

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

**YULI ANDREA ÁLVAREZ PIZARRO**

**ESTUDO DA TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA E  
ANÁLISE DE DOSIMETRIA EM PROTÓTIPOS DE ÓCULOS  
E FONE DE OUVIDO PARA DISPOSITIVOS DE  
COMUNICAÇÃO OPERANDO PRÓXIMO DA CABEÇA DO  
USUÁRIO**

Porto Alegre

2015

YULI ANDREA ÁLVAREZ PIZARRO

**ESTUDO DA TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA E  
ANÁLISE DE DOSIMETRIA EM PROTÓTIPOS DE ÓCULOS  
E FONE DE OUVIDO PARA DISPOSITIVOS DE  
COMUNICAÇÃO OPERANDO PRÓXIMO DA CABEÇA DO  
USUÁRIO**

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 de Computação; Redes e Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. PhD. Álvaro Augusto Almeida de Salles

Porto Alegre

2015

YULI ANDREA ÁLVAREZ PIZARRO

**ESTUDO DA TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA E  
ANÁLISE DE DOSIMETRIA EM PROTÓTIPOS DE ÓCULOS  
E FONE DE OUVIDO PARA DISPOSITIVOS DE  
COMUNICAÇÃO OPERANDO PRÓXIMO DA CABEÇA DO  
USUÁRIO**

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. Alexandre Balbinot, UFRGS

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

Prof. Dr. Giovanni Bulla, UFRGS

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

Coordenador do PPGE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Fevereiro de 2015.

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, Gilberto, Rosita e Juanyi, que são a base de todas as minhas conquistas e os grandes amores da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e Nossa Senhora Maria por sempre me conceder sabedoria na escolha do melhor caminho, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

A minha mãe Rosita, pelo amor que me mostrou a direção correta e me ensinou a ter fé na vida e meus conhecimentos.

Ao amor da minha vida Gilberto, pelo apoio, confiança e motivação incondicional. Que sempre me impulsiona em direção às vitórias dos meus desafios.

A Juanyi, meu irmão um agradecimento especial, pois a seu modo, sempre se orgulhou de mim e confiou no meu trabalho. Obrigada pelo amor e confiança.

Ao Oscar, meu companheiro, meu cúmplice, meu amor.

Ao Professor Dr. Álvaro Salles pela orientação, palavras de incentivo, paciência e dedicação.

A meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos e seu apoio incondicional, especialmente à Andrea, Johan, Sergio Racini, Julieth, Sergio Severo e Paulo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela grande oportunidade de realizar meus estudos de mestrado na UFRGS.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

## RESUMO

Dois dispositivos de comunicação sem fio populares são considerados nesta pesquisa. Em primeiro lugar, o fone de ouvido que utiliza tecnologia *Bluetooth*, sendo um dos acessórios móveis mais econômicos do mercado e os óculos para dispositivos de comunicação que são uma representação da nova visão futurista. A absorção de ondas eletromagnéticas na cabeça humana durante um certo período de tempo, pode conduzir a problemas de saúde. A Taxa de Absorção Específica (SAR) foi simulada em quatro modelos diferentes para duas abordagens que realizam variações nos parâmetros dielétricos dos tecidos da cabeça. Estes resultados foram comparados com as recomendações internacionais (IEC 62209-2, 2010; ICNIRP, 2009; IEEE C95.1,2005; WHO, 2006; IEEE, 2002). O primeiro modelo utilizado foi o Manequim Antropomórfico Específico (SAM phantom), bem como três modelos realistas de cabeça humana (ou seja, um adulto de 34 anos e duas crianças de 10 e 6 anos). As simulações foram executadas utilizando o método de diferenças finitas (FDTD) e a frequência usada para alimentar as antenas foi de 2,45 GHz. Além disso foram feitas medidas experimentais de potência transmitida pelo dispositivo Bluetooth.

**Palavras-chave:** *Bluetooth, Google glass, SAR, SAM phantom, FDTD.*

## ABSTRACT

Two popular wireless communication devices are considered in this research. Firstly, the handset *Bluetooth* which is one of the most economic mobile accessories and the eyewear Communicating Device which are a representation of the new futuristic vision. It is well known that the absorption of electromagnetic waves on the human head for a certain period of time may lead to health problems such as headaches. The Specific Absorption Rate (SAR) is simulated to four different head models for two approaches that perform variations in the dielectric parameters in the head tissues and compared with the available international recommendations (IEC 62209-2, 2010; ICNIRP, 2009; IEEE C95.1,2005; WHO, 2006; IEEE, 2002). The first model used is the Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM phantom), as well as three realistic models of human head (i.e., a 34 years old adult and two children of 10 and 6 years old). The simulations were performed using the finite difference time domain (FDTD) method and the frequency used to feed the antennas was 2.45 GHz. Experimental measurements of transmission power in Bluetooth device are also described.

**Keywords:** *Bluetooth, Google glasses, SAR, SAM phantom, FDTD.*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	MOTIVAÇÃO .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2.	REVISÃO DA LITERATURA .....	19
2.1.1	ANTENAS .....	19
2.1.2	TAXA DE ABSORÇÃO ESPECIFICA E PROPRIEDADES DIELÉTRICAS NOS TECIDOS ..	19
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO - FDTD .....	22
3.2	EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES NÃO IONIZANTES .....	22
3.3	DEFINIÇÃO DE TAXA DE ABSORÇÃO ESPECIFICA – SAR.....	23
3.4	TAXA DE ABSORÇÃO ESPECIFICA EM CRIANÇAS .....	24
3.5	RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS .....	25
4.	MODELAMENTO .....	26
4.1	ÓCULOS PARA DISPOSITIVOS DE TELECOMUNICAÇÕES.....	26
4.2	MODELAMENTO DOS ÓCULOS .....	28
4.3	FONE DE OUVIDO SEM FIO COM TECNOLOGIA “BLUETOOTH” .....	29
4.4	MODELAMENTO DO PROTÓTIPO DE FONE DE OUVIDO “BLUETOOTH” .....	30
4.5	ELEMENTOS IRRADIADORES .....	31
4.6	ANTENA PLANAR DE F-INVERTIDO .....	31
4.7	ANTENA MONOPOLO DE QUARTO DE ONDA ( $l = \lambda/4$ ).....	33
4.8	MODELOS DE CABEÇAS .....	35
4.8.1	MANEQUIM ANTROPOMÓRFICO ESPECIFICO (SAM PHANTOM) .....	35
4.8.2	MODELOS DE CABEÇA HETEROGÊNEOS.....	36
4.9	RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS.....	38
5.	DOSIMETRIA .....	39
5.1	DISTÂNCIA MÍNIMA DO ELEMENTO IRRADIADOR COM RESPEITO À CABEÇA DO USUÁRIO.....	39
5.2	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS TECIDOS DIELÉTRICOS NAS CRIANÇAS .....	40
5.3	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DEPENDENDO DA IDADE – ESTUDO MTHR 40	
5.4	VARIAÇÃO ALEATÓRIA NAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS EM FUNÇÃO DA IDADE USANDO PARÂMETROS DE ADULTOS AJUSTADOS PARA OS TECIDOS MAIS JOVENS.....	42
6.	ANÁLISE DE RESULTADOS DA SAR E DOSIMETRIA .....	44
6.1	DISTRIBUIÇÃO TOTAL DE SAR NOS MODELOS HETEROGÊNEOS.....	44
6.2	RESULTADOS DE SAR PARA O SAM PHANTOM E OS MODELOS HETEROGÊNEOS USANDO PARÂMETROS DE ADULTOS .....	46
6.3	RESULTADOS DE SAR USANDO A ABORDAGEM APRESENTADA POR PEYMAN .....	49
6.4	RESULTADOS DE SAR USANDO A ABORDAGEM APRESENTADA POR KESHVARI .....	56
7.	MEDIDAS DOS DISPOSITIVOS.....	63

<b>7.1</b>	<b>MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO, POTÊNCIA E GANHO DAS ANTENAS .....</b>	<b>63</b>
<b>7.2</b>	<b>CÂMARA ANECÓICA .....</b>	<b>63</b>
<b>7.3</b>	<b>DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELO DISPOSITIVO BLUETOOTH .....</b>	<b>64</b>
<b>7.4</b>	<b>DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELO DISPOSITIVO BLUETOOTH COM PRESENÇA DA CABEÇA .....</b>	<b>66</b>
<b>7.5</b>	<b>SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE UTILIZANDO OS VALORES DE POTÊNCIA MEDIDA .....</b>	<b>67</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
<b>9.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>73</b>
	<b>BAKKER, J, F. et al. Assessment of Induced SAR in Children Exposed to Electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5,6 GHz. Physics in Medicine and Biology , v. 55, p. 3115-3130, 2010.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO A. CALCULO DA POTÊNCIA IRRADIADA E TRANSMITIDA PELO BLUETOOTH MEDIANTE A EQUAÇÃO DE FRIIS. ....</b>	<b>79</b>
	<b>A.1.2.1 EQUAÇÃO DE FRIIS.....</b>	<b>80</b>
	<b>A.1.2.2 RADIAÇÃO EM CAMPO PRÓXIMO E CAMPO DISTANTE .....</b>	<b>80</b>
	<b>A.1.2.3 RELAÇÃO DA POTÊNCIA E CAMPO ELÉTRICO .....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO B. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO - INCERTEZA DO SOFTWARE (IEC/IEEE 62704-1) .....</b>	<b>82</b>
	<b>B.1.2.1 FATOR DE INCERTEZA .....</b>	<b>82</b>
	<b>B.1.2.2 INCERTEZA DO MODELO DUT COM RESPEITO AOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO ...</b>	<b>83</b>
	<b>B.1.2.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABSORVENTES (ABCs) .....</b>	<b>83</b>
	<b>B.1.2.4 POTENCIA DE ALIMENTAÇÃO .....</b>	<b>83</b>
	<b>B.1.2.5 DIELÉTRICOS NO MODELO “PHANTOM” .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Espectro Eletromagnético e tipo de radiação dependendo da frequência de trabalho do dispositivo.....	23
Figura 2 Posicionamento da Antena e dimensões do Google Glass: (a) vista superior, (b) vista inferior e (c) posicionamento da antena. ....	27
Figura 3 Primeira versão do protótipo dos óculos: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) vista superior.....	28
Figura 4 Protótipo dos óculos versão 2.0: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) vista superior.....	29
Figura 5 Distância máxima entre o fone de ouvido sem fio “ <i>Bluetooth</i> ” e o telefone celular.....	30
Figura 6 Fone de ouvido com tecnologia Bluetooth (medidas padrões) com antena posicionada na orelha do usuário (a) lateral externa e (b) lateral interna.....	30
Figura 7 Antena Planar de F Invertido: (a) dimensões e (b) componentes. ....	32
Figura 8 Coeficiente de Reflexão antena PIFA simulado. ....	33
Figura 9 Antena monopolo.....	33
Figura 10 Antena monopolo projetada: (a) dimensões e (b) componentes. ....	34
Figura 11 Coeficiente de Reflexão monopolo simulado. ....	34
Figura 12 SAM phantom .....	35
Figura 13 Modelos Heterogêneos: (a) cabeça de Adulto, (b) cabeça de criança de 6 anos e (c) cabeça de criança de 10 anos.....	36
Figura 14 Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 34 anos (Duke): (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone.....	44

Figura 15 Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 10 anos: (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone. ....	45
Figura 16 Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 6 anos: (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone.....	45
Figura 17 psSAR total nos modelos heterogêneos usando os protótipos.....	49
Figura 18 Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 6 anos abordagem análoga Peyman (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).....	53
Figura 19 Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 10 anos abordagem análoga Peyman (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).....	54
Figura 20 Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 6 anos abordagem análoga Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).....	60
Figura 21 Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 10 anos abordagem análoga Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).....	60
Figura 22 Câmara Anecóica CIENTEC. ....	63
Figura 23 Medição experimental do ganho das antenas. Distância entre monopolos. ....	65
Figura 24 Medidas de potência recebida no monopolo dentro da câmara anecoica sem a presença da cabeça.....	65
Figura 25 Medição experimental do ganho das antenas. Distância entre monopolo e Bluetooth comercial.....	67
Figura 26 Medidas de Potência recebida no monopolo dentro da câmara anecoica com a presença da cabeça.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites da SAR .....	25
Tabela 2. Características da antena PIFA.....	32
Tabela 3. Características do monopolo .....	34
Tabela 4. Parâmetros dielétricos do SAM phantom .....	36
Tabela 5. Parâmetros dielétricos da cabeça heterogênea @2,45 GHz .....	37
Tabela 6. Distância mínima.....	39
Tabela 7. Tecidos com maior e menor variação em função da idade.....	41
Tabela 8. Medidas de permissividade relativa e condutividade equivalente de envelhecimento suíno @2.45 GHz. ....	41
Tabela 9. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de Gabriel no protótipo dos óculos com o monopolo. Potência normalizada: 6 mW. @2,45 GHz. ....	46
Tabela 10. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de uma pessoa adulta protótipo dos óculos com a PIFA. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz. ....	46
Tabela 11. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de uma pessoa adulta protótipo do Bluetooth com a PIFA. Potência normalizada: 1 mW. @2.45 GHz. ....	47
Tabela 12. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo dos óculos com o monopolo. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz. Distancia da cabeça e a antena: 6 anos-9mm e 10 anos-6,95mm.....	50
Tabela 13. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo dos óculos com a PIFA. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz. Distancia da cabeça e a antena: 6 anos-9,8 mm e 10 anos-9,5 mm.....	51

Tabela 14. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo do Bluetooth com a PIFA Potência normalizada: 1 mW. @2.45 GHz. Distancia da cabeça e a antena: 6 anos-25,5 mm e 10 anos-33 mm.....	52
Tabela 15. Aumento de psSAR 1g de tecido com a diminuição da idade do suíno em cada modelo (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA). .....	55
Tabela 16. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo dos óculos com monopolo @2.45 GHz.....	57
Tabela 17. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo dos óculos com a PIFA @2.45 GHz.....	58
Tabela 18. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo do Bluetooth com a PIFA @2.45 GHz.....	59
Tabela 19. Aumento de psSAR 1g de tecido abordagem análoga a Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).....	61
Tabela 20. Especificações Câmara Anecóica .....	64
Tabela 21. Campo Elétrico a diferentes distancias.....	68
Tabela 22. Potencia recebida pelo monopolo (0,4 m de distância entre as antenas).....	68
Tabela 23. Potencia transmitida pelo Bluetooth (0,4 m de distância entre as antenas).....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Comprimento de onda (m)
$\sigma$	Condutividade elétrica equivalente (S/m)
$Z_0$	Impedância característica ( $\Omega$ )
$S_{11}$	Coefficiente de reflexão (dB)
$\rho$	Densidade de massa do tecido ( $\text{Kg/m}^3$ )
$\epsilon_r$	Permissividade dielétrica relativa
E:	Intensidade do campo elétrico (V/m)

## LISTA DE ABREVIATURAS

CEM: Campos Eletromagnéticos

CPU: “Central Processing Unit” - Unidade Central de Processamento

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CT: Tomografias Computacionais

DELET: Departamento de Engenharia Elétrica

EM: Eletromagnético

FCC: Federal Communications Commission- Comissão Federal de Comunicações

FDTD: Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection –  
Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes

IEEE: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ISM: “Industrial Scientific and Medical” - Banda Industrial, Científica e Médica

LACOM: Laboratório de Comunicações

MRI: Imagens de Ressonância Magnética

PIFA: Antena Impressa de Formato F-invertido

POM: Protótipo óculos monopolo

POP: Protótipo óculos PIFA

PBP: Protótipo Bluetooth PIFA

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

psSAR: Pico Espacial da Taxa de Absorção Específica

RAM: "Random Access Memory"

RF: Radiofrequência

SAM: Manequim Antropomórfico Específico

SAR: “Specific Absorption Rate” - Taxa de Absorção Específica

Tflop: Tera flop

TBW: Conteúdo de água corporal total

Wi-Fi: "Wireless Fidelity" - Fidelidade sem Fio

WLAN: “Wireless Local Area Network” - Rede de área local sem-fio

WHO: World Health Organization- Organização Mundial da Saude

## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia atualmente avança significativamente e o uso de aparelhos de comunicação sem fio como computadores portáteis, telefones celulares (por exemplo aqueles que utilizam tecnologia *Bluetooth* para se comunicar) e a nova visão futurista apresentada pelos óculos para dispositivos de comunicação são alguns dos mais movimentados no mercado. Este tipo de aparelhos terá uso em muitas áreas não só na engenharia, também na medicina, jornalismo, arquitetura, a polícia, a marinha, o exército, na educação entre outras. Estes sistemas, que trazem tantos benefícios para a sociedade, aumentam no entanto a exposição do ser humano às ondas eletromagnéticas que se propagam pelo ar. A caracterização de uma quantidade excessiva de ondas eletromagnéticas como poluição já está em discussão.

A radiação é a energia que se propaga de um ponto a outro e os efeitos variam com a frequência. A pesquisa tecnológica para melhorar e verificar o comportamento dos dispositivos e seus efeitos na saúde dos usuários é um elemento chave para atingir o desempenho e fazer melhorias.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Desde 1990 começaram a aparecer os dispositivos digitais sem fio (tipo “*Wireless*”). Além de estarem constantemente formando parte de nosso presente, se converteram em nosso futuro. A vida digital envolverá microcomputadores em forma de relógios, sensores de corpo, tatuagens digitais, roupas inteligentes entre outros dispositivos do uso diário nas pessoas.

