

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

NORTON ESCOPELLI SOARES

**EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO DE
MÚLTIPLAS FONTES EM SALA DE
AULA: UM ESTUDO DE SAR**

Porto Alegre
2023

NORTON ESCOPELLI SOARES

**EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO DE
MÚLTIPLAS FONTES EM SALA DE
AULA: UM ESTUDO DE SAR**

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: Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alvaro Augusto Almeida de Salles

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Giovani Bulla

Porto Alegre
2023

NORTON ESCOPELLI SOARES

**EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO DE
MÚLTIPLAS FONTES EM SALA DE
AULA: UM ESTUDO DE SAR**

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. Alvaro Augusto Almeida de Salles , UFRGS

Doutor pela University of London — Londres, Reino Unido

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

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

Prof. Dr. José Ricardo Bergmann, PUC-Rio

Doutor pela University of London — Londres, Reino Unido

Prof. Dr. Marcos Vinicio Thomas Heckler, UNIPAMPA

Doutor pela Technische Universität München — Munique, Alemanha

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre, outubro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão à minha mãe, Suzana, e à minha irmã, Sabrina, pelo apoio e encorajamento ao longo desta jornada. Agradeço ao meu orientador, Prof. Salles, ao meu coorientador, Prof. Giovani, pela orientação, e também ao Prof. Claudio do IFRS, pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Agradeço à secretária do PPGEE, Miriam, que sempre atendeu com zelo às minhas demandas, contribuindo para a fluidez do processo acadêmico.

Agradeço também às instituições que possibilitaram a realização deste trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) pela oportunidade de desenvolver pesquisas na minha área de interesse, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Com o avanço tecnológico, houve um aumento na exposição a fontes de radiação eletromagnética, especialmente em ambientes de trabalho e educacionais com uso intensivo de dispositivos sem fio. A Taxa de Absorção Específica (SAR) mede a radiação eletromagnética absorvida por tecidos orgânicos. Este estudo, utilizando o software CST Studio Suite® para simulações, avalia a SAR em uma sala de aula com laptops, variando a distância entre as mesas para analisar diferentes cenários. A complexidade da SAR é aumentada devido às múltiplas trajetórias e reflexões das ondas eletromagnéticas em ambientes fechados. As simulações consideraram condições de contorno periódicas e a variação do número de células por comprimento de onda, equilibrando precisão, economia de recursos e tempo. Resultados mostraram que a proximidade entre alunos aumenta a psSAR 1 g na cabeça — 81,196 mW/kg no modelo “Laura 2.0” e 119,157 mW/kg no modelo “criança de 7 anos”. Com apenas um aluno na sala, a psSAR 1 g reduz para 7,543 mW/kg e 3,981 mW/kg, respectivamente. Os valores de psSAR nas costas e mãos diminuem com o aumento da distância. Em comparação, os valores de psSAR 10 g são consistentemente menores em todas as distâncias. Por exemplo, a psSAR 10 g na cabeça é de 31,634 mW/kg e 77,061 mW/kg para os modelos “Laura 2.0” e “criança de 7 anos”, respectivamente. Este estudo enfatiza a importância de avaliar a SAR em diferentes configurações e distâncias para garantir a segurança dos usuários, principalmente em ambientes educacionais com uso frequente de eletrônicos.

Palavras-chave: Taxa de Absorção Específica (SAR), simulações computacionais, condição de contorno periódica, múltiplas fontes.

ABSTRACT

With technological advancement, there has been an increase in exposure to electromagnetic radiation sources, especially in work and educational environments with intensive use of wireless devices. The Specific Absorption Rate (SAR) measures the electromagnetic radiation absorbed by organic tissues. This study, using the CST Studio Suite[®] software for simulations, assesses SAR in a classroom with laptops, varying the distance between desks to analyze different scenarios. The complexity of SAR is increased due to the multiple trajectories and reflections of electromagnetic waves in enclosed spaces. The simulations considered periodic boundary conditions and the variation of the number of cells per wavelength, balancing accuracy, resource economy, and time. Results showed that proximity between students increases the head's psSAR 1 g — 81.196 mW/kg in the “Laura 2.0” model and 119.157 mW/kg in the “7-year-old child” model. With only one student in the room, the psSAR 1 g reduces to 7.543 mW/kg and 3.981 mW/kg, respectively. The values of psSAR on the back and hands decrease with increasing distance. In comparison, the values of psSAR 10 g are consistently lower at all distances. For example, the head's psSAR 10 g is 31.634 mW/kg and 77.061 mW/kg for the “Laura 2.0” and “7-year-old child” models, respectively. This study emphasizes the importance of evaluating SAR in different configurations and distances to ensure user safety, especially in educational environments with frequent use of electronics.

