.

Para este cenário, o tipo de excitação escolhida foi de tipo harmônico, com 30 períodos de tempo de simulação e camadas absorvedoras estabelecidas com um nível médio de absorção. A impedância de entrada da antena é de 50Ω atribuindo uma potência entregue típica em 100 mW.

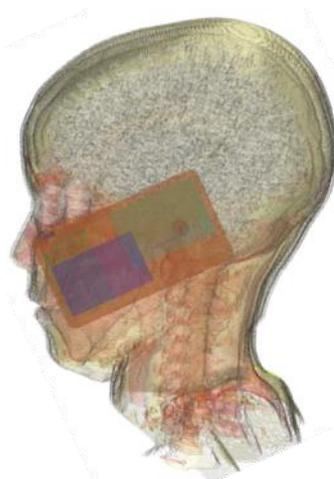


Figura 60 Modelo cabeça 8 anos em presença da PIFA localizada no interior da carcaça de um aparelho celular.

O coeficiente de reflexão (S11) obtida na simulação foi de -35,8 dB em 2,45 GHz e a impedância característica da PIFA não foi alterada significativamente ficando em 49Ω . A taxa de onda estacionária teve um valor de 1,03 o que é um valor desejável. A eficiência da PIFA em presença da cabeça ficou em 31,7% com um ganho de 2,31 dBi.

A Tabela 17 apresenta o valor máximo espacial da SAR em cubos contendo 1 e 10 gramas para a frequência de interesse com uma potência entregue ao elemento irradiador em

100 mW. O parâmetro de distribuição e absorção de campo eletromagnético (SAR) na cabeça do modelo está mostrado na Figura 61.

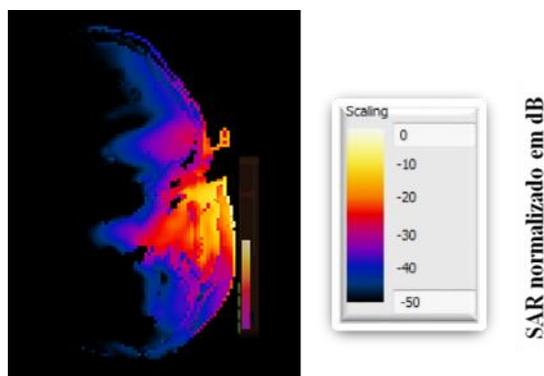


Figura 61 Distribuições da SAR em presença da PIFA no modelo 8 anos.

Tabela 17 Valores de psSAR no modelo 8 anos em presença da PIFA.

Modelo	psSAR 1 g	psSAR 10 g
8 anos	3,02 (W/kg)	1,21 (W/kg)

Os resultados obtidos dos níveis de psSAR nos modelos das cabeças ultrapassam em alguns casos os níveis tolerados pela norma (FCC, 1997) em cubos de 1 g de tecido, mas quando referenciado a um cubo de 10 g os resultados nunca ultrapassaram os níveis permitidos pelas normas (IEEE C95.1) e (ICNIRP, 1998).

Observa-se que no caso do modelo de 8 anos a dosimetria registrada foi entre 10% e 14% maior quando comparado com o modelo de 34 anos devido às entre outros a suas dimensões reduzidas da sua cabeça e uma espessura do crânio é menor.

Nos modelos das cabeças os valores de SAR foram reduzidos em 45% quando referenciado a 1 g de tecido e 41% quando referenciado a 10 g de tecido uma vez que o monopolo de meia onda foi substituído por a antena tipo PIFA. Isto acontece devido a relação frente costa deste tipo de antena. As antenas tipo PIFA são amplamente utilizadas num grande número de dispositivos moveis entre outros porque irradiam ao usuário com uma intensidade menor de campos eletromagnéticos sem afetar a qualidade da comunicação.

ANEXO B MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO (FDTD)

Em 1966, Yee propôs uma técnica para resolver as equações rotacionais de Maxwell usando método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) (YEE, 1966). O método de Yee tem sido usado para resolver diversos problemas de espalhamento, cálculo de parâmetros em circuitos de microondas e absorção eletromagnética em tecidos para frequências de microondas, dentre outros (BULLA, 2006).