O *Bluetooth* é uma tecnologia de baixo alcance (1-15 metros) que utiliza campos de radiofrequência para transmitir informação entre celulares, computadores e outros aparelhos. A aplicação utilizada neste trabalho é um fone de ouvido conectado a um telefone celular possibilitando uma comunicação simplificada e a sincronização entre aparelhos sem a necessidade de cabos. Este dispositivo é um acessório em forma de óculos que faz uma interação dos usuários com diversos conteúdos em realidade aumentada causando um impacto grande na sociedade após serem lançados no mercado. A preocupação aos possíveis efeitos adversos sobre a saúde humana devido às ondas eletromagnéticas (EM) que são emitidas por estes dispositivos serão o foco deste estudo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

- Investigar a possível variação da Taxa de Absorção Específica (SAR) na região da cabeça de crianças e adultos por meio da aplicação do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) usando modelos homogêneos e heterogêneos anatomicamente corretos e utilizando protótipo projetado dos óculos utilizado em dispositivos de comunicação e o fone de ouvido com tecnologia *Bluetooth*.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenhar os protótipos de fone com tecnologia *Bluetooth*, os óculos e suas antenas com características específicas para a operação na faixa de frequências de 2.45 GHz.
- Realizar um estudo dosimétrico nas cabeças heterogêneas incrementando os valores de permissividade relativa  $\epsilon_r$  e condutividade equivalente  $\sigma$  tentando simular as condições próximas das reais de exposição dos usuários.
- Fazer as medições correspondentes de intensidade de campo elétrico, ganho das antenas no fone de ouvido.
- Analisar os parâmetros de desempenho dos testes realizados com os dispositivos e as simulações feitas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1.1 ANTENAS

Na sequência serão apresentadas as pesquisas bibliográficas das antenas que operam em 2.4 GHz, c. p, Wi-Fi e Bluetooth.

(T. TSUKIJI, *et al.*, 2002) apresenta um monopolo usando linhas paralelas ou cabo coaxial. Uma antena mais recente com um ganho alto, maior eficiência e uma impedância de  $50 \Omega$  é apresentada em (T. TSUKIJI, *et al.*, 2009). Em (H.-W. LIU *and* C.-F. YANG, 2010) é mostrada uma antena PIFA de 10 (L) x 3 (W) x 3,5 (H) (mm) que trabalha com aplicações em ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Estas bandas são reservadas internacionalmente para uso não comercial de radiofrequência. (COBERTT ROWELL *and* EDMUND Y. LAM, 2012) realiza uma pesquisa de antenas internas em telefones celulares comerciais desde 1997 até 2010. Além disso, cobrem quase 60 tipos de fones de ouvido que trabalham em GSM e 3G da Nokia, Sony-Ericsson, Motorola e Apple. Em (BEIDOU ZHANG *et al.*, 2012) é apresentado um dipolo para comunicações WLAN que trabalha com largura de banda de 2,4 até 2,484 GHz.

### 2.1.2 TAXA DE ABSORÇÃO ESPECIFICA E PROPRIEDADES DIELÉTRICAS NOS TECIDOS

Três técnicas experimentais são usadas para medições de propriedades dielétricas nos tecidos humanos (S. GABRIEL *et al.*, 1996) variando a frequência numa faixa de 10 Hz até 20 GHz. A dosimetria feita em dez ratos com seis idades diferentes é apresentada em (A PEYMAN *et al.*, 2001) e as faixas de frequência vão de 130 MHz a 10 GHz. Os parâmetros e mecanismos que afetam a exposição dos usuários aos telefones celulares com atenção especial nas crianças é um estudo apresentado por (CHRIST *e* NIELS KUSTER, 2005). São discutidos os modelos das cabeças e as imagens de ressonância magnéticas (*MRI*). Em (ABDELHAMID HADJEM *et al.*, 2005) é mostrado um estudo da taxa de absorção específica induzida em duas cabeças de crianças e um adulto usando telefones celulares. (J KESHVARY *e* SLANG, 2005) apresentam uma discussão da energia absorvida em ouvidos e olhos de crianças e adultos para três valores de frequência (900, 1800 e 2450 MHz). O incremento de valores das propriedades dielétricas dos tecidos pode ser observado em (J KESHVARY *et al.*, 2006) para as mesmas frequências. Utilizando o método FDTD para calcular a SAR em modelos de crianças e adultos (JIANQING WANG *et al.*, 2006) utilizam frequências desde 30 MHz até 3 GHz. Segundo (SALLES *et al.*, 2006) em modelos de crianças que tem os parâmetros

dielétricos modificados até cerca de 20%, os valores da SAR são maiores aproximadamente 60% que nos adultos utilizando o telefone perto da cabeça. Em (PEYMAN *et al.*, 2009) utilizam propriedades dielétricas de porcos em faixas de 50 MHz até 20 GHz para calcular a SAR em crianças de 3 e 7 anos de idade expostas à radiofrequência induzida por telefones celulares. Os efeitos produzidos pelos fones de ouvido que utilizam tecnologia Bluetooth perto da cabeça são apresentados por (DAYANG ARZA AWANG MAT *et al.*, 2009). A avaliação da SAR em crianças expostas às ondas eletromagnéticas em faixas de frequência de 10 MHz e 5,6 GHz é mostrada na pesquisa de (J F BAKKER *et al.*, 2010). O desenvolvimento de modelos anatômicos conhecidos como “The virtual Family” (ANDREAS CHRIST *et al.*, 2010) baseadas em imagens de ressonância eletromagnética, é mostrado com modelos de adultos e crianças para simulações dosimétricas. Em (PEYMAN, 2011) são feitos estudos para calcular o impacto na variação das propriedades dielétricas nos tecidos quando as crianças se encontram expostas às ondas eletromagnéticas. Na pesquisa desenvolvida por (O. P. GANDHI *et al.*, 2012) são apresentadas as possíveis doenças que pode acometer uma pessoa que utiliza o dispositivo por longo tempo. Em (REZA AMIN-ZADEH *et al.*, 2013) são apresentados estudos numéricos na cabeça do SAM Phantom com a utilização de um fone de ouvido e tecnologia Bluetooth.

Esta dissertação é composta de 6 capítulos e dois anexos. Os assuntos referentes a cada capítulo e apêndice são os seguintes:

**Capítulo 3:** são mostrados os fundamentos teóricos da dissertação. A definição do método FDTD, os efeitos biológicos que apresentam as pessoas ao momento de ser expostos a radiações não ionizantes, a definição da SAR e as recomendações das organizações internacionais para os casos de exposição.

**Capítulo 4:** são apresentados os modelamentos dos protótipos, os elementos irradiadores, os modelos de cabeças empregados para as simulações e os recursos computacionais.

**Capítulo 5:** nesta seção são mostrados os estudos de dosimetria realizados no trabalho (PEYMAN *et al.*, 2009) e (KESHVARI *et al.*, 2006) e as distancias mínimas que existem entre cada elemento e o modelo da cabeça.

**Capítulo 6:** são expostos os resultados da SAR e a dosimetria realizada nos modelos.

**Capítulo 7:** são mostradas as medidas realizadas na câmara anecoica para avaliar experimentalmente as potencias das antenas e dispositivos.

**Capítulo 8:** são expostas as conclusões da dissertação.

**Capítulo 9:** são apresentados os trabalhos futuros. Além disso nos anexos pode-se observar o procedimento para medir radiações não ionizantes e o erro que pode ter o software.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

#### 3.1 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO - FDTD

O Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain - FDTD*) foi proposto por Kane Yee em 1966 (YEE,1996). Muitas formas de soluções das equações de Maxwell têm sido desenvolvidas e utilizadas, entretanto o método proposto por Yee continua sendo bastante utilizado, por ser robusto e simples. O método FDTD é usado em muitas aplicações eletromagnéticas da tecnologia e computação. Atualmente o FDTD é um método computacional bastante aceito para modelar a taxa de absorção específica (SAR). Este método oferece uma grande flexibilidade no modelamento de estruturas não homogêneas de tecidos e órgãos humanos (Means e CHAN, 2001).

#### 3.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES NÃO IONIZANTES

As ondas eletromagnéticas penetram em uma profundidade e interferem no funcionamento do organismo humano induzindo a formação de correntes e campos elétricos e magnéticos em seu interior. Dependendo de sua amplitude e frequência, pode causar aquecimento ou choques elétricos ou outros efeitos de baixo nível de exposição. Quanto maior for o tempo de exposição, maior é o dano causado.

Nos últimos anos tem sido observado um aumento da exposição aos campos eletromagnéticos criados pelos homens. Estas exposições têm sido vinculadas aos muitos efeitos biológicos adversos na saúde pública. Conforme (LAI e HARDELL, 2011) a maior parte da energia de radiofrequência emitida por um telefone celular é absorvida pela mão e cabeça do usuário. Os avanços tecnológicos associados às comunicações moveis adquiriram uma forte expansão, obtendo vantagens associadas na utilização destes dispositivos. Atualmente existem mais de 7 bilhões de dispositivos de comunicação sem fio no mundo inteiro e milhões de crianças são expostas diariamente às ondas de radiofrequência (*RF*). Interrupção hormonal, dano das funções cognitivas como concentração, atenção, comportamento e bem-estar são alguns dos efeitos de exposição a curto prazo (GANDHI *et*

al, 2012). Alguns dos efeitos apresentados a longo prazo podem ser estresse psicológico, incremento das taxas para contrair câncer e insônia.

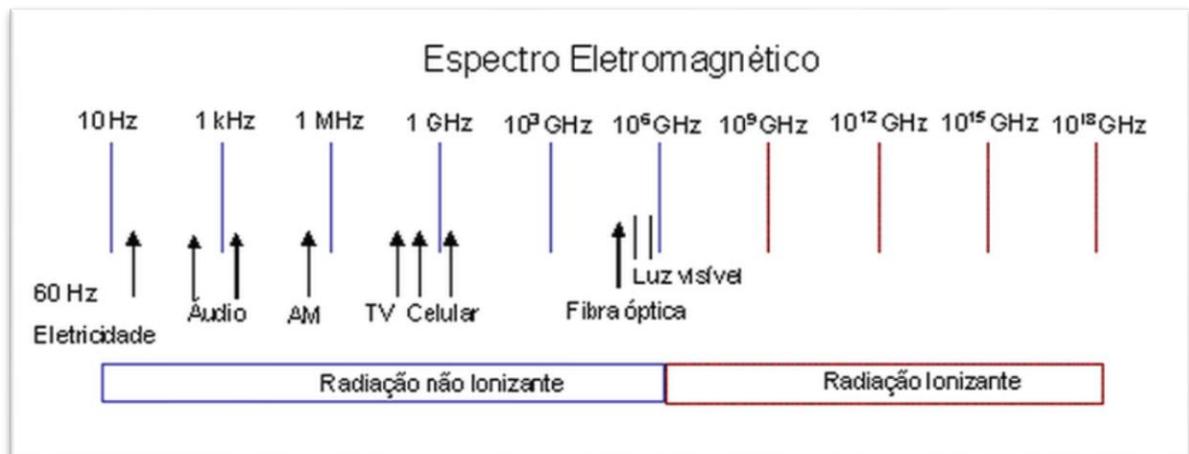
As exposições crônicas (longo tempo de exposição) e não controladas são capazes de produzir enfermidades nas quais às crianças são mais vulneráveis.

Segundo (SAGE e CARPENTER,2009) o risco da utilização destes dispositivos em contrair tumores cerebrais é maior depois de 10 anos de uso e também para crianças que começam sua utilização em idades prematuras.

### 3.3 DEFINIÇÃO DE TAXA DE ABSORÇÃO ESPECIFICA – SAR

A “*Specific Absorption Rate*” (SAR) é a taxa de absorção da energia por unidade de tempo por unidade de massa dos tecidos do corpo, medida em Watts por quilograma (W/kg), de uma fonte eletromagnética. A SAR é a mensuração dosimétrica utilizada para estabelecer limites à emissão de radiação por campos eletromagnéticos não ionizantes que ocorrem no espectro de radiofrequência (3KHz- 300 GHz segundo a C95.1, 2005) como é mostrado na Figura 1.

Fonte: <http://www.mspc.eng.br/elemag/eletm0630.shtml>



**Figura 1 Espectro Eletromagnético e tipo de radiação dependendo da frequência de trabalho do dispositivo.**

A taxa de absorção específica no tecido é determinada por:

$$SAR = (\underline{E} \cdot \underline{J}^*) / 2\rho = \frac{\sigma E^2}{2\rho} \quad (1)$$

onde  $\underline{E}$  é o vetor de campo elétrico ( $V/m$ ),  $\underline{J}^*$  é o conjugado da densidade de corrente ( $A/m^2$ ),  $\rho$  é a densidade de massa ( $kg/m^3$ ),  $E$  é a magnitude do vetor de campo elétrico (valor pico) e  $\sigma$  é a condutividade elétrica equivalente ( $S/m$ ). A SAR pode ser medida ao longo do corpo, mas às áreas de interesse são a cabeça e o tecido cerebral, no caso de exposição a aparelhos operados próximos da cabeça. Nesta pesquisa, a SAR é utilizada para avaliar os efeitos da onda eletromagnética, na cabeça humana, simulada por três tipos de modelos tridimensionais tomados de ressonância eletromagnética.

### 3.4 TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA EM CRIANÇAS

Em (BULLA, 2006) é apresentado um programa baseado em FDTD para calcular a SAR em modelos de cabeça de adulto e criança usando telefones celulares. Segundo (HAN *et al*, 2010) muitas pesquisas mostram que a absorção em crianças é maior em comparação da SAR em adultos. Autores como (GANDHI *et al*, 1996) obtiveram uma penetração 53% maior em crianças, com modelos de 5 e 10 anos, que em adultos. (PEYMAN *et al*, 2001) concluíram que o hipocampo e o hipotálamo recebem valores de SAR de 1,3 a 3,1 maiores em crianças em comparação aos adultos. (WANG e FUJIWARA, 2003) concordaram um considerável incremento no pico médio de SAR (psSAR) medido na cabeça da criança, sendo bem maior que no adulto no momento das simulações. Segundo (MARTINEZ-BURDALO *et al*, 2009) com a redução do tamanho da cabeça, a porcentagem da energia absorvida pelo cérebro aumenta e por esta razão se espera que a SAR seja maior na criança. Os resultados da pesquisa de (WIART *et al*, 2008) revelam que a SAR em 1g dos tecidos do cérebro de uma criança são duas vezes maiores que nos tecidos de um adulto. (BAKKER *et al*, 2010) Recomenda à ICNRP revisar os níveis de SAR. Em (GARZON, 2013) são realizadas diversas simulações no SEMCAD X avaliando a diferencia do desempenho de uma antena PIFA com ranhura-T com e sem presença da cabeça do usuário. Por último (RACINI, 2014) realiza simulações com um telefone celular obtendo níveis da SAR na criança 20% mais altos do que no adulto.

### 3.5 RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS

Cada país adota normas sobre os níveis permitidos de exposição baseado em pesquisas e medições. A Organização Mundial de Saúde (OMS) desde o ano de 1996 até 2007 criou “*The International EMF Project*” para estudar os efeitos e facilitar o desenvolvimento de padrões de segurança internacionais.

As principais diretrizes foram estabelecidas pela *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) e pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Muitos países adotam estas recomendações internacionais e, procuram restringir o acesso a regiões onde os limites possam ser excedidos (IEC 62209-2, 2010; ICNIRP, 2009; IEEE C95.1,2005; WHO, 2006; IEEE, 2002). Os limites estabelecidos por estas recomendações visam prevenir consequências adversas na saúde humana. Na Tabela 1 observa-se os padrões de alguns países que adotam diferentes recomendações para os limites da SAR (“Specific Absorption Rate”).

**Tabela 1. Limites da SAR**

	USA	Europa	Nova Zelândia	Japão	Austrália	Brasil	Canadá
Padrão	ANSI C95,1	EM 50360	NZS 2772,1	TTC/MPT	ACA	ICNIRP	FCC
Corpo Inteiro (W/kg)	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08
Pico espacial (psSAR- W/kg)	1,6	2	2	2	1,6	2	1,6
Massa Tecido (g)	1	10	10	10	1	1	1

Em alguns países, por precaução, os limites são mais restritos que os das recomendações acima. No Brasil, a Lei nº 11.934/09, dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Em 2002, à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) publicou as “Diretrizes para Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo na Faixa de Radiofrequências de 9 kHz a 300 GHz”, Resolução 303/02, que basicamente segue as recomendações da ICNIRP. Contudo ante várias incertezas nesta área, muitas cidades começaram a elaborar suas próprias diretrizes, como o caso de Porto Alegre, Belo Horizonte, Campinas e outras.

## 4. MODELAMENTO

### 4.1 ÓCULOS PARA DISPOSITIVOS DE TELECOMUNICAÇÕES

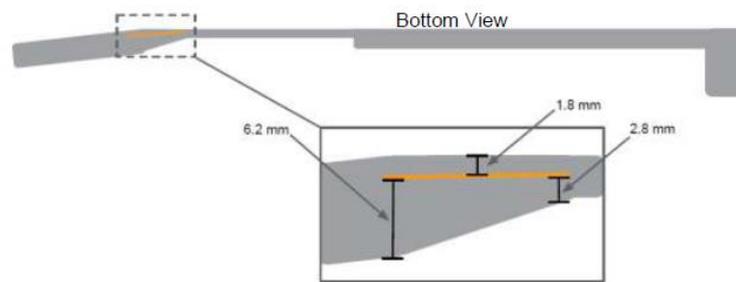
Estes dispositivos de tipo portátil (*Wearable Device*), aplicam tecnologias de realidade aumentada e apresentam a primeira interface móvel da história. Propõem uma nova forma de interagir com informação. A sua operação é baseada em tecnologia sem fio e para isso utiliza a banda industrial, científica e medica (ISM). O objetivo da avaliação deste dispositivo é tentar simular a SAR da antena presente no aparelho.

A Comissão Federal de Comunicações (FCC) é o órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos Estados Unidos. Empresas como Anatel (Brasil) e Anacom (Portugal) costumam se orientar pelas normativas empregadas na FCC em conjunto com a IEEE que avaliam os limites de SAR. Todo o equipamento elétrico ou eletrônico produzido e comercializado nos Estados Unidos deve ter um registro na FCC e recebe um número chamado **FCCID**. Assim, no site da FCC este número pode ser pesquisado para a identificação de aparelhos e suas características. Segundo a publicação (report) expedida pela FCC com FCCID, A4R-X1, que contém as informações gerais do dispositivo e testes de SAR para as bandas de Wi-Fi e Bluetooth, as medidas reais e o posicionamento da antena do Google glass são as expostas na Figura 2.