Keywords: Specific Absorption Rate (SAR), computational simulations, periodic boundary condition and multiple sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Ilustrações do modelo de mesa e cadeira utilizados nas simulações com o modelo humano adulto.	25
Figura 2 –	Ilustrações do modelo de mesa e cadeira utilizados nas simulações com o modelo humano infantil.	26
Figura 3 –	Ilustração do suporte do laptop.	26
Figura 4 –	Ilustrações do modelo detalhado de mesa e cadeira.	28
Figura 5 –	Antena do tipo dipolo dobrado.	30
Figura 6 –	Ilustração do laptop e laptop translúcido exibindo o posicionamento da antena.	30
Figura 7 –	Foto do interior da tampa de um notebook Hp Pavilion Zv5000 com destaque das antenas.	31
Figura 8 –	Diagrama de irradiação do laptop.	31
Figura 9 –	Parâmetro S_{11} da antena em situações distintas.	32
Figura 10 –	Ilustrações de uma das células unitárias PBC utilizada nas simulações com o modelo humano adulto.	35
Figura 11 –	Ilustrações de uma das células unitárias PBC utilizada nas simulações com o modelo humano infantil.	36
Figura 12 –	Replicação da célula de simulação e indicação da distância variável (setas vermelhas) e não variável (setas pretas) no trabalho.	37
Figura 13 –	Razão da psSAR 1 g normalizada no modelo “Laura 2.0” para um estudante com seu notebook.	49
Figura 14 –	Razão da psSAR 10 g normalizada no modelo “Laura 2.0” para um estudante com seu notebook.	50
Figura 15 –	Razão da psSAR 1 g normalizada no modelo “criança de 7 anos” para um estudante com seu notebook.	50
Figura 16 –	Razão da psSAR 10 g normalizada no modelo “criança de 7 anos” para um estudante com seu notebook.	51
Figura 17 –	Campo elétrico em dB (V/m): na esquerda, para um estudante sozinho a na direita considerando todos os estudantes na sala.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo de estudos sobre avaliação de SAR em dispositivos de comunicação e eletrônicos.	21
Tabela 2 –	Eficiências da antena isolada e no laptop.	33
Tabela 3 –	Parâmetro “número de células por comprimento de onda” e total de células de espaço FIT.	39
Tabela 4 –	Parâmetro “número de células por comprimento de onda” e psSAR para 1 g e 10 g.	40
Tabela 5 –	Comparação dos Componentes Anatômicos nos Modelos Humanos “Laura 2.0” e “child 7y”.	42
Tabela 6 –	Valores de psSAR 1 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “Laura 2.0”.	46
Tabela 7 –	Valores de psSAR 10 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “Laura 2.0”.	47
Tabela 8 –	Valores de psSAR 1 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “criança de 7 anos”.	48
Tabela 9 –	Valores de psSAR 10 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “criança de 7 anos”.	49

LISTA DE ABREVIATURAS

ACS	<i>Absorption Cross Section</i>
BAN	<i>Body Area Network</i>
EMF	<i>Electromagnetic Field</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
FIT	<i>Finite Integration Technique</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFA	<i>Inverted-F Antenna</i>
K-S	Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PBA	<i>Perfect Boundary Approximation</i>
PDP	<i>Power Delay Profile</i>
PIFA	<i>Planar Inverted-F Antenna</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFR	<i>Radio Frequency Radiation</i>
SA	<i>Specific Absorption</i>
SAM	<i>Specific Anthropomorphic Mannequin</i>
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
TST	<i>Thin Sheet Technique</i>
UWB	<i>Ultra-Wideband</i>
VH	<i>Visible Human</i>
WBSAR	<i>Whole Body Specific Absorption Rate</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
3	METODOLOGIA	24
3.1	Definição do Ambiente de Ensino	24
3.2	Modelamento das Fontes de Radiação	27
3.3	Simulações e Implementação de Condição de Contorno Periódica	33
3.4	Geração da Malha	37
3.5	Modelos Humanos Utilizados	41
4	RESULTADOS	45
4.1	Apresentação dos Resultados	45
4.2	Discussão dos Resultados	45
5	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A exposição humana a múltiplas fontes de radiação de radiofrequência (RFR, do inglês *Radio Frequency Radiation*) é um cenário cada vez mais relevante em ambientes de ensino. Com o avanço da tecnologia digital, a presença de diversos dispositivos eletrônicos, como computadores, *laptops*, *notebooks*, *tablets* e *smartphones*, é comum nas salas de aula e espaços de aprendizado. Estes dispositivos emitem radiação eletromagnética em diferentes frequências e intensidades, o que pode resultar em uma exposição simultânea a múltiplas fontes de radiação. Dada a quantidade de tempo que alunos passam nesses ambientes, mostra-se relevante conduzir estudos adicionais que avaliem os potenciais riscos desta exposição cumulativa.