O método FDTD quando comparado com outras técnicas de análise numérica como p.ex., o método dos momentos, possui as seguintes vantagens: ser de implementação mais simples, permitindo a obtenção de valores dos campos elétrico e magnético a cada instante da simulação e em todos pontos do domínio do problema; ocorrer no domínio do tempo, não se limitando ao uso de frequência única na fonte, o que é bastante adequado nas simulações de antenas de banda larga que operam com faixa de frequências maior; permitir operar também no domínio da frequência; ter a capacidade de gerar dados de banda larga em uma simples simulação, o que é conseguido quando se usa fonte Gaussiana de espectro amplo para excitar a antena; e permitir simulações com plano de terra finito, conforme ocorre na prática com antenas de banda larga, entre outros (PEDRA, 2010).

Inicialmente houve pouco interesse no método FDTD devido principalmente a que uma das suas limitações principais é que dependendo das dimensões do domínio, este vai ter um custo computacional elevado (consumo de recursos de “hardware”) e a aproximação que tem de ser feita na modelagem das células quando a superfície simulada for curva.

Na sequência são amostradas as expressões para os cálculos das componentes vetoriais dos campos elétrico e magnético discretizados no tempo e no espaço. A formulação é realizada de acordo com o apresentado em (TAFLOVE, 1995), que parte das equações de Maxwell para chegar a um conjunto de equações que formam a base do algoritmo FDTD, possibilitando a análise da interação eletromagnética no espaço tridimensional.

B.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Primeiramente se considera um espaço sem presença de fontes de campo elétrico e magnético, mas que possa conter materiais que absorvam energia proveniente de campos elétricos e magnéticos. As equações de Maxwell em forma diferencial no domínio do tempo, são dadas respectivamente por:

a) Lei de Faraday:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{J}_m \quad (12)$$

b) Lei de Ampere:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}_e \quad (13)$$

onde os termos de (8) e (9) são descritos como:

\vec{B} : vetor de densidade de fluxo magnético (Wb/m²)

\vec{E} : vetor campo elétrico (V/m)

\vec{D} : vetor densidade de fluxo elétrico (C/m²)

\vec{H} : vetor campo magnético (A/m)

\vec{J}_e : vetor densidade de corrente elétrica (A/m²)

\vec{J}_m : vetor densidade de corrente magnética equivalente (V/m²)

Em materiais lineares isotrópicos e não dispersivos, pode-se usar as seguintes relações:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (14)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (15)$$

onde os termos de (10) e (11) são descritos a seguir:

μ : permeabilidade magnética (H/m)

μ_0 : permeabilidade magnética no espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

μ_r : permeabilidade magnética relativa (adimensional)

ϵ : permissividade elétrica (F/m)

ϵ_0 : permissividade elétrica no espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

ϵ_r : permissividade elétrica relativa (adimensional)

Pode-se observar que \vec{M} e \vec{J} nas equações (12) e (13) podem atuar como fontes independentes de campos magnéticos e elétricos respetivamente, representados pelos termos \vec{M}_{fonte} e \vec{J}_{fonte} . Adicionando-se o efeito de perda dos campos magnético e elétrico convertidos em calor pelos materiais e expresso pela condutividade, obtém-se:

$$\vec{M} = \vec{M}_{fonte} + \sigma^* \vec{H} \quad (16)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_{fonte} + \sigma \vec{E} \quad (17)$$

onde os termos de (16) e (17) são definidos como:

σ : condutividade elétrica equivalente (S/m)

σ^* : perda magnética equivalente (Ω/m)

Substituindo nas equações (14), (15), (16) e (17) em as equações (12) e (13), as equações rotacionais de Maxwell são obtidas:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{1}{\mu} (\vec{M}_{fonte} + \sigma^* \vec{H}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\vec{J}_{fonte} + \sigma \vec{E}) \quad (19)$$

Reescrevendo os operadores rotacionais de (18) e (19) na forma de componentes vetoriais em coordenadas cartesianas, resultam as seguintes seis equações escalares:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{source} + \sigma^* H_x) \right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - (M_{source} + \sigma^* H_y) \right] \quad (21)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{source} + \sigma^* H_z) \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{source} + \sigma E_x) \right] \quad (23)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{source} + \sigma E_y) \right] \quad (24)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{source} + \sigma E_z) \right] \quad (25)$$

B.2 ALGORITMO DE YEE

O método proposto por Yee para implementar numericamente as equações de Maxwell na forma diferencial e no domínio do tempo possibilitou a resolução de diversos problemas, além de uma fácil compreensão física do que ocorre na propagação de ondas eletromagnéticas.