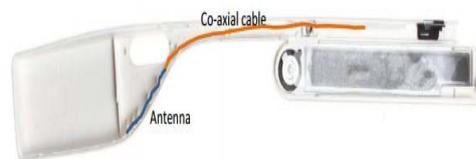
Fonte: Federal Communications Commission (FCC) <http://www.fcc.gov/>



(a)



(b)



(c)

**Figura 2 Posicionamento da Antena e dimensões do Google Glass: (a) vista superior, (b) vista inferior e (c) posicionamento da antena.**

## 4.2 MODELAMENTO DOS ÓCULOS

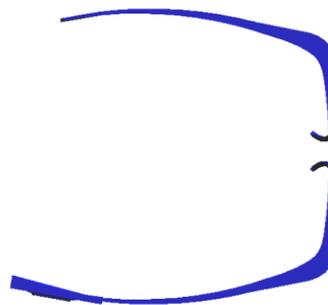
Tomando como base do projeto as medidas expostas na publicação do FCC, foi projetado o protótipo dos óculos no software AUTOCAD 3D e importados para o SEMCAD X. A versão 1.0 é mostrada na Figura 3.



(a)



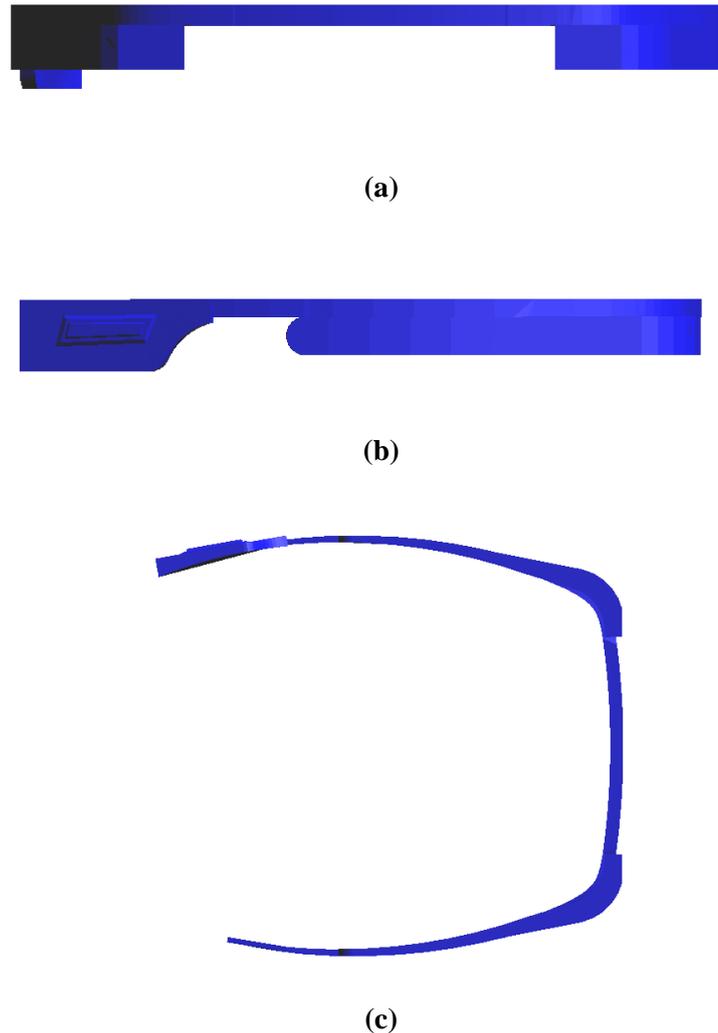
(b)



(c)

**Figura 3 Primeira versão do protótipo dos óculos: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) vista superior.**

Para otimizar a malha de discretização e melhorar o tempo de simulação foi necessário reduzir alguns detalhes dos óculos. Se retirou algumas bordas que ficavam com muitas curvaturas e detalhes cilíndricos, sem modificar a parte da exposição do elemento irradiante. A versão 2.0 dos óculos é mostrado na Figura 4.



**Figura 4 Protótipo dos óculos versão 2.0: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) vista superior.**

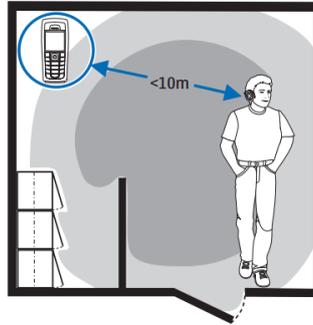
Para ajustar os óculos nas crianças, foi necessário diminuí-los numa escala apropriada para que pudessem se adaptar aos modelos.

#### **4.3 FONE DE OUVIDO SEM FIO COM TECNOLOGIA “*BLUETOOTH*”**

*Bluetooth* é o nome de uma tecnologia de comunicação sem fios (*wireless*) que interliga e permite a transmissão de dados entre computadores, telefones celulares, câmeras digitais e outros dispositivos através de ondas de rádio. Esta tecnologia permite conexão sem fio entre dispositivos que são compatíveis. Em se tratando de fones de ouvido, esta conexão não exige que o fone e o outro dispositivo se encontrem na mesma linha de visada (ver Figura 5). A distância máxima entre eles é 10 metros dependendo das especificações de cada

fabricante e o desempenho apresenta melhor performance se os dispositivos estiverem próximos.

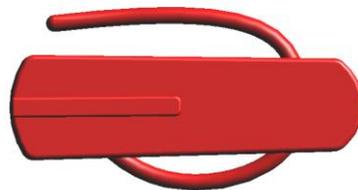
Fonte: Manual Nokia BH-112



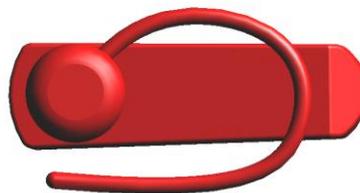
**Figura 5** Distância máxima entre o fone de ouvido sem fio “Bluetooth” e o telefone celular.

#### **4.4 MODELAMENTO DO PROTÓTIPO DE FONE DE OUVIDO “BLUETOOTH”**

Foi projetado um tipo de fone de ouvido “Handset” com tecnologia Bluetooth comercial Nokia BH-112 da atualidade. O fone de ouvido tem o posicionamento de sua antena na orelha do usuário. Na Figura 6 pode-se observar o dispositivo.



**(a)**



**(b)**

**Figura 6** Fone de ouvido com tecnologia Bluetooth (medidas padrões) com antena posicionada na orelha do usuário (a) lateral externa e (b) lateral interna.

#### 4.5 ELEMENTOS IRRADIADORES

Nesta seção serão apresentadas as antenas utilizadas para fazer as respectivas avaliações da Taxa de Absorção Específica (SAR) nos modelos heterogêneos e o SAM phantom.

#### 4.6 ANTENA PLANAR DE F-INVERTIDO

Uma antena pode ser definida como uma estrutura associada à região de transição entre uma onda guiada e onda no espaço livre, ou vice-versa (Bahl e Bhartia,1998). Para a análise do desempenho de uma antena é necessário primeiramente definir os principais parâmetros e suas propriedades como:

- Diretividade e ganho
- Largura de banda
- Polarização
- Coeficiente de reflexão

Em comunicações moveis, é grande a demanda de antenas miniaturizadas, devido aos espaços pequenos que disponibilizam a locação dos aparelhos. Nestas aplicações, as PIFAs (*Planar Inverted F Antenna*) são amplamente empregadas devido as suas vantagens construtivas como baixo custo, que reduzem e facilitam sua fabricação. Na Figura 7 é mostrada a dimensão da antena PIFA projetada (BALANIS, 2005) e na Tabela 2 são apresentadas suas principais características. A frequência central foi estabelecida de 2,45 GHz e seu coeficiente de reflexão simulado ( $S_{11}$ ) é exibido na Figura 8.

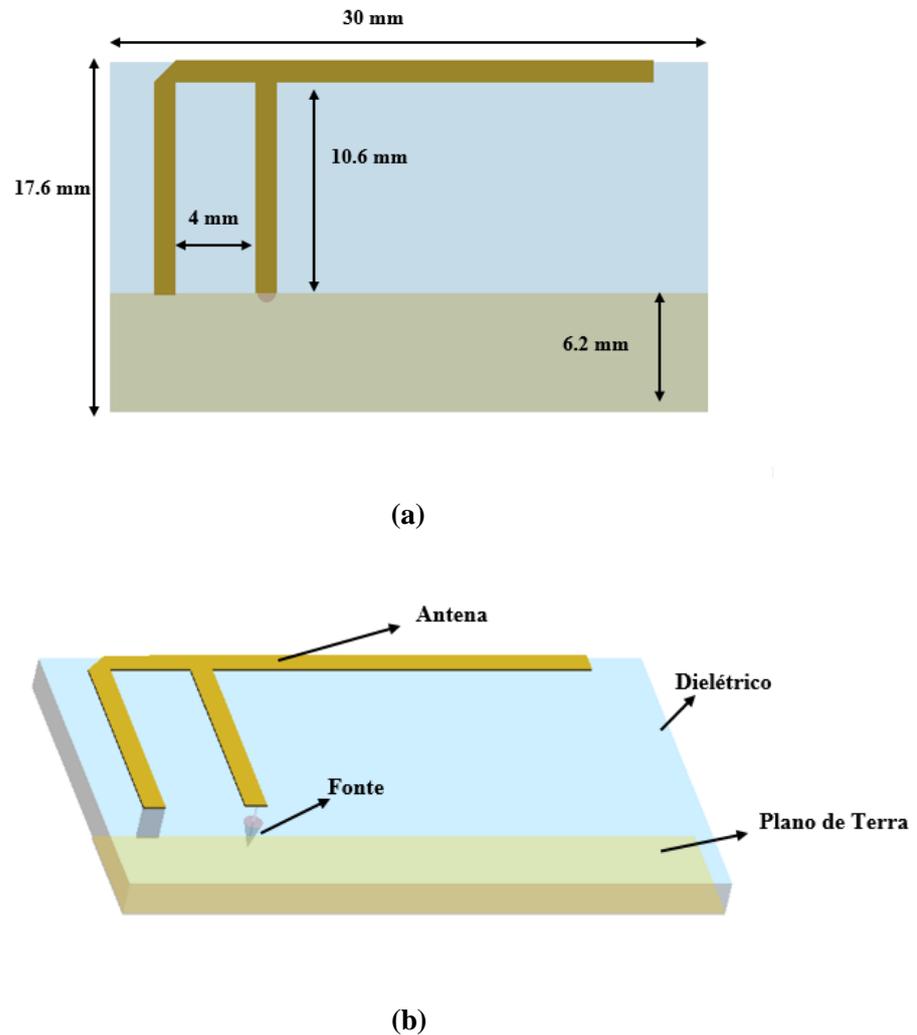
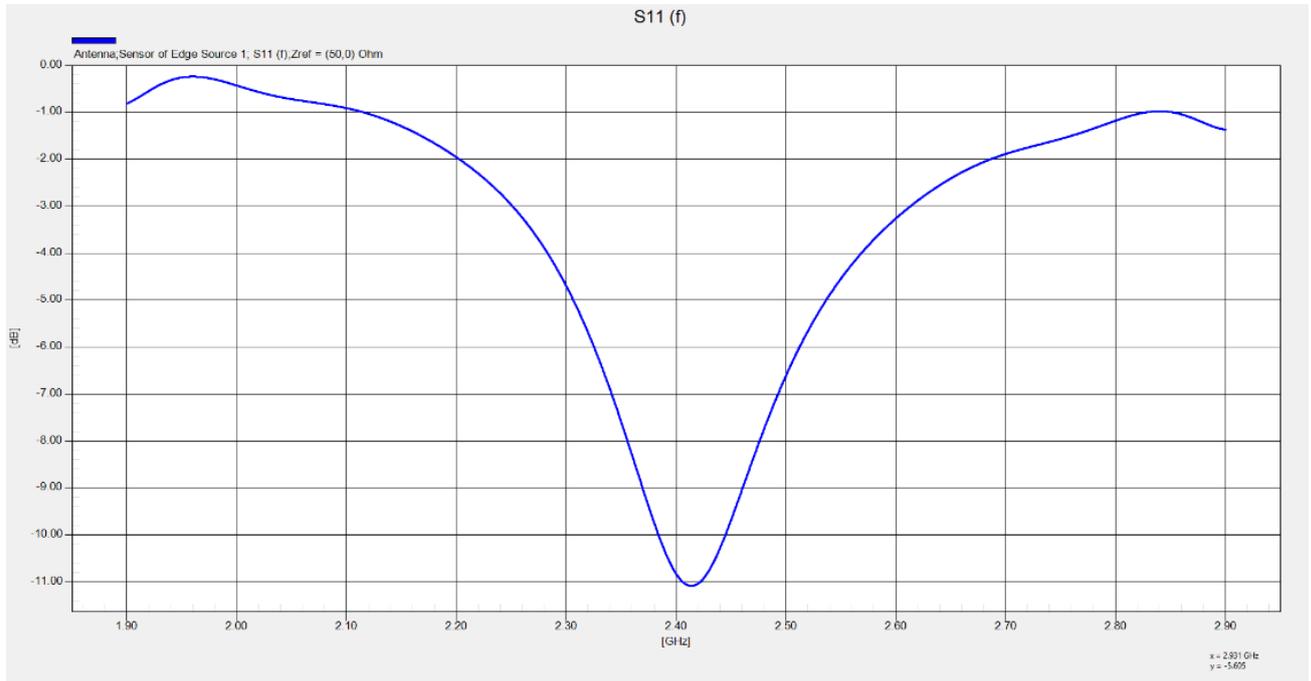


Figura 7 Antena Planar de F Invertido: (a) dimensões e (b) componentes.

Tabela 2. Características da antena PIFA

Permissividade relativa do dielétrico ( $\epsilon_r$ )	<b>2.0</b>
Condutividade equivalente ( $\sigma$ )	<b>0.0001 S/m</b>
Coefficiente de reflexão para 2.45 GHz ( $S_{11}$ )	<b>-10.77 dB</b>
Impedância característica ( $Z_0$ )	<b>45<math>\Omega</math></b>

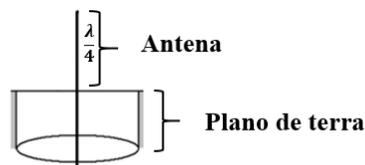
Fonte: SEMCAD X



**Figura 8 Coeficiente de Reflexão antena PIFA simulado.**

#### 4.7 ANTENA MONOPOLO DE QUARTO DE ONDA ( $l = \frac{\lambda}{4}$ )

O monopolo mais conhecido como “*Sleeve Dipolo*” é constituído basicamente de um plano condutor sobre o qual é colocado, perpendicularmente o elemento radiante (JASIK, 1961). A Figura 9 mostra a configuração básica do monopolo de  $\frac{\lambda}{4}$  projetado (JUNG *et al*, 2014).

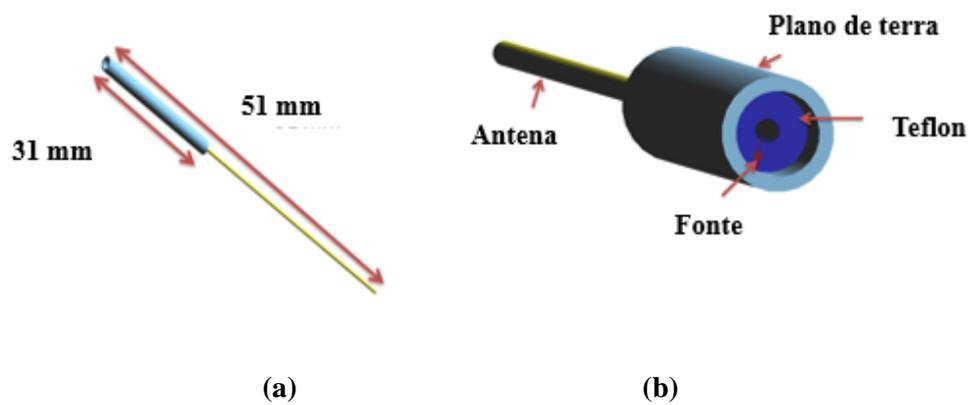


**Figura 9 Antena monopolo**

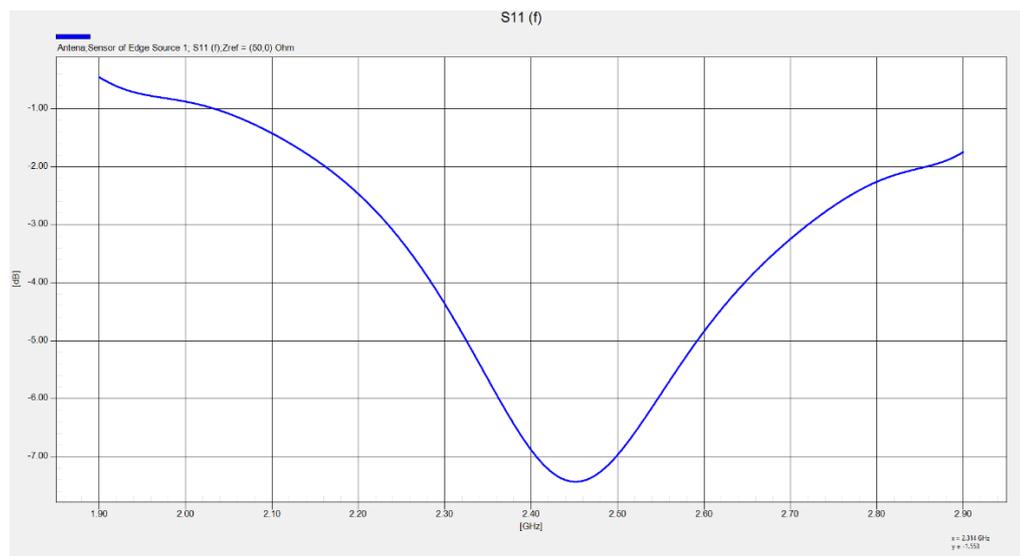
A frequência estabelecida para o monopolo foi 2,45 GHz e suas características são mostradas na Tabela 3. Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas a antena e o coeficiente de reflexão  $S_{11}$ .