A Taxa de Absorção Específica (SAR, do inglês *Specific Absorption Rate*) é uma medida da taxa na qual a energia é absorvida por unidade de massa de tecido orgânico, expressa em watts por quilograma (W/kg), quando expostos a campos eletromagnéticos (EMF, do inglês *Electromagnetic Fields*) de Radiofrequência (RF, do inglês *Radio Frequency*). Para proporcionar uma compreensão mais clara da SAR, a equação geral utilizada para seu cálculo é apresentada abaixo:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \text{ W/kg} \quad (1)$$

em que σ é a condutividade elétrica do tecido (S/m), E é o campo elétrico (V/m) e ρ é a densidade de massa do tecido (kg/m^3). Esta métrica é relevante tanto para dispositivos eletrônicos pessoais usados próximo ao corpo quanto para áreas circunvizinhas a antenas de transmissão e torres de telefonia celular.

A Taxa de Absorção Específica de Pico Espacial (psSAR, do inglês *peak spatial Specific Absorption Rate*), é uma medida da taxa na qual a energia é absorvida por unidade de massa de tecido orgânico, expressa em watts por quilograma (W/kg), quando expostos a EMFs de RF em uma massa específica de tecido biológico. Diferente do SAR total, que mede a taxa média de energia absorvida por todo o tecido exposto, o psSAR foca em áreas específicas, avaliando a taxa de absorção máxima de energia em pequenos volumes de tecido, como 1 g ou 10 g. Esta métrica permite avaliar a exposição localizada a campos de RF, especialmente em contextos onde a proximidade com a fonte de radiação é uma

preocupação.

Entidades como a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) reconhecem os potenciais riscos associados à exposição excessiva e, portanto, estabelecem diretrizes para assegurar níveis de exposição seguros (WHO, 2014; ICNIRP, 2020). Similarmente, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e a agência federal norte-americana *Federal Communications Commission* (FCC) determinam padrões e limites para a exposição à RFR, alinhando-se assim às diretrizes internacionais sobre o tema (IEEE, 2019; FCC, 1997).

Em relação aos limites específicos de SAR, há variações significativas entre diferentes regiões e órgãos reguladores. Por exemplo, nos Estados Unidos, a FCC define um limite de SAR de 1,6 W/kg para dispositivos móveis, baseando-se na média de 1 g de tecido (FCC, 1997). Já na Europa, seguindo as diretrizes da ICNIRP, o limite é de 2 W/kg, tendo como base a média de 10 g gramas de tecido (ICNIRP, 2020). É importante salientar que essas diretrizes são estabelecidas considerando apenas o aumento local de temperatura, sem levar em conta outros possíveis efeitos adversos à saúde relacionados à exposição à radiação. As variações observadas nos limites da SAR emergem de diferentes metodologias e de considerações acerca da forma como a RFR é absorvida e distribuída no corpo. Quando o foco é a exposição oriunda de antenas de transmissão e torres celulares, os limites de SAR geralmente são mais elevados devido à exposição mais dispersa, diferentemente da exposição mais direta e próxima produzida pelos dispositivos móveis.

A simulação computacional tem se mostrado uma ferramenta valiosa para a compreensão e análise de fenômenos físicos complexos. No campo da engenharia elétrica, a simulação de SAR é amplamente utilizada para avaliar os efeitos da exposição humana à RFR. Neste projeto, optou-se pelo CST Studio Suite[®], um software especializado em simulação eletromagnética de onda completa. Ele se destaca por permitir a criação de modelos eletromagnéticos detalhados e realizar diversas análises, incluindo a capacidade de simular a exposição à RFR em modelos humanos.

A revisão da literatura indica uma escassez de estudos que abordem medição e simulação de SAR em ambientes educacionais com múltiplas fontes de radiação eletromagnética. A maioria das pesquisas existentes se concentra na análise da SAR em relação a uma única fonte de radiação, o que não reflete de forma precisa a realidade vivenciada nas salas de aula. Isso é preocupante, uma vez que não permite uma compreensão mais profunda dos efeitos da exposição simultânea a diferentes fontes de RFR, que é uma condição cada vez mais comum na vida cotidiana. Além disso, essa carência de estudos impede o desenvolvimento de diretrizes de segurança eficazes para o uso de dispositivos eletrônicos nesses ambientes. Assim, há uma lacuna a ser preenchida na pesquisa relacionada à SAR em ambientes de ensino. Estudos nessa área forneceriam um melhor entendimento para sobre os efeitos cumulativos e interativos da exposição a múltiplas fontes de radiação.