Em um espaço tridimensional, o algoritmo desenvolvido por (YEE, 1966) posiciona as componentes vetoriais, E_y, E_z, H_x, H_z e H_z das equações (20) e (25) de forma que cada componente de \vec{E} é cercada por quatro componentes circulares de \vec{H} e cada componente de \vec{H} é cercada por quatro componentes circulares de \vec{E} permitindo assim, a aplicação das Leis de Faraday e Ampere na forma pontual. Tal configuração dos campos \vec{E} e \vec{H} formam a chamada célula de Yee, ilustrada na Figura 62 (BENTO, 2011).

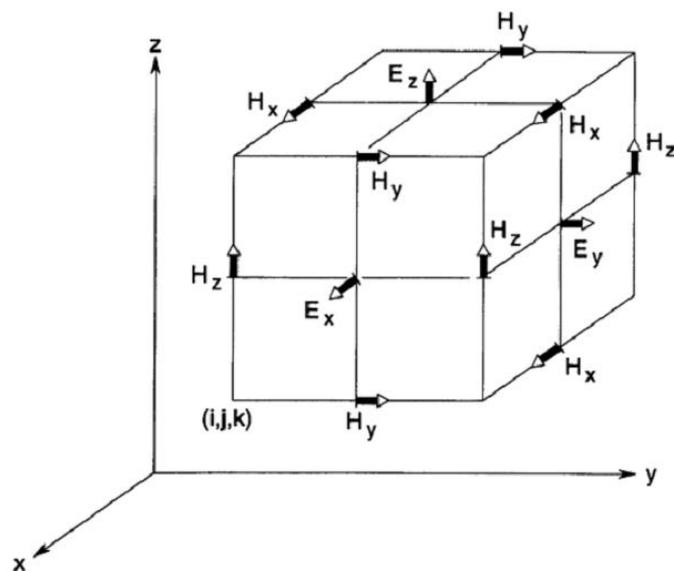


Figura 62 Componentes vetoriais do campo elétrico e magnético da célula de Yee (TAFLOVE, 1995).

Uma malha formada por células de Yee permite posicionar o campo elétrico defasado no espaço e no tempo, em relação ao campo magnético, obtendo-se assim equações que, a partir de campos previamente conhecidos, permitem o cálculo dos campos no instante posterior. Um ponto no espaço, em uma rede retangular e uniforme, é denotado por:

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (26)$$

Onde Δ_x , Δ_y e Δ_z são, respectivamente, os incrementos de espaço nas direções x , y , z , e i , j e k são inteiros. Além disso, qualquer função u do espaço e do tempo, avaliada num ponto discreto da malha e em um instante discreto de tempo, é representada por:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (27)$$

Onde Δ_t é o incremento temporal, assumido uniforme sobre o intervalo de observação, e n é um inteiro. Yee usou expressões de diferenças centrais para aproximar as derivadas espaciais e temporais nas equações rotacionais de Maxwell. Desta forma a derivada parcial de uma função u , na direção x e avaliada no instante $n\Delta_t$ é aproximada por diferenças centrais segundo a expressão:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (28)$$

B.3 DISPERSÃO E ESTABILIDADE NUMÉRICA

O algoritmo FDTD causa erros de dispersão das ondas propagantes na rede formada com as células de Yee. Dispersão é definida como a variação de velocidade de fase dos componentes espectrais de uma onda durante a sua propagação ou, por conveniência, a variação da constante de propagação k (número de onda) com a frequência angular ω . Ondas possuindo velocidade de fase constante são ditas sem dispersão e mantêm seu perfil (envelope ou formato do pulso) independentemente da distância percorrida. E estes erros de dispersão, causados pelo algoritmo FDTD, podem variar com o comprimento de onda, com a direção de propagação e com a discretização da malha (BULLA, 2006).

Assim, a escolha de Δ_x , Δ_y e Δ_z é motivada por razões de precisão (TAFLOVE, 1995). Para garantir a precisão dos valores dos campos calculados, Δ_x , Δ_y e Δ_z devem ser escolhidos como uma pequena fração da menor dimensão do objeto espalhador e também como uma pequena fração do menor comprimento de onda. Desta forma o valor dos campos não irá variar significativamente entre pontos consecutivos da rede. Valores típicos para a maior discretização espacial Δ são $\frac{\lambda}{10} \leq \Delta \leq \frac{\lambda}{20}$.

Além disso, o algoritmo FDTD requer que o incremento temporal ou passo temporal (“magic step”) Δ_t esteja relacionado de forma específica com os incrementos espaciais Δ_x , Δ_y e Δ_z que atende ao fator de estabilidade de Courant (CF) como descrito em (TAFLOVE,

1995) que é uma condição de convergência das equações diferenciais em derivadas parciais. Esta relação é necessária para evitar instabilidades numéricas e é expressa por:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (29)$$

Onde:

c : é a velocidade da luz no vácuo.