**Tabela 3. Características do monopolo**

Permissividade relativa do dielétrico ( $\epsilon_r$ )	<b>2.08</b>
Condutividade equivalente ( $\sigma$ )	<b>0.0001 S/m</b>
Coefficiente de reflexão para 2.45 GHz ( $S_{11}$ )	<b>-8 dB</b>
Impedância característica ( $Z_0$ )	<b>38<math>\Omega</math></b>

**Figura 10 Antena monopolo projetada: (a) dimensões e (b) componentes.**

Fonte: SEMCAD X

**Figura 11 Coeficiente de Reflexão monopolo simulado.**

## 4.8 MODELOS DE CABEÇAS

Os modelos de cabeças (homogêneo e heterogêneos) e suas principais características são apresentados a seguir.

### 4.8.1 MANEQUIM ANTROPOMÓRFICO ESPECIFICO (SAM PHANTOM)

A norma (IEEE 1528,2003) usa um modelo simplificado da cabeça humana para determinar o valor do pico médio da SAR gerada por equipamentos de comunicação na faixa de 300 MHz aos 3 GHz e fornece uma estimativa conservadora dos valores médios máximos da SAR durante o uso normal dos aparelhos. O SAM Phantom (Figura 12) foi definido como o modelo padrão da cabeça humana que cobrisse a maior parte da população humana, independentemente da idade e possui características padronizadas quanto ao tamanho, forma e parâmetros equivalentes dos tecidos. É formado por cabeça e cobertura exterior e fornece um valor médio das características dielétricas dos tecidos presentes numa cabeça humana adulta. Os parâmetros dielétricos do modelo (LI LI *et al*, 2010) para a frequência de trabalho são apresentados na Tabela 4.



**Figura 12 SAM phantom**

Tabela 4. Parâmetros dielétricos do SAM phantom

Parâmetro do material	Permissividade Relativa ( $\epsilon_r$ )	Condutividade Equivalente ( $\sigma$ )
Cabeça modelo SAM @2,4 GHz	39	1,89 [S/m]
Cobertura modelo SAM @2,4G Hz	5	0,0125 [S/m]

#### 4.8.2 MODELOS DE CABEÇA HETEROGÊNEOS

Três modelos heterogêneos anatomicamente derivados de imagens de ressonância magnética (*MRI*) ou de tomografias computacionais (*CT*) foram empregados no estudo. Um adulto de 34 anos e duas crianças de 6 e 10 anos de idade são mostrados na Figura 13.

Fonte: SALLES, A. A. A.; BULLA G.; FERNANDEZ, C.



(a) Adulto de 34 anos



(b) Criança de 6 anos



(c) Criança de 10 anos

Figura 13 Modelos Heterogêneos: (a) cabeça de Adulto, (b) cabeça de criança de 6 anos e (c) cabeça de criança de 10 anos.

A determinação dos níveis de exposição à radiação EM é baseada no conhecimento das características dielétricas dos tecidos biológicos. A partir da permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) e da condutividade equivalente ( $\sigma$ ) é possível estimar, em frequência RF, os níveis de energia eletromagnética EM absorvidos nos tecidos biológicos (COSTA *et al*, 2011).

Devido à grande complexidade do corpo humano, os órgãos reguladores e os centros de pesquisa e desenvolvimento, ainda continuam realizando estudos para caracterizar os tecidos. Na atualidade a FCC disponibiliza um banco de dados com várias propriedades dielétricas dos tecidos humanos (FCC, 2009). Na Tabela 5 são apresentadas estas propriedades dielétricas dos tecidos de uma cabeça heterogênea.

Fonte: Federal Commission Communications <http://www.fcc.org>

**Tabela 5. Parâmetros dielétricos da cabeça heterogênea @2,45 GHz**

<b>Parâmetro</b>	<b>Permissividade Relativa (<math>\epsilon_r</math>)</b>	<b>Condutividade Equivalente (<math>\sigma</math>) [S/m]</b>
Gordura	5,28	0,10455
Osso	11,381	0,3943
Matéria cinza	48,911	1,8077
Matéria branca	36,670	1,215
Líquido cerebral	66,243	3,4578
Musculo	52,729	1,7388
Humor aquoso	68,208	2,4781
Pele	38,007	1,464
Cristalino	44,625	1,504
Esclera	52,628	2,0332
Humor vítreo	68,208	2,4781
Medula	30,45	1,0886
Nervo	30,145	1,0886

#### **4.9 RECURSOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS**

Neste trabalho foi utilizado um ambiente de simulação 3D com o software SEMCAD X num computador equipado com processador Intel Core i5 3470 @ 3,4 GHz fornecido com 32 GB de memória RAM, uma placa Nvidia Tesla C1060 e sistema operacional Windows 7 Professional x64. Além disso a maior parte das 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.

## 5. DOSIMETRIA

A análise de dosimetria desenvolvida ao longo do trabalho é mostrada neste capítulo. O objetivo das simulações é testar os dispositivos projetados no SEMCAD X com os modelos e realizar estudos modificando os parâmetros dielétricos dos modelos.

### 5.1 DISTÂNCIA MÍNIMA DO ELEMENTO IRRADIADOR COM RESPEITO À CABEÇA DO USUÁRIO

Devido as propriedades anatômicas e fisiológicas, a distância entre o tecido exposto e o elemento irradiador, cada um dos modelos pode apresentar uma distância diferente, dependendo das dimensões e do formato da cabeça. Na Tabela 6 são apresentadas as distancias mínimas entre os modelos das cabeças e os elementos irradiadores.

**Tabela 6. Distância mínima**

<b>Modelo anatômico e dispositivo</b>	<b>Posição entre o elemento irradiador e a cabeça [mm]</b>
6 anos protótipo óculos e monopolo	9
6 anos protótipo óculos e PIFA	9,8
6 anos protótipo fone e PIFA	25,5
10 anos protótipo óculos e monopolo	6,95
10 anos protótipo óculos e PIFA	9,51
10 anos protótipo fone e PIFA	33
34 anos protótipo óculos e monopolo	3,32
34 anos protótipo óculos e PIFA	5
34 anos protótipo fone e PIFA	19,38
SAM protótipo óculos e monopolo	5,32
SAM protótipo óculos e PIFA	7
SAM protótipo fone e PIFA	39

## 5.2 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS TECIDOS DIELÉTRICOS NAS CRIANÇAS

Um dos principais fatores necessários nos estudos de dosimetria para realizar a avaliação da exposição de pessoas a campos eletromagnéticos (CEM) são as propriedades dielétricas dos diferentes tecidos que determinam a interação destes campos com o corpo humano. Estas propriedades são dependentes da frequência e apresentam mudanças sistemáticas devido ao estado fisiológico dos tecidos.

Nos últimos anos, os dados da literatura consistiram principalmente no uso das propriedades dielétricas de tecidos de animais apresentadas por (GABRIEL *et al.*, 1996), geralmente utilizados para simular modelos adultos da cabeça e do corpo humano. Devido à preocupação considerável sobre as possíveis diferenças entre a exposição de crianças e adultos a campos eletromagnéticos, o foco de muitos estudos foi deslocado para o desenvolvimento de modelos de cabeça e corpo das crianças. Para fornecer dados das propriedades dielétricas relevantes para os modelos infantis, vários estudos têm sido realizados sobre as propriedades dielétricas de tecidos animais a partir das idades apresentadas por (PEYMAN *et al.*, 2001, 2007; SCHMID e BERBACHER, 2005; PEYMAN e GABRIEL, 2010). Estes estudos têm desencadeado discussões sobre a variação de dados dielétricos em função da idade, e como estes afetam os resultados de estudos de dosimetria, e consequentemente as possíveis implicações para a exposição das crianças a dispositivos de comunicação sem fio. Outros estudos também examinaram o efeito de alterações nas propriedades dielétricas em função da idade usando parâmetros de adultos ajustados para os tecidos mais jovens, assumindo maior quantidade de água (KESHVARY *et al.*, 2006;.. WANG *et al.*, 2006;.. DIMBYLOW *et al.*, 2010).

## 5.3 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DEPENDENDO DA IDADE – ESTUDO MTHR

Um estudo foi realizado como parte do programa do Reino Unido “Mobile Telecommunication Health Research” (MTHR). O principal objetivo do estudo foi revisar a literatura e analisar dados experimentais adquiridos a partir de medições em animais "ao vivo" em frequências de micro-ondas. O estudo também teve como objetivo identificar as diferentes fontes aleatórias e sistemáticas dos erros associados às medidas dielétricas e desenvolver um procedimento para avaliar a incerteza total das propriedades dielétricas. Esta permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade equivalente ( $\sigma$  [S/m]) foram coletadas nos tecidos de suínos vivos (substituto animal para o tecido humano), com a finalidade de realizar a comparação

com as informações do banco de dados de 1996, que eram em sua maioria derivados de medições em tecido suíno “excisado” (PEYMAN *et al.*, 2005, 2007).

Em (PEYMAN *et al.*, 2009) foram realizados estudos com porcos, modificando os parâmetros dielétricos nos tecidos (Tabela 5) para 2,45 GHz. Um porco de 10 quilogramas que tem menos de 30 dias de idade, correspondeu a uma criança de 1-4 anos. Os porcos de 50 quilogramas com mais ou menos 100 dias de idade foram assumidos como crianças de 11-13 anos e finalmente os porcos de 250 quilogramas, totalmente maduros, foram considerados como adultos de mais de 23 anos.

Os tecidos que apresentaram maior variação nestes estudos são expostos na Tabela 7.

Fonte: PEYMAN *et al.*, 2009.

**Tabela 7. Tecidos com maior e menor variação em função da idade**

<b>Tecidos com maior variação dependendo da idade</b>	<b>Tecidos com menor variação dependendo da idade</b>
Gordura	Matéria cinza
Ossos	Córnea
Matéria branca	Língua
Pele	-

Para realizar o estudo dosimétrico, os tecidos escolhidos foram a gordura, os ossos, a matéria branca e a pele. Na Tabela 8 são apresentados os valores numéricos de medidas de condutividade equivalente e permissividade relativa para as três categorias de tecidos animais.

Fonte: PEYMAN *et al.*, 2009.

**Tabela 8. Medidas de permissividade relativa e condutividade equivalente de envelhecimento suíno @2.45 GHz.**

<b>Tecido</b>	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$
Gordura	13,9	0,45	12,5	0,38	5,6	0,13
Ossos	38,3	1,45	31,8	1,22	17,4	0,61

Matéria branca	37,7	1,21	32,2	1,05	27,1	0,90
Pele	42,4	1,52	41,2	1,5	34,2	1,24

#### 5.4 VARIAÇÃO ALEATÓRIA NAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS EM FUNÇÃO DA IDADE USANDO PARÂMETROS DE ADULTOS AJUSTADOS PARA OS TECIDOS MAIS JOVENS

As propriedades dielétricas dos tecidos em frequências acima de 100 MHz são determinados por os eletrólitos intracelulares, principalmente de água (solução salina de 0,90%). Nas frequências de micro-ondas, as propriedades dielétricas podem ser essencialmente atribuídas ao conteúdo de água e dispersão da idade de forma substancial.

Segundo (FEIN *et al*, 1978) a mielinização é a formação de mielina no axônio do neurônio que permite que todas as conexões entre um neurônio e outro sejam mais rápidas. Esta mielinização é produzida principalmente nos primeiros anos de idade (HOLLAN *et al*, 1986). Diferentemente do líquido intercelular, a mielina não contém íons livres. Isto indica que se a quantidade de mielina aumenta no cérebro, vai resultar uma redução na concentração de íons e em consequência se tem uma diminuição da condutividade elétrica global do tecido cerebral. Tudo isto é produzido ao longo do desenvolvimento precoce (5-6 meses de nascimento) e tem poucas mudanças desde aquele momento. É importante conhecer que o conteúdo de água corporal total (TBW) entre diferentes indivíduos pode variar e os tecidos com maior TBW são mais condutivos.

Segundo (KESHVARI *et al*, 2005) estudos de dados coletados de TBW publicados para crianças de diferentes idades mostram uma diminuição inicial depois do nascimento e posteriormente um TBW relativamente constante (após o primeiro ano de idade). Por conseguinte, segundo este autor, pode-se concluir que a condutividade nos tecidos das crianças deixa de decrescer depois da infância.

Estudos numéricos assumem os mesmos parâmetros dielétricos para modelos de cabeças de crianças e adultos nos cálculos da SAR. Estes resultados têm sido muito criticados por pesquisadores devido que os órgãos das crianças não se encontram totalmente desenvolvidos, sua anatomia é diferente e o TBW na composição do tecido é maior. A abordagem apresentada por (KESHVARI *et al*, 2006) estuda as possíveis variações da taxa de absorção específica na região da cabeça incrementando os valores de permissividade relativa e condutividade equivalente desde 10% até 20% com variações de + 10% e + 20%. Em primeiro lugar aumenta somente a condutividade e, em seguida, aumenta tanto a condutividade e permissividade simultaneamente.

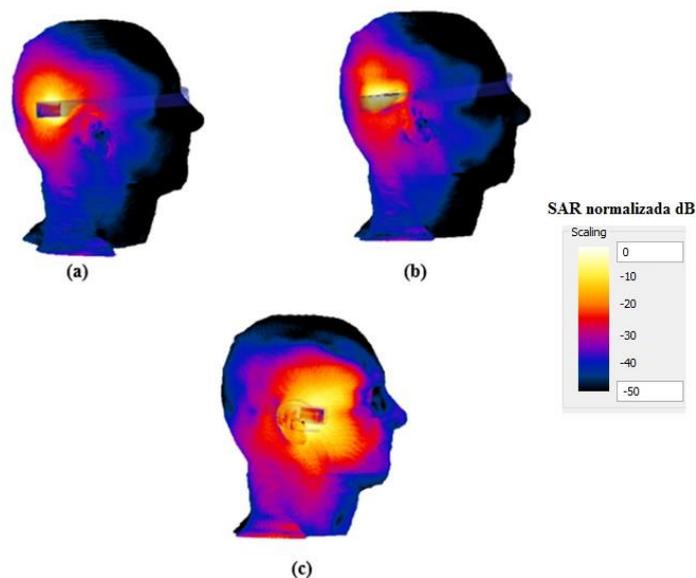


## 6. ANÁLISE DE RESULTADOS DA SAR E DOSIMETRIA

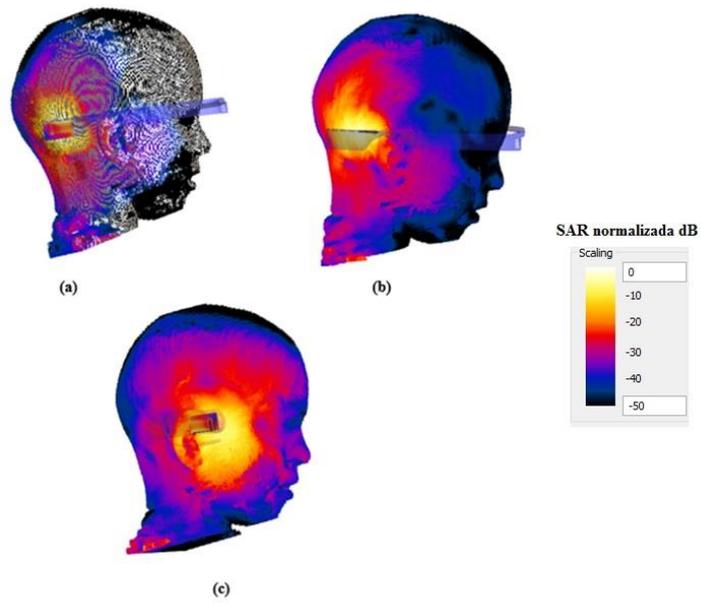
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das simulações da dosimetria, utilizando os dispositivos com os quatro modelos anatômicos de cabeças descritos no capítulo 2. Os valores da SAR local apresentados em W/kg do SEMCAD X foram extraídos usando a ferramenta *SAR Statistics (with Spatial Peak SAR [IEEE])* em cubos de massa de 1 g e 10 g. A potência normalizada usada nos dispositivos foi de 6 mW para o protótipo dos óculos e 1 mW para o protótipo do fone. Todas as simulações foram realizadas em banda larga “Broadband” com um tempo de simulação de 40 períodos para garantir o estado estacionário e a uma frequência de 2,45 GHz.

### 6.1 DISTRIBUIÇÃO TOTAL DE SAR NOS MODELOS HETEROGÊNEOS

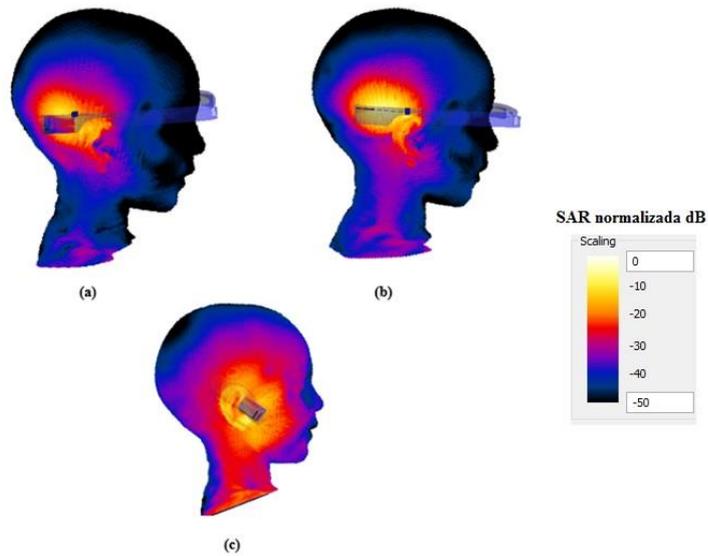
Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentadas as distribuições totais de SAR nos 4 modelos de cabeças utilizando os dispositivos com as diferentes antenas, observando-se que os tecidos mais próximos aos elementos irradiadores como a pele, gordura, osso e matéria branca são os que mostram a maior concentração de campo. Além disso pode-se observar que a PIFA com o dispositivo Bluetooth provoca maior exposição.



**Figura 14 Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 34 anos (Duke): (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone.**



**Figura 15** Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 10 anos: (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone.



**Figura 16** Distribuição de SAR no modelo heterogêneo de 6 anos: (a) PIFA com protótipo dos óculos, (b) monopolo com protótipo dos óculos e (c) PIFA com protótipo do fone.

É importante ressaltar que (ICNIRP,1998) considera somente curtos períodos de exposição.