Este trabalho objetiva avaliar, através de simulações eletromagnéticas, os níveis de psSAR a 1 g e 10 g em uma sala de aula em que todos os alunos utilizam laptops. Neste estudo, são parametrizadas as distâncias frontais e traseiras entre as classes, fixando a distância lateral, para avaliar o impacto da disposição das classes e dos alunos na exposição à RFR.

No Capítulo 2, é apresentada uma análise da literatura sobre medição e simulação de SAR, com ênfase nas interações entre múltiplas fontes de radiação eletromagnética e o corpo humano. O capítulo revisa estudos que investigam o SAR em diferentes cenários, destacando abordagens metodológicas e resultados de pesquisas específicas. Estas análises contribuem para um melhor entendimento dos desafios envolvidos na simulação e medição da exposição a RFR, fornecendo embasamento teórico para as investigações subsequentes na dissertação.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada no estudo da exposição à RFR em salas de aula com múltiplos laptops. Detalha a configuração do ambiente de estudo, a modelamento das fontes de radiação e as condições de contorno. Inclui análise da densidade da malha nas simulações e os critérios de seleção dos modelos humanos, destacando o equilíbrio entre a otimização de recursos computacionais e a precisão dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados das simulações de psSAR para os modelos humanos “Laura 2.0” e “Criança de 7 anos”. Os resultados incluem valores detalhados de psSAR para diferentes partes do corpo e a variação desses valores com a distância entre as mesas. O capítulo também analisa os efeitos dos multipercursos na variação da psSAR e compara os resultados dos diferentes modelos humanos. Além disso, discute a conformidade dos valores de psSAR com as diretrizes da ICNIRP.

O Capítulo 5 conclui o estudo sobre a exposição à RFR de múltiplos laptops em uma sala de aula, destacando a complexidade das interações eletromagnéticas e o papel dos multipercursos das ondas. O uso de diferentes modelos humanos revela variações na absorção de radiação. O capítulo compara os resultados com as normas da ICNIRP, enfatizando a necessidade de mais pesquisas, especialmente em ambientes de exposição prolongada em populações vulneráveis. Além disso, também é discutida a abordagem computacional adotada no estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica neste capítulo tem como objetivo mapear os avanços científicos e metodológicos apresentados por pesquisadores ao longo do tempo, enfatizando os progressos na avaliação da SAR e as complexidades envolvidas.

No estudo de (WANG; WANG, 2008), foi conduzido um estudo sobre as implicações de segurança biológica do uso de técnicas de *Ultra-Wideband* (UWB, Banda Ultra Larga em tradução livre) em aplicações de *Body Area Network* (BAN, Redes de Área Corporal em tradução livre). A principal preocupação surge da possibilidade de absorção significativa de energia quando vários dispositivos UWB são utilizados no corpo humano simultaneamente. Foram introduzidos dois métodos para calcular a Absorção Específica de energia (SA, do inglês *Specific Absorption*) e a SAR. A SA refere-se à quantidade total de energia eletromagnética absorvida por uma massa de tecido, enquanto a SAR mede a taxa na qual essa energia é absorvida. Um dos métodos de cálculo é baseado no domínio do tempo e o outro utiliza o domínio da frequência. Ambos os métodos basearam-se em uma abordagem de diferença finita no domínio do tempo (FDTD, do inglês *Finite-Difference Time-Domain*) dependente da frequência, e seus resultados apresentaram precisões semelhantes. Os resultados revelaram que os níveis de SA e SAR ficaram abaixo dos limites de segurança definidos pelo IEEE. Adicionalmente, foi observado que a exposição múltipla quase não aumenta significativamente a SA e SAR, desde que dois dispositivos UWB estejam separados por pelo menos 20 cm.

No estudo de (WHITTOW *et al.*, 2009), foi examinada a SAR gerada no crânio humano devido a múltiplas fontes. A análise demonstrou que, quando as frequências das fontes são distintas, a SAR total é equivalente à soma das SARs de cada fonte individual. Em casos de frequências idênticas, a interação torna-se mais complexa devido aos efeitos de interferência. Foi observado que, quando as ondas estão exatamente em fase, ocorre interferência construtiva, que pode intensificar a SAR em pontos específicos, potencialmente mais do que a soma das SARs individuais e, em alguns casos, aproximando-se do quadrado da potência individual de cada fonte. Esta intensificação da SAR ocorre devido à natureza da superposição de ondas eletromagnéticas, que resulta em um aumento significativo da intensidade no ponto de interação. Ainda assim, a SAR combinada tende a se

aproximar da configuração de frequências distintas com a variação da diferença de fase. Além disso, a relação entre a SAR média em massa, seja de 1 g ou 10 g, e a correlação dos locais de SAR máximo de cada fonte foi investigada. Notou-se que a energia total absorvida pelo crânio correspondeu à soma das energias absorvidas de todas as fontes individuais, um aspecto relevante para considerar as possíveis implicações à saúde, dado o desafio do corpo humano em dissipar essa energia acumulada.