A maior aresta de célula ou voxel deve ser calculada a partir do menor comprimento de onda que for ser simulado. O SEMCAD X tem uma discretização espacial de $\frac{\lambda}{14}$ o que dá uma boa aproximação como pode ser observado na Figura 63.

Fonte: Christ, 2002.

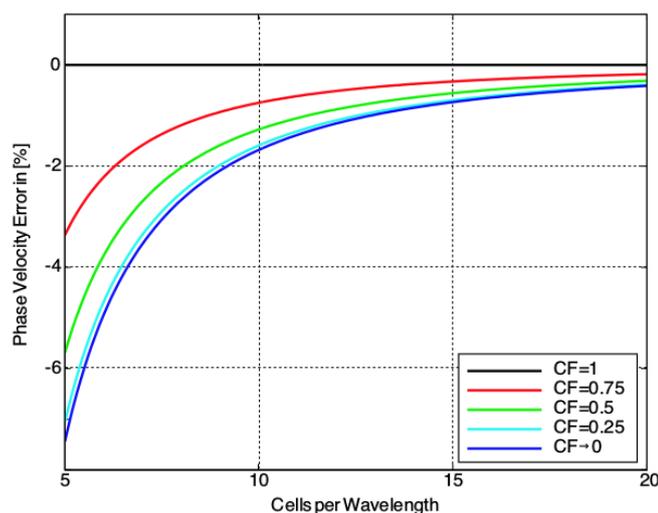


Figura 63 Dispersão e estabilidade numérica

Se a condição de estabilidade não for respeitada, utilizando Δt maior que o limite imposto em (29), as ondas presentes na malha apresentarão rápida oscilação e crescerão exponencialmente a cada Δt , dando origem à instabilidade numérica. Ressalta-se que outros fatores além da equação (29) podem influenciar a estabilidade do método, como materiais não lineares, malhas não uniformes e regiões de contorno absorvedoras (ELSHARBENI, 2008).

B.4 CONDIÇÃO DE CONTORNO ABSORVEDORA (PML)

Um dos grandes desafios do método FDTD tem sido a solução precisa e eficiente de problemas eletromagnéticos em espaço aberto. Em tais problemas, uma condição de contorno

absorvedora (ABC) deve ser utilizada na camada externa à rede para simular a extensão da rede ao infinito. Para isto, várias técnicas já foram desenvolvidas (TAFLOVE, 1995).

Uma forma de implementar uma ABC é inserindo algumas camadas de material absorvedor no exterior do domínio. Isto é análogo ao tratamento físico das paredes de uma câmara anecóica. Idealmente, o meio absorvedor deve ter apenas algumas células de espessura; independente da frequência, ângulo de incidência e polarização, não deve apresentar reflexões; e deve ser altamente absorvedor e eficiente também no campo próximo de uma fonte ou de um objeto espalhador.

(BERENGUER, 1994) desenvolveu uma técnica que simula de forma eficiente um material absorvedor altamente eficiente, designado como camadas perfeitamente casadas ou PML (“Perfectly Matched Layer”). A inovação apresentada pela PML é que ondas planas em um domínio computacional com qualquer ângulo de incidência, qualquer polarização e frequência, estão casadas.

Para isto, Berenguer estabeleceu uma formulação das equações de Maxwell usando separação de campos. Assim, cada componente de cada campo eletromagnético é separado em duas componentes ortogonais. Cada uma das doze componentes ortogonais é expressa satisfazendo um conjunto acoplado de equações hiperbólicas. Pela escolha de parâmetros de perdas consistentes com um meio sem dispersão, uma interface plana perfeitamente casada é então desenvolvida (TAFLOVE, 1998).

A PML por separação de campos introduzida por Berenguer é um meio hipotético baseado num modelo matemático. Tal formulação não representa um meio fisicamente realizável. Devido às dependências das coordenadas dos termos de perdas, se tal meio existe, ele deve ser anisotrópico (BULLA, 2006).

De fato, um meio anisotrópico perfeitamente casado existe (TAFLOVE, 1998). Para cada interface, o meio anisotrópico é uniaxial e é composto de tensores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Devido a isto, este meio é conhecido como meio uniaxial perfeitamente casado (“Uniaxial Perfectly Matched Layers”, UPML). Com esta formulação, evita-se a separação de campos usada na PML de Berenguer.