## 6.2 RESULTADOS DE SAR PARA O SAM PHANTOM E OS MODELOS HETEROGÊNEOS USANDO PARÂMETROS DE ADULTOS

O primeiro estudo de dosimetria para calcular a distribuição total de SAR foi realizado usando os mesmos parâmetros dielétricos apresentados por (GABRIEL *et al*, 1996) em todos os modelos de cabeças heterogêneas. Nas Tabelas 9, 10 e 11 são apresentadas estimativas de valor pico espacial de SAR local para 10g e 1g nos diferentes dispositivos com suas respectivas antenas. Pode-se observar que nenhum dos resultados de psSAR obtido supera os limites das regulamentações apresentadas no item 3.5.

**Tabela 9. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de Gabriel no protótipo dos óculos com o monopolo. Potência normalizada: 6 mW. @2,45 GHz.**

<b>Protótipo dos óculos com o monopolo</b>			
	<b>Distancia [mm]</b>	<b><math>psSAR_{1g}</math> [W/kg]</b>	<b><math>psSAR_{10g}</math> [W/kg]</b>
6 anos	9,0	0,27	0,13
10 anos	6,9	0,30	0,11
34 anos	3,3	0,33	0,15
SAM Phantom	5,3	1,01	0,25

**Tabela 10. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de uma pessoa adulta protótipo dos óculos com a PIFA. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz.**

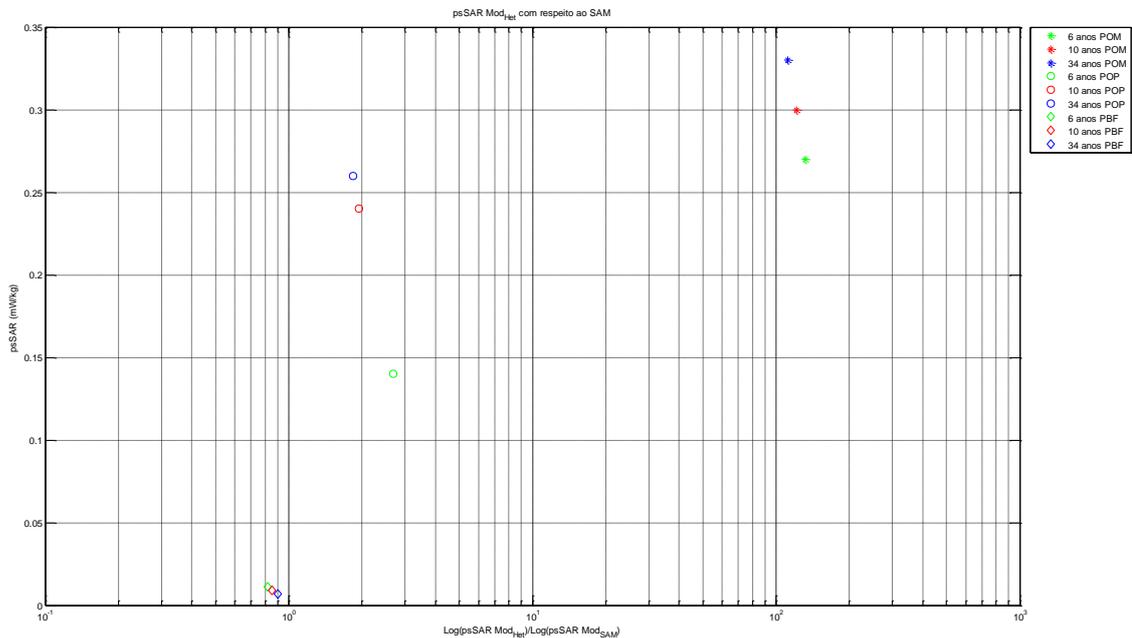
<b>Protótipo dos óculos com a PIFA</b>			
	<b>Distancia [mm]</b>	<b><math>psSAR_{1g}</math> [W/kg]</b>	<b><math>psSAR_{10g}</math> [W/kg]</b>
6 anos	9,8	0,14	0,07
10 anos	9,5	0,24	0,11
34 anos	5,0	0,26	0,14
SAM Phantom	7,0	0,48	0,21

**Tabela 11. Comparação da distribuição de psSAR para os três modelos heterogêneos utilizando parâmetros de uma pessoa adulta protótipo do Bluetooth com a PIFA. Potência normalizada: 1 mW. @2.45 GHz.**

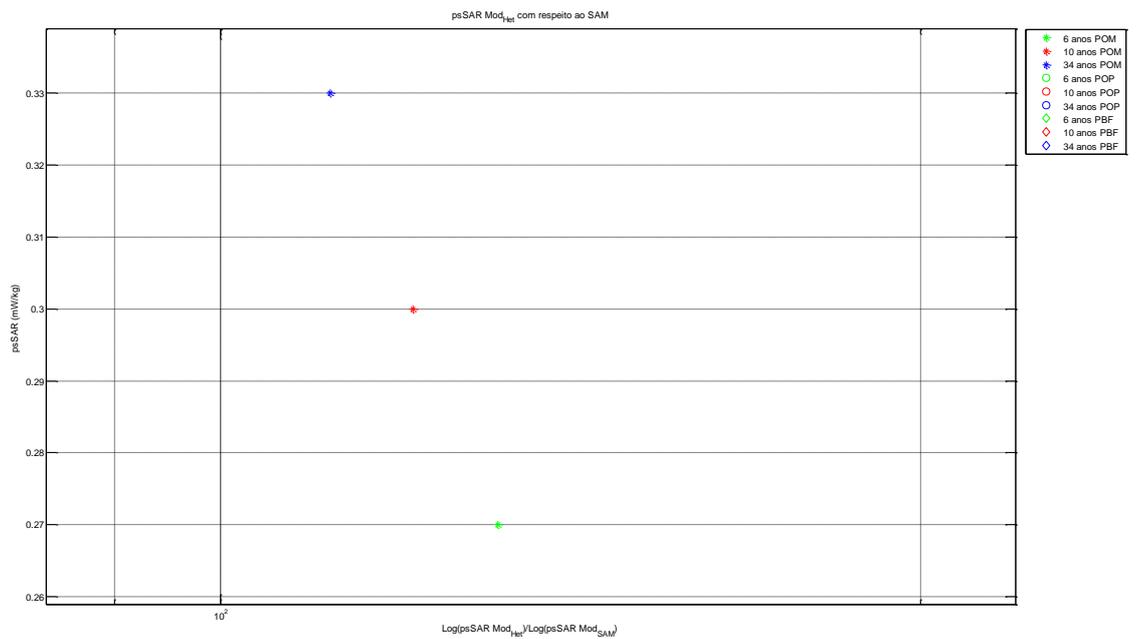
<b>Protótipo do Bluetooth com a PIFA</b>			
	<b>Distancia [mm]</b>	<b><math>psSAR_{1g}</math> [W/kg]</b>	<b><math>psSAR_{10g}</math> [W/kg]</b>
6 anos	25,5	0,011	0,003
10 anos	33,0	0,009	0,004
34 anos	19,38	0,007	0,003
SAM Phantom	39,0	0,004	0,002

Na Figura 17 são apresentadas as distribuições numa escala logarítmica com respeito ao SAM phantom com a finalidade de obter um resultado mais próximo entre cada resultado.

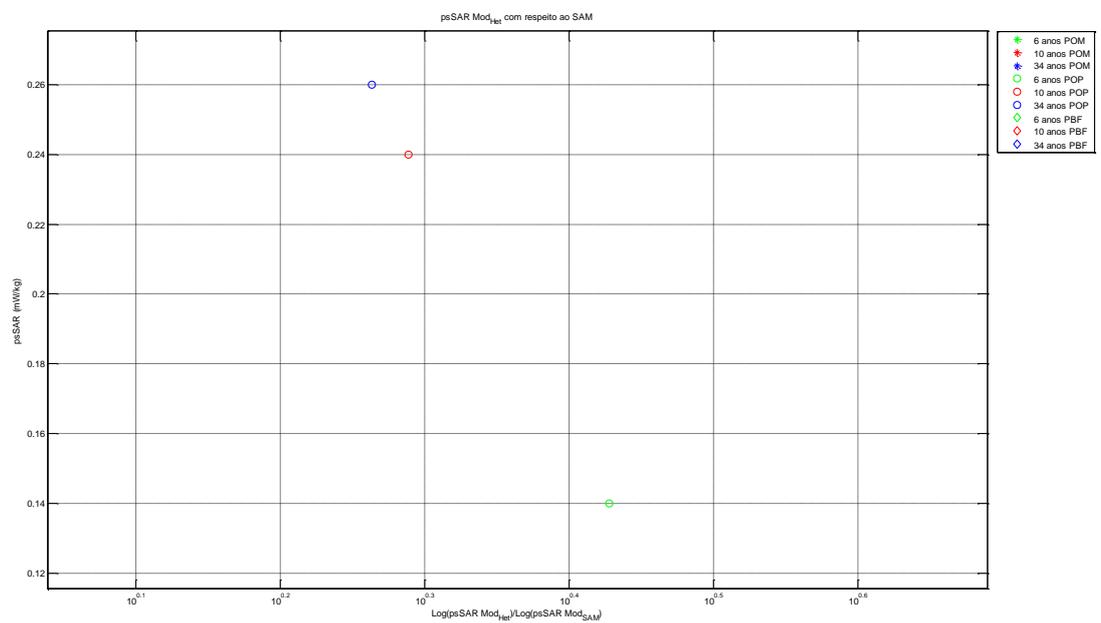
Fonte: MATLAB



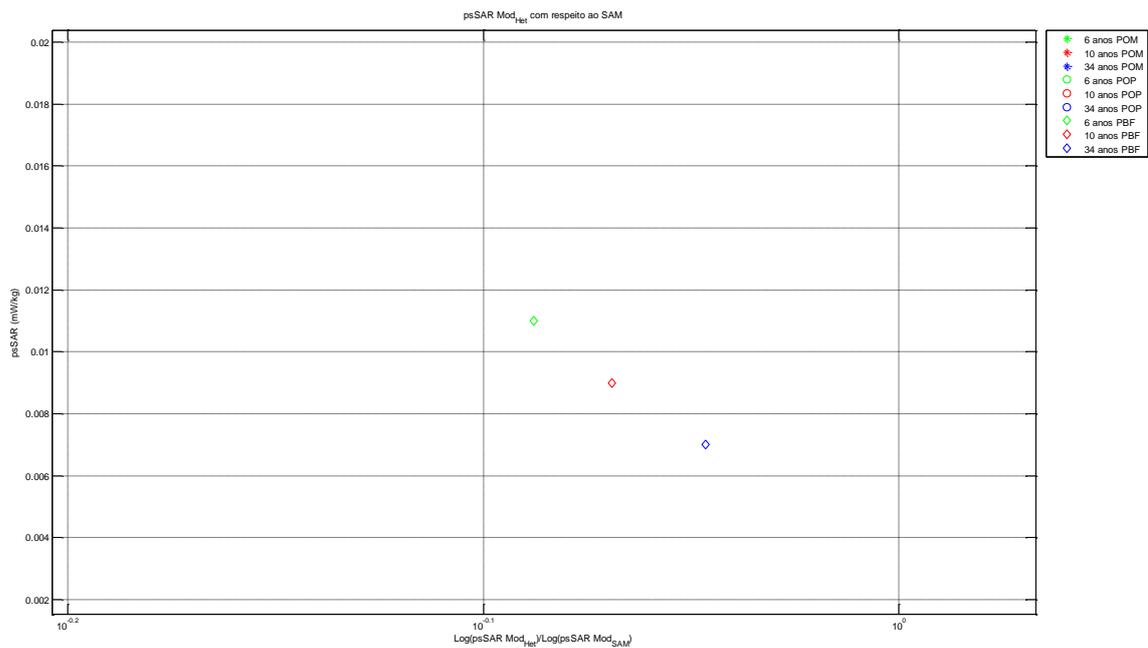
**(a) psSAR total apresentado por todos os modelos heterogêneos.**



**(b) psSAR total nos modelos heterogêneos usando o protótipo dos óculos com a antena monopolo (POM).**



**(c) psSAR total nos modelos heterogêneos usando o protótipo dos óculos com a antena PIFA (POP).**



**(d) psSAR total nos modelos heterogêneos usando o protótipo do Bluetooth com a antena PIFA (PBF).**

**Figura 17 psSAR total nos modelos heterogêneos usando os protótipos.**

Apesar de ter estas diferenças pode-se observar que a crianças ficam mais afastadas das antenas e ainda apresentam valores de psSAR elevados e perto do modelo de 34 anos.

### **6.3 RESULTADOS DE SAR USANDO A ABORDAGEM APRESENTADA POR PEYMAN**

Usando os parâmetros dielétricos modificados por (PEYMAN et al, 2009) apresentados na Tabela 8, foram realizadas simulações no SEMCAD X para os modelos de crianças de 6 e 10 anos com a finalidade de avaliar os tecidos mais relevantes e com variações significativas de psSAR. Em ordem de penetração, nas Tabelas 12, 13 e 14 na sequência são apresentados os resultados.

**Tabela 12. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo dos óculos com o monopolo. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz. Distancia da cabeça e a antena: 6 anos-9mm e 10 anos-6,95mm.**

	<b>Pele</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,2666	0,07922	0,2592	0,0723	0,2558	0,0743
10 anos	0,17900	0,02890	0,170660	0,02779	0,16641	0,0263
	<b>Gordura</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,0003812	0,0001026	0,0003256	0,000089	0,0001318	0,0000491
10 anos	0,03912	0,00769	0,0329	0,00707	0,018230	0,0040850
	<b>Ossos</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,1762	0,04695	0,1524	0,0423	0,090040	0,0271
10 anos	0,19655	0,0754	0,181011	0,0697	0,11839	0,0475
	<b>Matéria Branca</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,03536	0,01136	0,0336	0,0108	0,03310	0,0123
10 anos	0,05040	0,075400	0,044310	0,019840	0,040200	0,0186223

**Tabela 13. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo dos óculos com a PIFA. Potência normalizada: 6 mW. @2.45 GHz. Distancia da cabeça e a antena: 6 anos-9,8 mm e 10 anos-9,5 mm.**

	<b>Pele</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,1569	0,055600	0,1445	0,053290	0,1358	0,0522
10 anos	0,23221	0,013100	0,2320	0,01206	0,0221	0,01114
	<b>Gordura</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,00003218	0,0001249	0,000027	0,000111	0,000002390	0,0001426
10 anos	0,0760	0,01212	0,0714	0,01125	0,03555	0,00630
	<b>Ossos</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,1033	0,034390	0,09232	0,03159	0,0569	0,0214
10 anos	0,204085	0,0764	0,1855	0,0710	0,11740	0,04936
	<b>Matéria Branca</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,0417	0,016720	0,03898	0,01599	0,0091	0,01611
10 anos	0,03780	0,0324	0,03513	0,012412	0,031770	0,012900

**Tabela 14. Valores de psSAR variando os valores de permissividade e condutividade nos tecidos mais relevantes dos modelos. Protótipo do Bluetooth com a PIFA Potência normalizada: 1 mW. @2.45 GHz. Distância da cabeça e a antena: 6 anos-25,5 mm e 10 anos-33 mm.**

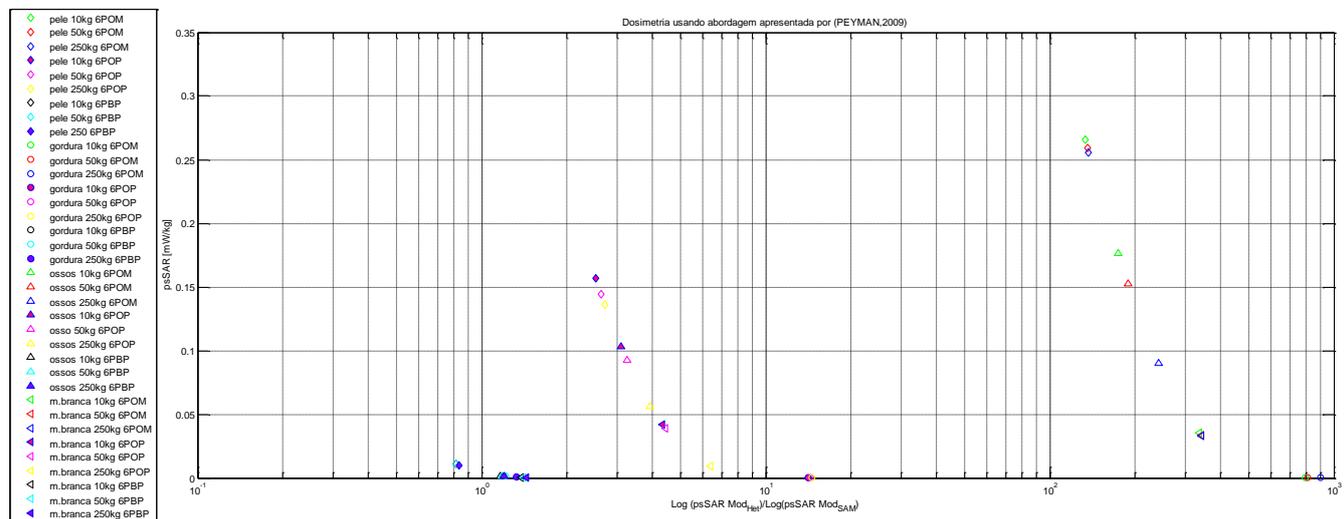
	<b>Pele</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,01130	0,00438	0,011286	0,00428	0,0101139	0,004070
10 anos	0,010161	0,0025190	0,010140	0,00248	0,009408	0,001700
	<b>Gordura</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,0014600	0,0006024	0,0012700	0,0004750	0,0006790	0,0003310
10 anos	0,0034300	0,0017800	0,003260	0,00170	0,002120	0,0011300
	<b>Ossos</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,001640	0,000791	0,001600	0,000713	0,0013043	0,0005590
10 anos	0,0029220	0,0013860	0,002650	0,00130	0,002241	0,0009450
	<b>Matéria Branca</b>					
	<b>10 kg</b>		<b>50 kg</b>		<b>250 kg</b>	
	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>1g</sub></i> [W/kg]	<i>psSAR<sub>10g</sub></i> [W/kg]
6 anos	0,000493	0,0001505	0,000445	0,0002539	0,0003540	0,0001540
10 anos	0,0009615	0,0004900	0,000895	0,000472	0,000797	0,0004210

Segundo (PEYMAN *et al*, 2009) é difícil encontrar uma relação entre as curvas de crescimento de humanos e porcos. Por isto, a exposição de os dois modelos heterogêneos das crianças foi realizada usando os três grupos de propriedades dielétricas.