No estudo de (KIENTEGA *et al.*, 2011), uma abordagem numérica foi introduzida para avaliar a SAR utilizando um modelo heterogêneo do corpo humano. Esse modelo heterogêneo incorpora várias texturas e propriedades de tecidos diferentes, refletindo a complexa composição e variação anatômica encontrada no corpo humano, como músculos, ossos e tecidos moles, para fornecer uma simulação mais precisa da absorção de radiação eletromagnética. Esta avaliação considerou a exposição a múltiplas ondas planas a 2,1 GHz. A intenção principal era avaliar a SAR em resposta a cinco ondas planas distintas. Essas ondas tinham amplitudes que seguiam uma distribuição log-normal, e seus ângulos de azimute e fases eram variados uniformemente entre 0° a 360°. Ao somar e recombinar as amplitudes e fases de cada onda, os pesquisadores empregaram a técnica estatística *Latin Hypercube Sampling* (LHS, Amostragem Latin Hypercube em tradução livre). Após uma análise rigorosa, eles propuseram um modelo de regressão que estabelece uma relação entre o *Whole Body Specific Absorption Rate* (WBSAR, Taxa de Absorção Específica de Corpo Inteiro em tradução livre) e as várias incidências. O estudo utilizou o modelo *Visible Human* (VH), uma representação detalhada e abrangente da anatomia humana que inclui informações anatômicas e visuais em alta resolução. Os efeitos de vários parâmetros, como ângulos de azimute, amplitudes e fases, sobre o WBSAR foram examinados usando a LHS. Uma análise subsequente, utilizando o Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que é uma ferramenta estatística não paramétrica utilizada para avaliar a aderência de uma distribuição de dados a uma distribuição teórica ou para comparar duas amostras empíricas, indicou que as amostras de WBSAR seguiam uma distribuição normal com uma confiabilidade de 95 %.

No estudo de (BAMBA *et al.*, 2012), o ambiente de uma sala fechada é caracterizado como uma cavidade com perdas, integrando componentes de linha de visão e dispersão difusa proveniente de paredes e obstáculos internos. Utilizando teorias da acústica aplicadas às câmaras de reverberação, os pesquisadores adaptaram esses conceitos ao contexto eletromagnético. O estudo priorizou a validação do tempo de reverberação através de um sistema virtual *Multiple Input, Multiple Output* (MIMO). Os resultados confirmaram a consistência deste tempo de reverberação, independentemente da localização ou antena usada, e revelam a influência da polarização da antena. A metodologia empregada analisa o decaimento exponencial no Perfil de Atraso de Energia (PDP, do inglês *Power Delay Profile*) e usa um algoritmo automático de detecção, que leva em conta variações ambientais. Ao aplicar esta teoria em salas adjacentes, observou-se concordância com resultados

medidos. Uma contribuição importante do estudo foi o desenvolvimento de um método simplificado para calcular a Seção Transversal de Absorção (ACS, do inglês *Absorption Cross Section*), que é uma medida da capacidade de um objeto, como o corpo humano, de absorver radiação eletromagnética. Valores estimados de ACS de $0,34 \text{ m}^2$ em 2,3 GHz e $0,36 \text{ m}^2$ em 3 GHz foram obtidos. Esses valores de ACS são usados para calcular a WBSAR, que é a taxa média de absorção de energia eletromagnética pelo corpo inteiro. Utilizando esses valores, a WBSAR alcançou aproximadamente $2,43 \text{ mW/kg}$, representando uma abordagem menos complexa em comparação com simulações ou modelamentos mais detalhados. O *channel sounder*, ou sondador de canal, é uma ferramenta utilizada em telecomunicações para analisar as propriedades de um canal de comunicação móvel, oferecendo informações sobre a transmissão de sinais em diferentes meios. O *virtual channel sounder* executa essa análise de forma simulada em um ambiente computacional, utilizando modelos matemáticos para estimar características do canal de comunicação, permitindo a análise do desempenho de sistemas de comunicação em variados cenários sem a necessidade de testes práticos. Ambos são importantes para o design e a otimização de sistemas de comunicação. As comparações realizadas entre o *channel sounder* e o *virtual channel sounder* validaram o sistema de medição utilizado. Por fim, o estudo explorou variações do tempo de reverberação em quartos adjacentes, identificando pequenas discrepâncias nos resultados, que podem ser atribuídas a diferenças na configuração do sistema e variações nas posições dos transmissores e receptores.

No estudo de (LE *et al.*, 2014), foi apresentado um método simplificado para estimar a SAR de sistemas de transmissão com múltiplas antenas utilizando sondas SAR/campo elétrico escalares convencionais. Para sistemas com duas antenas, apenas três medições com combinações de fase relativa conhecidas das antenas são necessárias para avaliar o SAR para quaisquer outras combinações de fase relativa. O artigo indicou que o SAR pode ser medido usando sondas de campo elétrico escalar, sendo proporcional à potência do campo elétrico interno. Em sistemas com várias antenas operando na mesma frequência, o campo elétrico total e, conseqüentemente, o SAR em cada ponto medido, dependem não apenas da magnitude, mas também das fases relativas devido à somatória vetorial das fontes individuais. A solução proposta no artigo visava reduzir o número de medições necessárias, oferecendo uma estimativa de SAR simples e altamente precisa. Através de análises teóricas e validações experimentais, a metodologia proposta mostrou que as estimativas do SAR concordam bem com as medidas reais. A aplicação do método de estimativa proposto mostrou um desvio muito pequeno, principalmente mantido abaixo de 1%, entre os valores de SAR medidos e estimados. Como resultado, o método proposto pode reduzir significativamente o tempo total de avaliação para um dispositivo em um teste de conformidade.

No estudo de (LE; CHU, 2015), discutiu-se a avaliação da SAR em sistemas de comunicação avançados com múltiplas antenas transmissoras, como conjuntos de em fase e

antenas MIMO, enfatizando a importância da compatibilidade eletromagnética. A medição precisa da SAR em sistemas com múltiplas antenas é desafiadora devido à interação das fases relativas dos campos elétricos emitidos por cada antena. Essa interação pode criar padrões de interferência complexos, dificultando a avaliação correta da SAR. Além disso, os métodos de medição utilizados anteriormente frequentemente resultavam em processos de avaliação demorados e apresentavam o risco de superestimar a SAR real. O trabalho propôs uma técnica de avaliação da SAR máxima usando sondas de campo elétrico vetorial, ativando antenas individualmente enquanto as outras estavam desligadas. A validação ocorreu através de uma simulação numérica com duas antenas, onde os campos elétricos foram medidos com antenas alternadamente ligadas e desligadas. A técnica mostrou um desvio menor que 0,8 % entre estimativa e simulação, confirmando sua eficácia para avaliar precisamente a SAR em sistemas multi-antena.

No estudo de (LE; HAI, 2015) foi abordada a complexidade técnica relacionada à compatibilidade eletromagnética de dispositivos com múltiplas antenas, concentrando-se especificamente na psSAR. A análise envolveu médias espaciais de pico, derivadas de medições planas e volumétricas. Foi observado que a máxima SAR local em diferentes planos pode não corresponder aos mesmos conjuntos de fases relativas das fontes. Isso levou à sugestão de um procedimento simplificado para determinar a SAR média espacial. A pesquisa também avaliou métodos para otimizar o número de medições, conduzindo validações numéricas e experimentais em várias configurações e frequências. O estudo enfatizou a necessidade de considerar alterações nas fases relativas ao estabelecer um método confiável para medir a SAR média espacial em volume. Os modelos de antena em foco foram o dipolo e a IFA. Concluiu-se que o procedimento sugerido é eficaz na determinação da SAR, oferecendo uma abordagem mais precisa e otimizada.

No estudo de (LI *et al.*, 2017) os autores perceberam que métodos tradicionais de avaliação da SAR, apesar de eficazes, podem ser lentos e complexos, especialmente ao considerar múltiplos transmissores. Assim, propuseram um modelo de SAR de alta ordem que expande o modelo de SAR de ordem inferior usando a série de Fourier. Este novo modelo não apenas permite uma avaliação mais rápida e precisa do SAR, baseada nas diferenças de fase entre os transmissores, mas também foi projetado para ser facilmente integrado em outros processos, como algoritmos de otimização. Ao validar o modelo em bandas de comunicação *Long-Term Evolution* (LTE) e com o uso de antenas *Planar Inverted-F Antenna* (PIFAs) e *Inverted-F Antenna* (IFAs), os resultados mostraram o modelo de terceira ordem como o mais adequado para aplicações práticas.