O tamanho da malha não ultrapassou os 2 mm nas três dimensões para todas as simulações. Além disso o pico espacial de SAR (psSAR) tem sido determinado usando a potência máxima de cada dispositivo descrita ao início do capítulo. Para todos os casos o psSAR não excedeu as regulamentações internacionais (ICNIRP,1998).

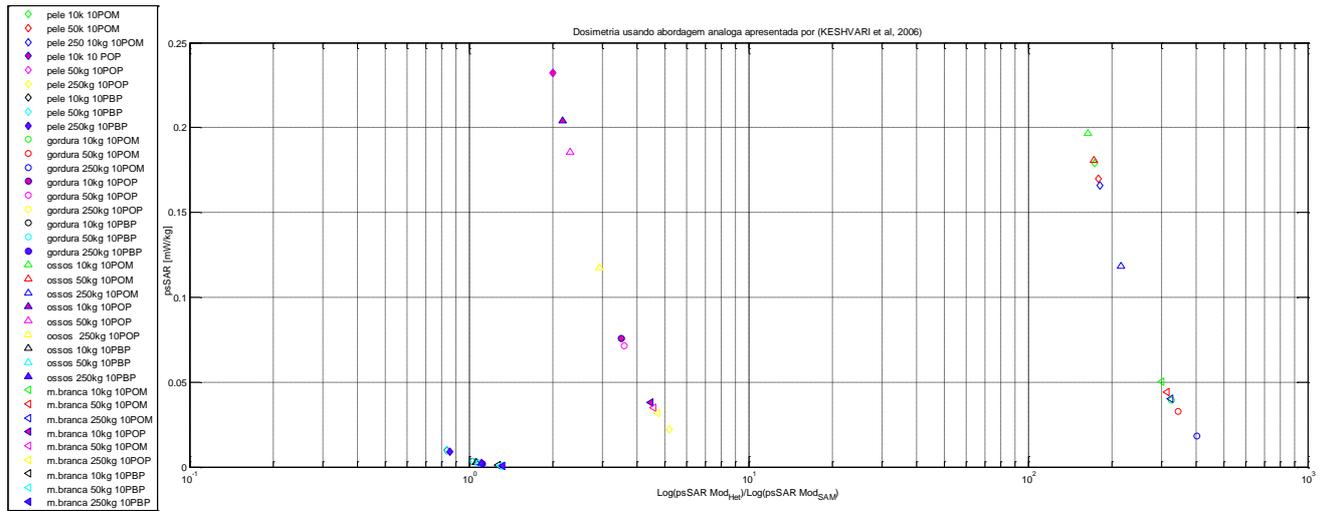
Nas Figura 18 e 19 são mostrados todos os resultados obtidos usando a abordagem análoga de (PEYMAN et all,2009).

Fonte: MATLAB



**Figura 18** Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 6 anos abordagem análoga Peyman (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).

Fonte: MATLAB



**Figura 19 Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 10 anos abordagem analoga Peyman (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).**

Além de ter distancias diferentes, a criança de 6 anos apresentou valores de psSAR mais alto do que o modelo de 10 anos. Não é fácil comparar os psSAR nos tecidos devido a quantidade de tecido que contem cada modelo, não obstante a pele e os ossos mostraram os maiores resultados de SAR. Entre outros porque são os tecidos mais superficiais.

Tomando como referência o valor de 10 Kg do suíno, foi possível calcular o aumento de psSAR para analisar os resultados em 1g de tecido da dosimetria nas crianças de 6 anos e 10 anos. Na Tabela 15 são apresentados aumentos de psSAR em 1g de tecido com a diminuição da idade do suíno em cada modelo de cabeça e seu respectivo dispositivo.

**Tabela 15. Aumento de psSAR 1g de tecido com a diminuição da idade do suíno em cada modelo (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).**

<b>Pele</b>			
	<b>POM <i>psSAR</i><sub>1g</sub></b>	<b>POP <i>psSAR</i><sub>1g</sub></b>	<b>PBP <i>psSAR</i><sub>1g</sub></b>
6 anos	4%	13%	8,9%
10 anos	7%	80%	7,5%
<b>Gordura</b>			
6 anos	65%	25%	53%
10 anos	53%	53%	38%
<b>Ossos</b>			
6 anos	48%	45%	20%
10 anos	39%	42%	23%
<b>Matéria Branca</b>			
6 anos	6%	78%	28%
10 anos	20%	16%	17%

Em (PEYMAN et al, 2009) a maior variação nas propriedades foi apresentada nos ossos para dois modelos heterogêneos de 3 e 7 anos de idade. Em nossa pesquisa foram avaliados os resultados nos modelos de criança separadamente devido às alterações de distancias do dispositivo em cada modelo.

Tomando como referência o valor de 10 Kg, o aumento nos valores de psSAR na pele da criança de 6 anos foi de 13,44% usando o protótipo com os óculos e a antena PIFA. Na gordura, os resultados indicaram valores mais pequenos de SAR, não obstante o aumento nos óculos com o monopolo e O Bluetooth foi de mais de 50%, mostrando que para os parâmetros de 10 Kg, a penetração é bem maior para a criança. Os valores da SAR nos ossos também foram grandes e o aumento de psSAR foi dado pelo protótipo dos óculos e o monopolo (48,8%) e os óculos com a PIFA (44,91%). Na Matéria Branca o aumento de SAR nos óculos e a PIFA foi de 78% com a diminuição da idade.

A criança de 10 anos apresentou um aumento de psSAR na pele com o protótipo dos óculos com a PIFA de cerca de 90%. Na gordura os valores de diminuição de SAR foram

evidenciados pelos óculos com o monopolo (65%) e o Bluetooth (53%). Nos ossos os óculos com o monopolo e a PIFA mostraram um aumento de 48% e 55% respectivamente. Finalmente a Matéria Branca somente apresentou valores altos de psSAR para os óculos com a PIFA de um 78%.

#### **6.4 RESULTADOS DE SAR USANDO A ABORDAGEM APRESENTADA POR KESHVARI**

Segundo Keshvari, todas as pessoas são anatomicamente diferentes. O conteúdo de água dos corpos também pode diferir dependendo da proporção de gordura no corpo, o sexo e a idade, significando que um modelo de cabeça humana numa dimensão reduzida, não pode imitar corretamente a cabeça. Mesmo que existem grandes diferenças no tamanho, forma e distribuição dos tecidos na cabeça, segundo Keshvari a SAR é bastante similar.

Foi realizado um estudo dosimétrico nos modelos das crianças de 6 e 10 anos. Na Tabela 16, 17 e 18 são apresentados os resultados de psSAR com a variação dos parâmetros dielétricos utilizando os diferentes dispositivos.

**Tabela 16. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo dos óculos com monopolo @2.45 GHz.**

<b>Pele</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,35588	0,088749	0,35003	0,08605	0,3759500	0,093950	0,365067
10 anos	0,236534	0,040520	0,22453	0,038010	0,254308	0,04351	0,229700	0,038400
<b>Gordura</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0001052	0,0000436	0,0001039	0,0000427	0,00011270	0,0000461	0,0001087
10 anos	0,019060	0,0040520	0,01834	0,00402	0,020280	0,00451	0,018780	0,004072
<b>Ossos</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,065536	0,0202020	0,06528	0,019660	0,06904310	0,0211100	0,068900
10 anos	0,086970	0,03675	0,08667	0,036170	0,092554	0,0389	0,089180	0,037800
<b>Matéria Branca</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0045669	0,0023590	0,004544	0,002355	0,0046304	0,0122250	0,0045811
10 anos	0,045440	0,0210	0,04475	0,021530	0,046622	0,021315	0,0459430	0,022280

**Tabela 17. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo dos óculos com a PIFA @2.45 GHz.**

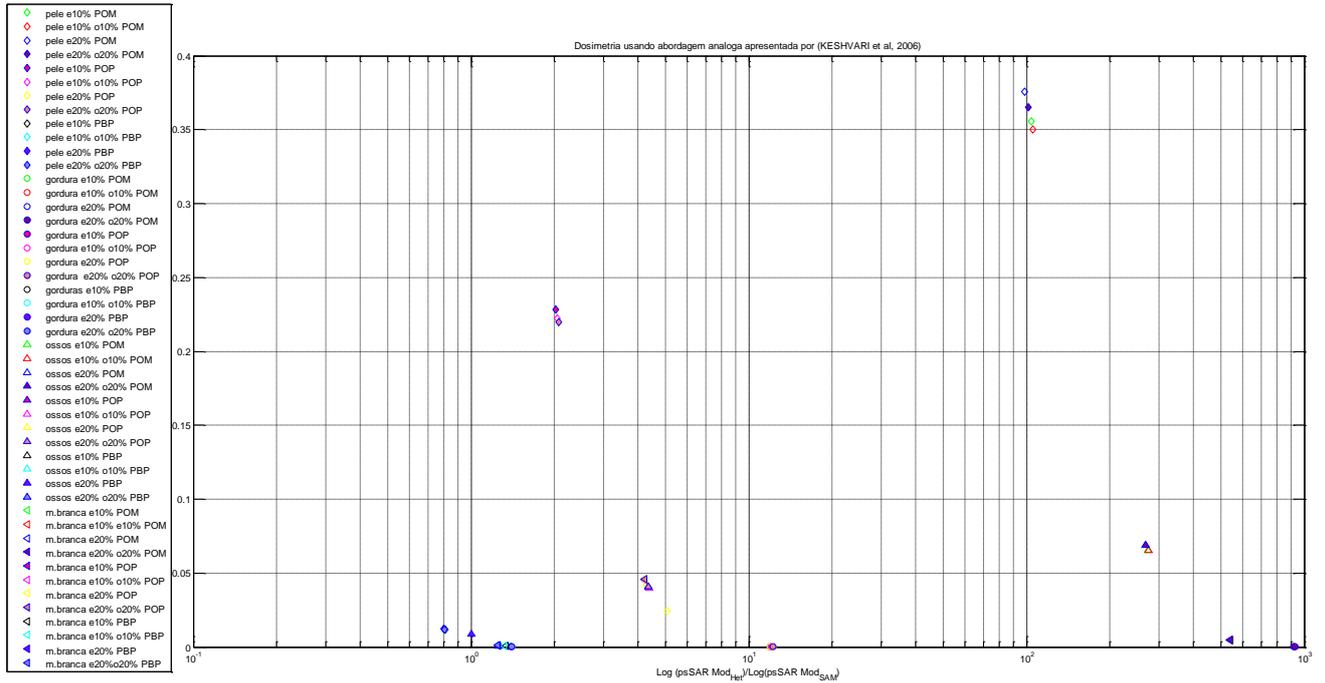
<b>Pele</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \ \epsilon r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \ \epsilon r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,228219	0,0695139	0,2222760	0,067242	0,242065	0,073757	0,2199080
10 anos	0,3308100	0,04975	0,319118	0,04725	0,355800	0,053200	0,33200	0,04829
<b>Gordura</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \ \epsilon r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \ \epsilon r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,000161705	0,0000562	0,0001540	0,0000539	0,00016226	0,00005800	0,0001300
10 anos	0,0370	0,00646	0,03591	0,00612	0,039750	0,006880	0,03741	0,00620
<b>Ossos</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \ \epsilon r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \ \epsilon r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0407128	0,154851	0,0400921	0,0149690	0,042928	0,0161916	0,0409343
10 anos	0,0913900	0,0398	0,09040	0,03921	0,097160	0,042100	0,09530	0,0410
<b>Matéria Branca</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \ \epsilon r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \ \epsilon r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,045918	0,019500	0,0456816	0,0201580	0,04598930	0,01891500	0,0456910
10 anos	0,0347100	0,017350	0,03490	0,01742	0,036117	0,017580	0,03644	0,017770

**Tabela 18. Valores de psSAR apresentados com a variação dos parâmetros dielétricos de 10% até 20%. Protótipo do Bluetooth com a PIFA @2.45 GHz.**

<b>Pele</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0115807	0,0046600	0,0117500	0,0002430	0,0123500	0,0049100	0,0118000
10 anos	0,0172000	0,004560	0,016600	0,0043700	0,01824	0,004800	0,017070	0,004400
<b>Gordura</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0004500	0,0002270	0,0004310	0,0001820	0,0004690	0,0002400	0,0004400
10 anos	0,0019200	0,001014	0,0018600	0,0009800	0,002010	0,0010500	0,001870	0,0009820
<b>Ossos</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0010200	0,0004210	0,0009420	0,0004030	0,0010300	0,0004280	0,0009640
10 anos	0,0020000	0,0007940	0,0019100	0,000782	0,002080	0,0008220	0,001910	0,0007990
<b>Matéria Branca</b>								
	$\sigma = 10\%$		$\sigma = 10\% \epsilon_r = 10\%$		$\sigma = 20\%$		$\sigma = 20\% \epsilon_r = 20\%$	
	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>1g</sub>	<i>psSAR</i> <sub>10g</sub>
	6 anos	0,0006210	0,0001700	0,0006120	0,0002243	0,000683	0,000334	0,000638
10 anos	0,000990	0,000496	0,0010300	0,000518	0,001016	0,0005040	0,0010180	0,0005501

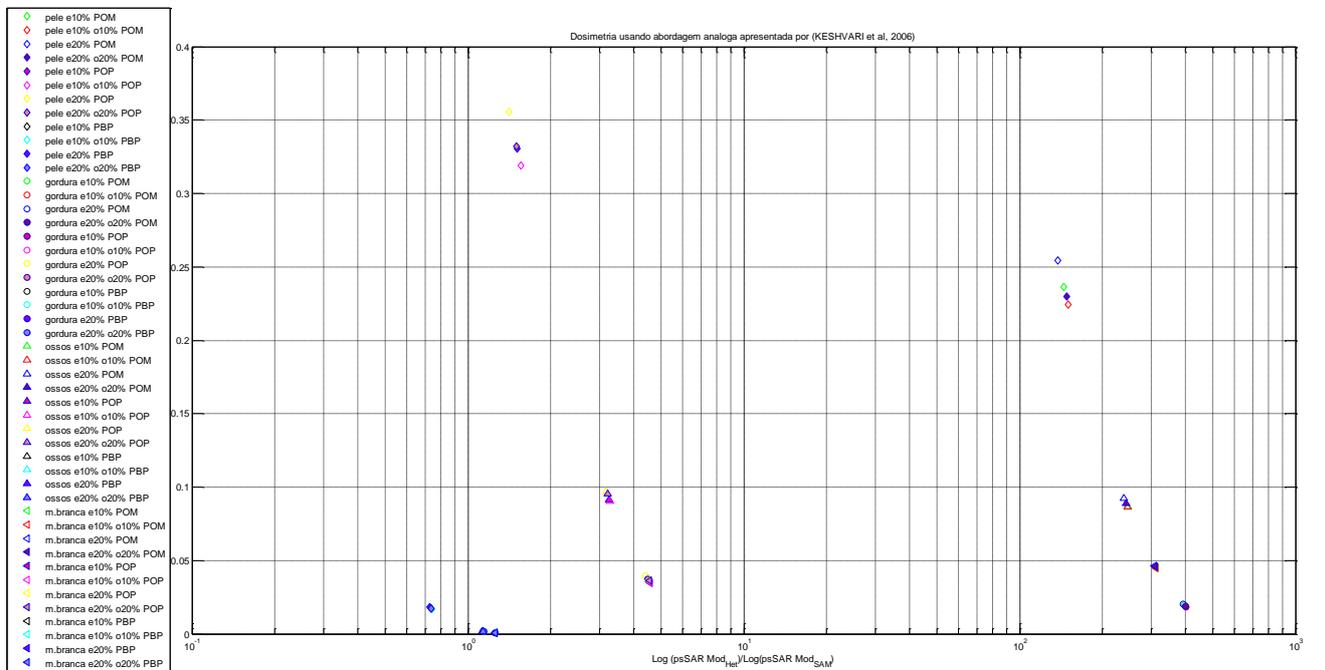
Nas Figura 20 e 21 são mostrados todos os resultados obtidos usando a abordagem análoga de (KESHVARI et al,2006).

Fonte: MATLAB



**Figura 20** Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 6 anos abordagem analoga Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).

Fonte: MATLAB



**Figura 21** Resultados apresentados em todos os tecidos estudados usando os protótipos na criança de 10 anos abordagem analoga Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).

Segundo Keshvari a variação de SAR por cerca de 20% e a análise do aumento dos parâmetros não aumentou os valores de psSAR. Nossa pesquisa mostrou os resultados apresentados a seguir quando são aumentados os parâmetros dielétricos.

Os maiores resultados de psSAR foram apresentados no momento de variar a condutividade para todos os casos estudados, sendo este o parâmetro mais importante na hora de mudar os valores dos tecidos.

Na Tabela 19 são mostrados os aumentos ou diminuições de psSAR uma abordagem análoga a Keshvari nos tecidos mais relevantes das crianças de 6 e 10 anos usando os protótipos com os diferentes dispositivos.

**Tabela 19. Aumento de psSAR 1g de tecido abordagem análoga a Keshvari (POM: protótipo óculos monopolo, POP: protótipo óculos PIFA, PBP: protótipo Bluetooth PIFA).**

<b>Pele</b>			
	<b>POM psSAR<sub>1g</sub></b>	<b>POP psSAR<sub>1g</sub></b>	<b>PBP psSAR<sub>1g</sub></b>
6 anos	6,8%	8,2%	4,8%
10 anos	11,7%	10,3%	8,7%
<b>Gordura</b>			
6 anos	7,2%	9,5%	7,4%
10 anos	9,7%	7,9%	8,1%
<b>Ossos</b>			
6 anos	5,3%	6,5%	8,5%
10 anos	6,3%	6,9%	8,1%
<b>Matéria Branca</b>			
6 anos	1,8%	0,66%	10,3%
10 anos	5,5%	3,3%	10,8%

Detalhando cada tecido separadamente, a pele, a gordura, os ossos e a matéria branca nos óculos com o monopolo na criança de 6 anos e tomando como referência o valor de psSAR do aumento da condutividade cerca de 10%, observou-se que nenhuma simulação mostrou um incremento na variação dos parâmetros dielétricos maior que 6% no psSAR, sendo que o valor mais alto de psSAR ocorreu com a condutividade aumentada de cerca de 20%. Na criança de 10 anos usando os óculos com o monopolo, os valores maiores foram

adquiridos pela pele e a gordura. Além disso, as variações das simulações de psSAR tomando como referência o valor de 10% na condutividade apresentadas nestes tecidos foram cerca de 7%.