No estudo de (ISHAK *et al.*, 2017), a relação entre SAR e antenas de *microstrip* foi explorada. Essa investigação enfocou tanto antenas individuais quanto em configuração de conjuntos 1×2 . A variação da frequência operacional foi estabelecida entre 0,8 GHz e 2,6 GHz. Para simular a exposição à radiação eletromagnética na cabeça humana, foi utilizado um modelo antropomórfico conhecido como SAM (*Specific Anthropomorphic*

Mannequin). Este manequim é projetado para representar uma cabeça humana adulta média, permitindo uma estimativa mais precisa da absorção de radiação em tecidos humanos. Na simulação, a antena foi posicionada a uma distância de 10 mm do SAM para replicar uma situação de uso típica de dispositivos eletrônicos. Embora a SAR seja um parâmetro que mede a absorção de energia em uma região específica e relativamente pequena, o uso do SAM permite avaliar como essa energia é distribuída ao longo de uma área maior, como a cabeça humana. Assim, a simulação com o SAM oferece uma visão mais abrangente da exposição ao EMF e de como a radiação é absorvida em diferentes partes da cabeça. Foi observado que os valores da SAR para as duas configurações de antena permaneceram dentro dos limites estabelecidos tanto pela ICNIRP quanto pela FCC. Uma redução nos valores da SAR foi evidente na configuração de múltiplas antenas quando comparada à configuração de antena única, sendo isso atribuído à distribuição mais uniforme da energia no modelo.

No estudo de (ABERBOUR *et al.*, 2018) foi apresentado um procedimento para avaliar a SAR, de dispositivos de comunicação MIMO que operam com diversidade de transmissão. Em contraste com uma avaliação mais tradicional da SAR, que depende do teste de todos os estados do conjunto de antenas do dispositivo, a avaliação proposta permite uma maior margem para minimizar a SAR enquanto otimiza o desempenho de radiação do dispositivo. O estudo utilizou o sistema de medição de campo próximo plano ART-MAN para medir o vetor de campo elétrico em um simulante de tecido humano. Este procedimento eficiente baseia-se na medição do vetor fasor de campo elétrico independente do tempo irradiado pelo dispositivo em teste, e endereça sistemas de medição de campo próximo que usam uma onda de referência de fase. Os resultados da validação experimental mostraram que a abordagem proposta é precisa e eficiente, com um erro inferior a 4 % nos valores de SAR em relação à medição direta de campo total.

No estudo de (LE *et al.*, 2019) foi introduzida uma abordagem que permite estimar a SAR de transmissores de múltiplas antenas usando modelos de campo elétrico de K-ordem. Considerando que métodos tradicionais, que requerem testes de todas as combinações de fases entre antenas, podem ser impraticáveis, a técnica proposta requer menos medições e aprimora a precisão. Enquanto métodos anteriores apresentavam erros de até 9 % em configurações de três antenas, esta abordagem reduziu o erro para 0,1 % ou 0,01 % em estimativas de 2ª e 3ª ordens respectivamente. O estudo validou-se usando dipolos de meia onda a 2,45 GHz com um *phantom* plano, mostrando concordância entre SARs simulados e estimados.

No estudo de (XU *et al.*, 2019) foi realizado um estudo abordando a avaliação da exposição à RFR resultante de múltiplas fontes de antena em dispositivos celulares. Neste trabalho, foram desenvolvidas formulações para métricas de exposição, incluindo a SAR, a densidade de potência e a densidade de potência equivalente de onda plana. Essas formulações levaram em consideração diversos cenários de potência das antenas, con-

templando tanto a situação em que a potência total era mantida constante quanto aquela em que as antenas individuais tinham restrições adicionais de potência. Uma contribuição significativa deste trabalho foi a introdução da Decomposição de Rank Semidefinido (SDR) como uma abordagem para avaliar rigorosamente a exposição máxima. A SDR demonstrou ser capaz de limitar a exposição a níveis aceitáveis de conformidade com os limites de RF, garantindo que não houvesse subestimação e limitando a superestimação a um máximo de 27,3%. Dois estudos de caso específicos foram apresentados para ilustrar a aplicabilidade das abordagens propostas. O primeiro estudo de caso analisou dispositivos MIMO-SAR com quatro antenas, considerando diferentes tipos de *phantoms*, como o plano e o antropomórfico. Os resultados revelaram que os métodos tradicionais de combinação de campo escalar tendiam a superestimar significativamente a exposição em comparação com a abordagem SDR. O segundo estudo de caso explorou dispositivos 5G equipados com um conjunto de antenas de fenda de 28 GHz. Novamente, o estudo demonstrou que métodos baseados em SDR, bem como métodos de combinação de campo escalar, eram mais adequados para diferentes tamanhos de fronteira de conformidade em equipamentos celulares. A conclusão foi que a escolha do método de avaliação dependia das características específicas do dispositivo e de sua proximidade a limites de conformidade.