O parâmetro que apresentou maior aumento de psSAR na criança de 6 anos foi a pele que mostrou um aumento de cerca de 5,7% na psSAR, tomando como base o valor da condutividade num 10%. Além disso o psSAR na gordura permaneceu estável crescendo somente cerca de 0,34%. Na criança de 10 anos a pele, a gordura e os ossos aumentaram seus valores de psSAR mais de 5% variando os valores de permissividade e condutividade equivalente de 10% a 20%, de acordo com o indicado nas figuras.

No estudo com o protótipo do Bluetooth, o maior aumento de psSAR foi apresentado pela matéria branca com um crescimento de 9% para a criança de 6 anos e 5,7% na pele da criança de 10 anos, tomando como referência o valor da psSAR com a condutividade aumentada cerca de 10%.

Observou-se que os tecidos mais próximos do dispositivo como a pele e os ossos obtiveram uma absorção mais alta em relação aos demais. Então, no caso do uso destes aparelhos por longo tempo de exposição, poderá causar danos em adultos e ainda maiores em crianças devido que foram os tecidos mais prejudicados no estudo, além de que os órgãos destes estão ainda em desenvolvimento.

## 7. MEDIDAS DOS DISPOSITIVOS

Neste capítulo são apresentadas as medições da intensidade de campo eletromagnético gerado por um dispositivo Bluetooth de uso comercial e um monopolo projetado.

### 7.1 MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO, POTÊNCIA E GANHO DAS ANTENAS

Na Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) foram realizadas medições de potência média e ganho de dois monopolos projetados e dois dispositivos Bluetooth comerciais com a finalidade de obter a potência transmitida pelo dispositivo Bluetooth.

### 7.2 CÂMARA ANECÓICA

A onda que é gerada visando uma adequada caracterização de uma antena não deve encontrar nenhum obstáculo que perturbe a onda transmitida. A situação mais parecida ao espaço livre é obtida numa câmara anecóica (Figura 22). Esta consiste numa sala com paredes, teto e chão cobertos por um material absorvente de radiações eletromagnéticas (a onda incidente nas paredes não gera reflexões). Na Tabela 20 são apresentadas as especificações da câmara anecóica do CIENTEC onde foram realizadas as medições.



**Figura 22** Câmara Anecóica CIENTEC.

**Tabela 20. Especificações Câmara Anecóica**

<b>Especificação</b>	
<b>Tipo</b>	Semi-anecóica
<b>Blindagem</b>	Dupla sólida
<b>Dimensões (m)</b>	6 x 6 x 4
<b>Filtros de linha (kVA)</b>	15
<b>Absorvedores</b>	Base (61x61cm), 45,7cm de altura, poliuretano impregnado com material absorvente à base de carbono condutivo, modelo EAD24-16
<b>Fabricante</b>	MARPA
<b>Construtor</b>	Tecnasa

### **7.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELO DISPOSITIVO *BLUETOOTH***

Primeiramente foram realizadas 11 medidas experimentais usando o analisador de espectro N9912A da Agilent Technologies que possui uma largura de banda desde 2 MHz até 6 GHz para calcular o ganho das antenas (Figura 23).

Foram colocados os monopolos a uma distância de 0,4 metros. Na Figura 24 são apresentadas as potências [dBm] dos monopolos medidos dentro da câmara anecóica. A potência média calculada foi -51,56 dBm com um desvio padrão de 1,9.

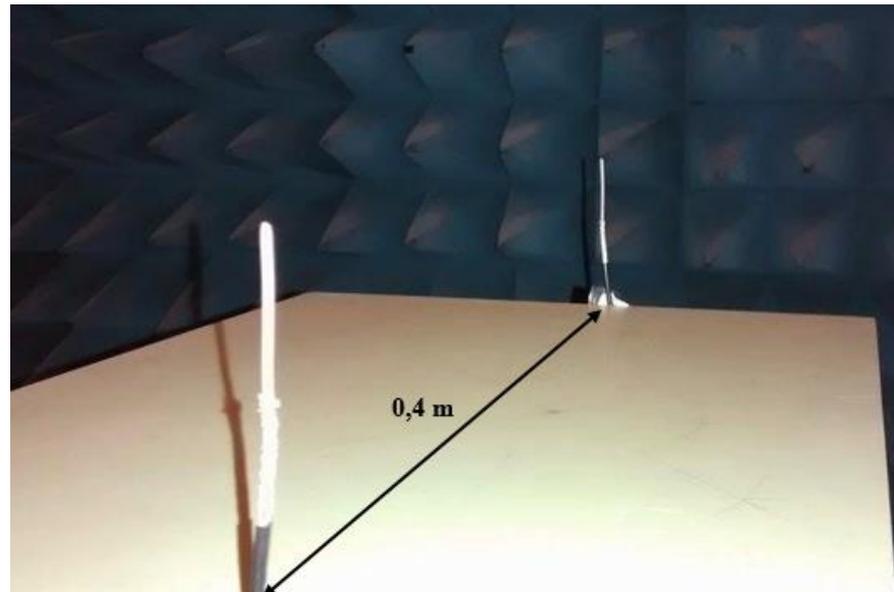


Figura 23 Medição experimental do ganho das antenas. Distância entre monopolos.



Figura 24 Medidas de potência recebida no monopolo dentro da câmara anecoica sem a presença da cabeça.

A equação de Friis é a equação fundamental para o planejamento do enlace e relaciona a potência de uma antena com respeito a outra. A forma mais simples é apresentada na equação 2 mostrada a seguir e também no Anexo 1.

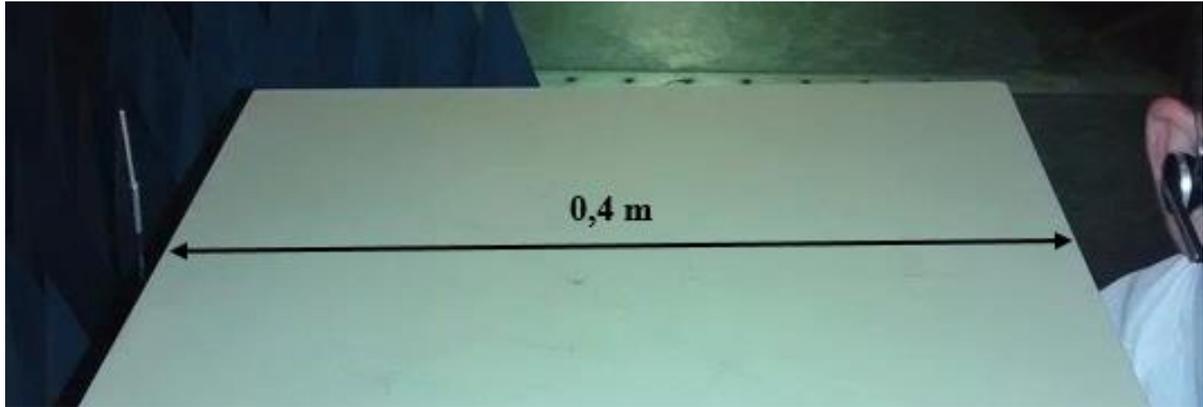
$$\frac{P_r}{P_t} = G_t * G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (2)$$

Onde  $P_r$  e  $P_t$  são a potência recebida e transmitida respectivamente,  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas transmissora e receptora,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $R$  é a distância entre elas. Note-se que os ganhos de ambas as antenas monopolo são iguais, simplificando a equação 2. Assim conhecendo a potência recebida, a potência transmitida, o comprimento de onda e a distância entre as antenas é possível o cálculo direto do ganho. Tem-se que ter em conta que as antenas estão alinhadas sobre a mesma polarização e orientadas para que cada uma irradie na direção de máxima radiação da outra.

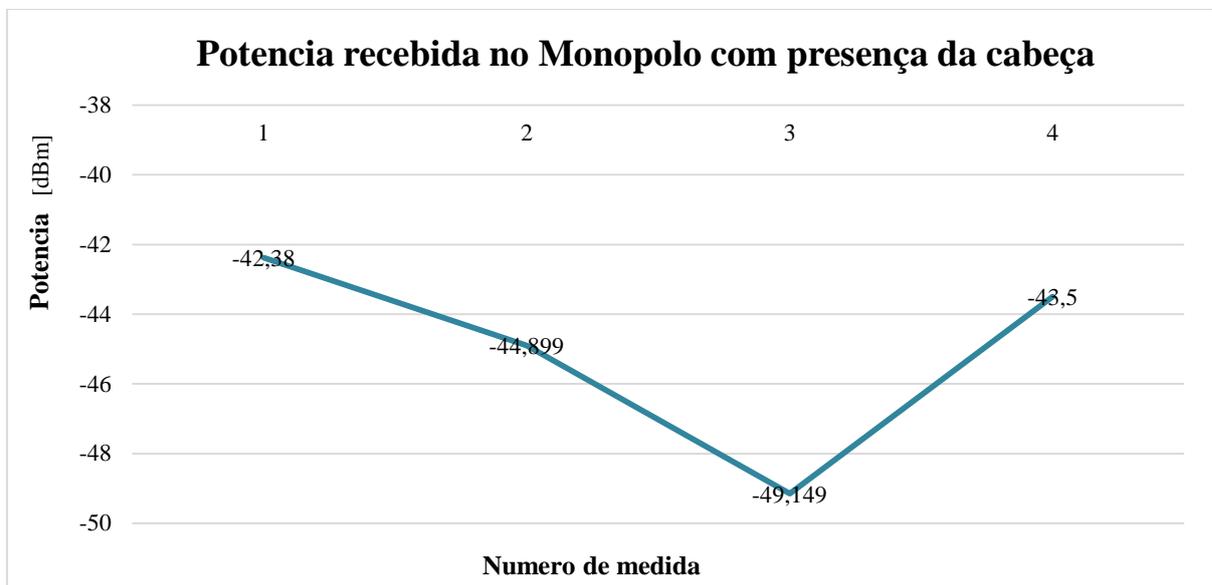
Substituindo a antena transmissora (monopolo) e colocando o Bluetooth isolado, dado que se conhece a relação entre potências de 2 monopolos idênticos, foi calculada a potência transmitida pelo Bluetooth para que se possa realizar a simulação do campo elétrico próximo e distante em diferentes pontos. O valor da potência transmitida pelo Bluetooth calculado foi 1 mW.

#### **7.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELO DISPOSITIVO BLUETOOTH COM PRESENÇA DA CABEÇA**

Para determinar experimentalmente a potência do Bluetooth com a presença da cabeça (Figura 24), foram realizadas 4 medidas de potência, as quais são apresentadas na Figura 26. A potência média calculada foi -44,9 dBm com um desvio padrão de 2,90. A potência transmitida calculada foi 0,25 mW, caindo 4 vezes em presença da cabeça do usuário com respeito ao dispositivo operando sozinho.



**Figura 25** Medição experimental do ganho das antenas. Distância entre monopolo e Bluetooth comercial.



**Figura 26** Medidas de Potência recebida no monopolo dentro da câmara anecoica com a presença da cabeça.

## 7.5 SIMULAÇÕES DE CAMPO PRÓXIMO E DISTANTE UTILIZANDO OS VALORES DE POTÊNCIA MEDIDA

Usando o valor da potência transmitida pelo Bluetooth e com ajuda do sensor de campo elétrico (Sensor Point) no SEMCAD X, foi possível realizar simulações num ponto a diferentes distancias do Bluetooth com e sem a presença da cabeça. Na Tabela 21 são apresentados os valores de campo elétrico calculado teoricamente (Anexo 1), o valor simulado no SEMCAD X e o valor medido pelo medidor de campo EMR-300 da Narda. O medidor tem 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  $\pm 19\%$ .

Foram escolhidas 4 distâncias aleatórias para as medições tendo em conta que a distância calculada de início do campo distante foi 0,42 m.

**Tabela 21. Campo Elétrico a diferentes distancias**

<b>Distância [m]</b>	<b>Valor Teórico sem cabeça [V/m]</b>	<b>Valor Simulado Bluetooth sem cabeça SEMCAD X [V/m]</b>	<b>Valor Simulado Bluetooth com cabeça SEMCAD X [V/m]</b>	<b>Valor Medido Narda sem cabeça [V/m]</b>
0,02	4,9461	8,5	1,6489	4,07
0,4	0,2473	0,59	0,4973	0,37
1	0,198	0,282	0,2382	0,2

Calculando o ganho das antenas monopolo (Krauss, 1988) e tendo os valores de campo elétrico simulado no SEMCAD X em 0,4 metros de distância entre o fone de ouvido Bluetooth e a antena transmissora foi possível calcular o valor de potência recebida pelo monopolo (Tabela 22) com e sem presença da cabeça a partir destes dados e os valores medidos de potência media.

**Tabela 22. Potencia recebida pelo monopolo (0,4 m de distância entre as antenas)**

<b>Potência recebida sem cabeça [mW]</b>	<b>Potência recebida com cabeça [mW]</b>
0,0037	0,00259

Utilizando a equação de Friis foi possível calcular o valor da potência transmitida pelo Bluetooth mostrada na Tabela 23.

**Tabela 23. Potencia transmitida pelo Bluetooth (0,4 m de distância entre as antenas)**

<b>Potência transmitida sem cabeça [mW]</b>	<b>Potência transmitida com cabeça [mW]</b>
---	---

0,224	0,15729
-------	---------

Note-se que a potência com a presença da cabeça cai aproximadamente 3 dBm, mostrando que a cabeça funciona como absorvedor de campo eletromagnético. Além disso, a potência utilizada nas simulações e que foi estimada em 0 dBm está na mesma ordem de grandeza das medidas realizadas com o Bluetooth no SEMCAD X.

## 8. CONCLUSÕES TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentado um estudo dosimétrico em modelos de cabeças homogênea e heterogêneas, considerando o aumento da taxa de absorção específica em dois dispositivos de comunicação sem fio que trabalham na faixa de 2,45 GHz. Os protótipos dos óculos e o Bluetooth foram projetados com suas respectivas antenas e dimensionados para realizar simulações próximas à realidade.

A variação sistemática das propriedades dielétricas dos tecidos em função da idade tem sido estudada para a cabeça humana adotando duas abordagens expostas por (PEYMAN *et al*, 2009) e (KESHVARI *et al*, 2006), correspondendo principalmente à composição do tecido e as regiões com maior exposição aos elementos irradiadores que para o caso estudado são a pele, a gordura, os ossos e a matéria branca. Ademais, realizou-se a estimativa das distribuições de SAR para todos os modelos de cabeça heterogêneos usando parâmetros de uma pessoa adulta e obtendo resultados para 1g e 10 gramas de tecido em que nenhum dos casos com suas frequências correspondentes superam os limites da (FCC, 1997) e da (ICNIRP, 1998).

A pele e os ossos foram os tecidos mais comprometidos na hora de avaliar os resultados de SAR para todos os modelos com os óculos nas duas abordagens. Na abordagem análoga de Peyman tomando como referência o valor de 10Kg (tecido suíno) e usando os óculos com a antena monopolo, a criança de 6 anos apresentou o valor mais alto de SAR na pele ( $0,2666 \left[\frac{W}{kg}\right]$ ). O valor de SAR mais alto na criança de 10 anos foi  $0,1965 \left[\frac{W}{kg}\right]$ . Usando a PIFA com os óculos, o valor máximo de SAR apresentada pela criança de 6 anos foi  $0,1569 \left[\frac{W}{kg}\right]$  na sua pele. No modelo de 10 anos foi  $0,23221 \left[\frac{W}{kg}\right]$  na pele igualmente. Nos casos avaliados com a abordagem análoga de Keshvari os valores mais altos foram no momento variar os parâmetros com condutividade equivalente da ordem de 20%. A pele foi o tecido que mais absorveu e com valores maiores de SAR. No modelos de 6 anos a SAR mostrou um valor de  $0,3759 \left[\frac{W}{kg}\right]$  e na criança de 10 anos  $0,2543 \left[\frac{W}{kg}\right]$  com o monopolo e o protótipo. Com os óculos e a PIFA o valor máximo da SAR na pele ocorreu na criança de 10 anos ( $0,3558 \left[\frac{W}{kg}\right]$ ) e no modelo de 6 anos  $0,2420 \left[\frac{W}{kg}\right]$  também na pele.

Mesmo que os resultados deste estudo estejam baseados na dosimetria desenvolvida por dois autores, pode se concluir que a iteração da energia RF com o tecido biológico, é um fenômeno complexo em consequência das emissões destes aparelhos.

O modelo de cabeça homogênea apresentou níveis de SAR altos entre outros por ter distancias mais próximas aos óculos. Segundo muitos autores isto pode acontecer pelo fato de que os parâmetros dielétricos do SAM foram desenvolvidos para obter uma maior exposição aos elementos irradiadores. Além disto as dimensões do SAM são maiores, por conseguinte o liquido pode-se encontrar mais perto do dispositivo, portanto é de se esperar que a SAR seja mais elevada.

O elemento irradiador que apresentou maior aumento nos valores de SAR foi o monopolo usando o protótipo dos óculos. Considerando-se que as distancias entre todos os elementos com suas respectivas cabeças são diferentes, mas se encontram num mesmo intervalo, a antena PIFA projetada atuaria de uma forma mais efetiva para o desenvolvimento destes aparelhos.

Em vista dos argumentos apresentados, é importante destacar que os tecidos da cabeça não contribuem equivalentemente. Por exemplo, nem todos os tecidos têm as mesmas variações nas propriedades dielétricas com a idade (Peyman, 2009) e foram avaliados os tecidos mais relevantes, sendo que nos demais foram assumidas variações irrelevantes nos parâmetros dielétricos. Além disto, a quantidade de tecidos em todos os casos estudados varia dependendo do tamanho da cabeça.

Foram realizadas simulações de campo elétrico com ajuda da ferramenta sensor point no SEMCAD X para estimar a potência transmitida pelo dispositivo Bluetooth incluindo medições experimentais de potência media em dois monopolos que permitiu confirmar a potência emitida pelo Bluetooth. Esta potência foi estimada em - 6,4 dBm sem presença da cabeça e - 8,03 dBm com presença da cabeça. Com estes resultados pode-se concluir que a cabeça apresenta normalmente maior absorção que reflexão de energia. Entretanto, isto também depende de diversos parâmetros tanto da antena, como dos tecidos e dimensões da cabeça. Além disto a potência transmitida normalizada empregada nas simulações (0 dBm) se encontra na mesma ordem de grandeza das medidas realizadas.

Para todas as conclusões anteriores é fundamental ter em conta que deve se considerar, além da distância da cabeça ao elemento irradiador na hora de dimensionar estes dispositivos, o tempo de exposição relacionado aos mesmos. Mais estudos são necessários pois este tempo pode causar danos especialmente em crianças e adolescentes.

## 9. TRABALHOS FUTUROS

A seguir são sugeridos alguns assuntos a serem investigados no futuro.

Encontrar os valores de permissividade e condutividade equivalente tentando modelar não só a pele, a gordura, os ossos e a matéria branca obtidos de (PEYMAN et al, 2009), com a realização do mesmo estudo dosimétrico com os 16 tecidos e seus respectivos parâmetros dielétricos de uma forma mais completa.

Utilizar modelos de cabeças com uma resolução mais fina para representar uma situação anatômica precisa e não deixar fora nenhum detalhe. Além disso realizar simulações em diferentes frequências para executar um estudo do comportamento da SAR.

Simular o cálculo da taxa de absorção específica em usuários passivos e seu entorno quando estão localizados nas proximidades de usuários ativos que se encontram utilizando estes dispositivos.

## REFERÊNCIAS

ABDELHAMID, H. et al. Analysis of Power Absorbed by Children's Head as a Result of New Usages of Mobile Phone. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, [S.l.] v. 52, n. 54, p. 1-8, Nov. 2010.

AMINZADEH, R.; ASHIRI, M.; ABDOLALI, A. SAR Computational of a Human Head Exposed to Different Mobile Headsets Using FDTD Method. In: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM, 2012, Kuala Lumpur. **Proceedings...** Cambridge: The Electromagnetics Academy, Mar. 2012. p. 1131-1134.

AMIN-ZADEH, R. et al. Inspecting Safety Level of Bluetooth Headset Radiation in vicinity of Human Head: A Numerical Study. In: ANTENNAS AND PROPAGATION (EuCAP), 2013, Gothenburg, **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2013, p. 1178-1182.

ARZA, D. et al. The Effect of Headset and Earphone on Reducing Electromagnetic Radiation from Mobile Phone toward Human Head, In: INFORMATION AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES (APSITT), **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1-6.

BALANIS, C. **Antenna Theory Analysis and Design**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

BAKKER, J, F. et al. Assessment of Induced SAR in Children Exposed to Electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5,6 GHz. **Physics in Medicine and Biology** , v. 55, p. 3115-3130, 2010.

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. **Acesso e utilização do sistema de filas SGE no cluster Sun Fire**. Disponível em: <<http://www.cesup.ufrgs.br>>. Acesso em: 1 de Jun. 2014.

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.

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.

COSTA, C; FONTGALLAND, G. Calculo da SAR na cabeça produzida por telefones celulares dispostos assimetricamente, **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, [S.l.], v. 27, p. 52-60, 2011.

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

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMITTEE. **Specific Absorption Rate (SAR) Test Report to Google glass, FCC ID A4R-X1**. Disponível em: <[https://apps.fcc.gov/oetcf/eas/reports/ViewExhibitReport.cfm?mode=Exhibits&RequestTimeout=500&calledFromFrame=N&application\\_id=287362&typ=8374&fcc\\_id=A4R-X1](https://apps.fcc.gov/oetcf/eas/reports/ViewExhibitReport.cfm?mode=Exhibits&RequestTimeout=500&calledFromFrame=N&application_id=287362&typ=8374&fcc_id=A4R-X1)>. Acesso em: 7 de Jul. 2014.

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMITTEE. **Tissue Dielectric Properties**. Disponível em: <<http://www.fcc.gov/fccbin/dielec.sh>>. Acesso em: 15 Maio 2014.

FEIN, G. **Child development Englewood Cliffs**. New Jersey: Prentice-Hall, 1978.

FINDLAY, R. P; 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, July 2010.

GABRIEL S. et al. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 41, p. 2251-2269, 1996.

GABRIEL, C. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies. **Brooks Air Force**, Kensington, UK, 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, O. M. et al. Exposure limits the underestimation of absorbed cell phone Radiation, especially in Children. **Electromagnetic Biology and Medicine**, Germantown, Maryland, v. 31, n. 1, p. 34-51, Mar. 2012.

HAN, Y. et al. Comparative assessment of models of electromagnetic absorption of the head for children and adults indicates the needs for policy changes. **Ramazzi Institute Europe**, [S.l.], v. 5, p. 301-318, 2010.

HAYKIN, S. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

HOLLAND, B. A. et al. MRI of normal maturation. **American Society of Neuroradiology**, [S. l.], v. 7, p. 201-208, 1986.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. 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. **IEC62209-2**: 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). Switzerland, 2005.

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, 2003. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>>. Acesso em: 10 julho de 2014.

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.

IHS. **HIS Forecasts Nearly 10 Million Smart Glasses to Ship from 2012 to 2016**. Disponível em: <<http://press.ihs.com/press-release/design-supply-chain/spurred-google-glass-ihs-forecasts-nearly-10-million-smart-glasses>>, Acesso em: 20 Maio 2014.

JUNG, S. et al. Design of Sleeve Dipole Antenna for Suppressing Leakage Current on a Coaxial Cable. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, [S.l.], v. 13, p. 1-7, 2014.

KESHVARI J; LANG S. Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz, **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 50, p. 4355-4369, 2005.

JAFAR K; KESHVARI, R; LANG, S. 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**, [S.l.], v. 51, p. 1463–1477, 2006.

JASIK, H. **Antenna Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill, USA, 1961.

KRAUSS, J.D. **Antennas**. New York: McGraw-Hill, 1988.

LAI, H; HARDELL, L. Cell Phone Radiofrequency Radiation Exposure and Brain Glucose Metabolism. **American Medical Association JAMA**, [S.l.], v. 305, n. 8, p. 1-10, 2011.

LI, L. et al. Computation of SAR levels in SAM's Head Model Located inside and Automobile via Parallel FDTD Algorithm. In: APPLICATIONS OF ELECTROMAGNETISM AND STUDENT INNOVATION COMPETITION AWARDS (AEM2C), 2010, Taipei. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 24-28.

LIU, H; YANG, C. Miniature PIFA without empty space for 2,4 GHz ISM band applications. **Electronic Letters**, [S.l.], v. 46, n. 2, p. 113-115, 2010.

MARTÍNEZ, M.. et al. FDTD Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields from WiFi and Bluetooth Devices in Some Operating Situations. **Bioelectromagnetics Wiley Online Library**, [S.l.], v. 30, n. 2, p. 142- 151, Feb. 2009.

MEANS, D; CHAN, K, W. **Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetics Fields**. New York: Federal Communications Commission, Office of Engineering & Technology, 2001.

PEYMAN, A. et al. **Dielectric Properties of Tissues at Microwave Frequencies**. RUM3 MTHR Final Technical Report. 2005. Disponível em: <[http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/documents/Rum3FinalReport.pdf](http://www.mthr.org.uk/research_projects/documents/Rum3FinalReport.pdf)>. Acesso em: 2 Jun. 2014.

PEYMAN, A. et al. Dielectric properties of porcine cerebrospinal tissues at microwave frequencies: in vivo, in vitro and systematic variation with age. **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 52, p. 229-2245, 2007.

PEYMAN, A. et al. Variation of the dielectric properties of tissues with age: the effect on the values of SAR in children when exposed to walkie-talkie devices. **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 54, p. 227-241. 2009.

PEYMAN, A; GABRIEL, C. Cole – Cole parameters for the dielectric properties of porcine tissues as a function of age at microwave frequencies. **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 55, p. 413- 419, 2010.

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.

RACINI, S. **Caracterização e Redução de Exposição Humana à Campos Eletromagnéticos em Ambientes Wi-Fi**. 2014. 101 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre; 2014.

ROWELL, C; LAM, Y E. Mobile-Phone Antenna Design, **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, [S.l.], v. 54, n. 4, p. 1-7, Aug. 2012.

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

SALLES, A. A. A.; BULLA G.; FERNANDEZ, C. E. Electromagnetic absorption in the head of adults and children due to mobile phone operation close to head. **Electromagnetic Biology and Medicine**, Porto Alegre, v. 25, n. 4, p. 349-360, fev. 2006.

SCHMID, G; UBERBACHER, R. Age dependence of dielectric properties of bovine brain and ocular tissues in the frequency range of 400 MHz to 18 GHz. **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 50, p. 4711-4720, 2005.

SCHMID & PARTNER ENGINEERING AG. **SEMCAD X Reference Manual**. Zurich: Schmid & Partner Engineering, 2009.

TSUKIJI, T. et al. Double-folded Monopole Antenna using parallel line or coaxial cable. **IEE Procedure Microwave Antennas Propagation**, [S.l.], v. 149, n. 1, p. 17-22, Feb. 2002.

TSUKIJI, T. et al. **Double-folded Monopole Antenna with coaxial cable**. London: The Institution of Engineering and technology, 2009.

WANG, J; FUJIWARA, O. Comparison and evaluation of electromagnetic absorption characteristics in realistic human head models of adult and children for 900- MHz mobile telephones, **IEEE Trans Microwave Techniques**. [S.l.], v. 51, p. 966-971, 2003.

WANG, J. et al. Approximation of Aging Effect on Dielectric Tissue Properties for SAR Assessment of Mobile Telephones. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compability**, [S.l.], v. 48, n. 2, p. 408-413, 2006.

WIART, J. et al. Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults, **Physics in Medicine and Biology**, [S.l.], v. 53, p. 3681-3695, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Electromagnetic Fields and public health: Mobile Phones (Project Who)**. Disponível em: <<http://www.who.int/peh-emf/en/>>, Acesso em: 30 Mar. 2014.

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.

ZHANG, B; GAO, G. Compact Printed Dipole Antenna with Folding Element for 2,4 GHz WLAN Communications. In: **SIGNAL PROCESSING, COMMUNICATION AND COMPUTING (ICSPCC)**. 2012, Hong Kong, **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2012. p. 565-568.

## ANEXO A. CALCULO DA POTÊNCIA IRRADIADA E TRANSMITIDA PELO BLUETOOTH MEDIANTE A EQUAÇÃO DE FRIIS.

Segundo (HAYKIN, 2008) o estudo da propagação é importante para a compreensão das comunicações sem fio porque fornece a modelagem física necessária que leva à uma boa estimativa da potência requerida para o estabelecimento do enlace de comunicações para fornecer comunicação confiável.

Um conceito fundamental para a compreensão dos sistemas de transmissão sem fio é a operação da antena isotrópica. Ela irradia igualmente em todas as direções. Na realidade essa antena não existe e, assim, todas as antenas praticas tem associada alguma diretividade.

A potência  $P_R$  recebida pela antena receptora depende de diferentes características (por exemplo do tamanho e da orientação da antena relativamente ao transmissor). A potência recebida por uma antena de área efetiva  $A_e$  é dada por:

$$P_R = \Phi_R * A_e = \frac{P_T}{4\pi R^2} * A_e \quad (3)$$

A área física da antena ( $A$ ) e sua área efetiva ( $A_e$ ) estão relacionadas através da eficiência da antena mostrada na equação (4)

$$\eta = \frac{A_e}{A} \quad (4)$$

Esse parâmetro representa o quanto uma antena converte a radiação eletromagnética incidente no sinal elétrico ou vice-versa.

O princípio da reciprocidade tem bases nas equações de Maxwell. Isso implica que, se o sentido de propagação for invertido, a energia transportada pela onda radiada deve seguir exatamente o mesmo percurso e sofrer exatamente os mesmos efeitos, só que no sentido inverso. Isso nos leva a concluir que os ganhos de potência das antenas ao transmitir e ao receber os sinais são iguais. A explicação intuitiva para isso acontecer baseia-se na observação de que o ganho de transmissão mede o quão eficientemente uma antena transmissora irradia energia em uma determinada direção, enquanto, no outro extremo, o ganho de recepção mede o quão eficientemente uma antena receptora capta a energia irradiada de uma determinada direção. O máximo ganho de transmissão ou de recepção de uma antena, é dado por:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} * A_e \quad (5)$$

### A.1.2.1 EQUAÇÃO DE FRIIS

As perdas no espaço livre relacionadas à potência transmitida e recebida por antenas genéricas são determinadas através da perda do percurso ou trajeto e o ganho das antenas. A equação de Friis é dada por:

$$P_R = \frac{P_T * G^2}{L_p} \quad (6)$$

Onde  $P_R$  é potência recebida,  $P_T$  a potência transmitida,  $G$  o ganho das antenas e  $L_p$  o fator de perda do percurso.

### A.1.2.2 RADIAÇÃO EM CAMPO PRÓXIMO E CAMPO DISTANTE

A equação de Friis somente é válida para valores de distância que estão no campo distante da antena transmissora. Isto é, na região de campos distantes, onde o campo elétrico e magnético são perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação. Nessa região os campos são predominantemente irradiados e podem ser caracterizados como uma aproximação das ondas planas.

Na região de campo próximo, a estrutura do campo eletromagnético é complexa, não existe relação direta entre os dois campos. A distância onde inicia o campo distante, conhecida como zona de Fraunhofer, pode ser expressa por:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (7)$$

Onde  $D$  é a maior dimensão física da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda de operação. Observa-se que  $d_f \gg D$  e  $d_f \gg \lambda$ .

### A.1.2.3 RELAÇÃO DA POTÊNCIA E CAMPO ELÉTRICO

No espaço livre, a densidade de fluxo de potência  $S$  [ $W/m^2$ ], é dada por:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} = \frac{E^2}{R} = \frac{E^2}{\eta} \quad (8)$$

Onde  $R$  é a impedância intrínseca do meio, que para o espaço livre é  $120\pi$ ,  $E$  representa a magnitude do campo elétrico na região de campo distante. A potência recebida pode ser, então, expressa por:

$$P_r = S * A_e = \frac{E^2}{120\pi} * A_e = \frac{P_t * G \lambda^2}{(4\pi)^2} \quad (9)$$



## **ANEXO B. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO - INCERTEZA DO SOFTWARE (IEC/IEEE 62704-1)**

Na validação experimental de dispositivos de telecomunicações, um dispositivo físico sem nenhuma modificação e em teste (DUT) é controlado com um simulador de estação base que simula o uso real.

O aparelho usado num laboratório de provas de SAR (phantom, materiais, tecidos, etc) é desenvolvido para uma alta precisão e mínima incerteza tendo em conta todas as limitações técnicas. Todos os fatores que contribuem à incerteza estão bem definidos.

A vantagem da configuração experimental é que a incerteza do teste somente depende da incerteza da configuração da medição e é independente do DUT. De outro modo, o limite superior da incerteza pode ser determinado para uma instalação de prova, sendo válida para o DUT em qualquer posição.

A vantagem dos testes numéricos de SAR utilizando o método FDTD é que não usam nenhum tipo de limitação na configuração de prova, por exemplo, a dosimetria numérica permite aos modelos phantom representar os tecidos não homogêneos enquanto que a dosimetria experimental requer usar o phantom homogêneo. Por outra parte a dosimetria numérica precisa modelar o DUT.

Nesta seção são definidos os procedimentos gerais para avaliar a incerteza numérica que deve seguir o usuário ao momento de modelar DUT e realizar testes em modelos.

### **B.1.2.1 FATOR DE INCERTEZA**

A incerteza computacional se encontra dividida em duas categorias:

- Pode ser calculada primeiramente no modelamento do DUT, com parâmetros introduzidos na simulação tais como as dimensões da malha, convergência etc.
- Critérios introduzidos pela simplificação do modelo como omissão de partes, propriedades dielétricas, etc.

### **B.1.2.2 INCERTEZA DO MODELO DUT COM RESPEITO AOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO**

É recomendado definir o modelo da configuração de prova, por exemplo, tipo e localização das condições de contorno de absorção dependendo do modelo do Phantom, resolução da malha, etc.

### **B.1.2.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABSORVENTES (ABCs)**

As condições de contorno (ABCs) dependem significativamente do tipo de abordagem e pode ser determinada modificando os limites da distância do quadro delimitador que contém toda a geometria da simulação multiplicando-se por  $\frac{\lambda}{4}$  separadamente em todas as direções dos eixos. Ou seja, são requeridas seis simulações, além da original. Esta avaliação pode ser realizada a todo de tipo de ABC. O desvio da quantidade de SAR (psSAR) deve ser considerado.

### **B.1.2.4 POTENCIA DE ALIMENTAÇÃO**

A potência introduzida no domínio computacional é registrada nas fontes de energia. O somatório da potência absorvida nos dielétricos no domínio computacional e a irradiada nas condições de contorno são registradas e comparadas com a potência da fonte. Dado que a SAR é linear em potência, a incerteza da quantidade de energia é proporcional à incerteza da SAR. Este desvio é conhecido como distribuição normal.

### **B.1.2.5 DIELÉTRICOS NO MODELO “PHANTOM”**

O impacto da incerteza do psSAR é avaliado aplicando o mínimo e o máximo da condutividade equivalente e a permissividade relativa (quatro combinações diferentes). O mínimo e o máximo vão ser escolhidos de acordo à incerteza informada na referência dos parâmetros dielétricos. O desvio máximo do psSAR usando os valores nominais da condutividade e permissividade deve ser relatado.