No estudo de (LE *et al.*, 2019) é introduzida uma técnica avançada de estimativa de SAR para transmissores de múltiplas antenas, visando aprimorar a precisão na avaliação da conformidade com padrões de segurança de RF. Em contraste com abordagens anteriores que se baseavam em técnicas de estimativa simplificadas, o método proposto adota um modelo de ordem k , exigindo $(2K + 1)N - 1$ medições iniciais para transmissores com N antenas, com as medições sendo realizadas com conjuntos predefinidos de fases relativas. Validada através de experimentos com uma configuração de três antenas, onde a SAR é aferida dentro de um *phantom* composto de líquido dielétrico, a técnica demonstrou capacidade de fornecer estimativas de SAR com elevada precisão, requerendo menos medições totais. Em comparação com metodologias prévias, a abordagem apresentou menores erros de estimativa, mostrando-se aplicável na determinação do campo elétrico em diversos contextos. Consequentemente, esta técnica tem potencial significativo para otimizar e aumentar a precisão da avaliação de dispositivos em relação à conformidade com normas internacionais de segurança de RF.

No estudo de (TENIOU *et al.*, 2020) é apresentada uma metodologia para avaliar a SAR em sistemas MIMO. A abordagem se baseia na superposição linear dos campos elétricos. Essencialmente, essa técnica busca minimizar o número de medições necessárias, reduzindo de 2^N para apenas $N + 1$. A validade desta metodologia foi testada e verificada em diferentes cenários, mostrando que a metodologia proposta estava em harmonia com valores de SAR medidos diretamente.

No estudo de (ZHOU; ZHANG; LI, 2020) é apresentado um estudo que foca no de-

sign de antenas e sua interação com modelos de cabeça humana para avaliar a SAR de múltiplas fontes simultâneas, particularmente em sistemas MIMO. Uma antena retangular com fendas foi criada, utilizando o material dielétrico Rogers Rt/Duroid 5880. Para avaliar o comportamento eletromagnético próximo a um modelo de cabeça, foi usado o SAM, um modelo de cabeça padrão baseado em dados antropométricos de adultos masculinos, preenchido com fluido para simular tecidos da cabeça. As simulações foram conduzidas usando o algoritmo FDTD por sua estabilidade e precisão, integrado no software SEMCAD 15.6, e os requisitos de hardware incluíam CPUs Xeon X5677 e GPUs P6000. O objetivo principal era calcular a distribuição do campo elétrico e, em seguida, avaliar o valor SAR para múltiplas fontes, utilizando a otimização via algoritmo de enxame de partículas (PSO). Os resultados mostraram que o PSO é uma ferramenta eficaz, atingindo uma taxa de sucesso de 100 % com 8 partículas e demonstrando ser mais eficiente que o método Monte Carlo. A pesquisa destacou o desafio de avaliar a segurança da radiação eletromagnética para equipamentos de comunicação 5G com múltiplas fontes de transmissão simultâneas. Conclui-se que a técnica proposta pode fornecer uma estimativa precisa dos limites SAR em cenários realistas, potencialmente guiando o design de sistemas MIMO mais seguros e eficientes.

Em (GHASEMIFARD *et al.*, 2021) foi investigada a relevância do deslocamento de fase entre elementos de um conjunto de duas antenas dipolo para avaliações da SAR. Descobriu-se que, em uma curta distância de avaliação (um décimo do comprimento de onda do phantom), as antenas comportam-se como se fossem fontes eletromagnéticas independentes. Nesse cenário, a interação entre as ondas emitidas por cada antena é mínima, resultando em uma SAR combinada que é praticamente equivalente à maior SAR produzida por qualquer uma das antenas individualmente, sem efeitos significativos de interferência construtiva que poderiam aumentar a SAR além desse nível. Para separações de antena de meio comprimento de onda ou mais, a variação da SAR com o deslocamento de fase é mínima. Portanto, medir SAR com antenas operando simultaneamente, desconsiderando o deslocamento de fase, fornece uma estimativa precisa da exposição, reduzindo significativamente o tempo de medição. Os resultados para o arranjo de antenas dipolo foram validados analisando uma estação base de rádio 5G Ericsson de baixa potência com quatro ramificações de antena.

Mais recentemente, em (ISHAK; SEMAN, 2022), os efeitos térmicos da exposição humana a EMFs provenientes de dispositivos sem fio em frequências sub-6 GHz foram investigados. Considerando a SAR como métrica principal, o estudo fez uma distinção entre antenas de elemento único e conjuntos de múltiplos elementos, uma consideração importante para as tecnologias emergentes 5G e B5G. A pesquisa ressaltou a influência de diversos fatores na SAR, entre eles a potência de excitação, frequência de operação e distância, propriedades dielétricas do tecido humano. Em antenas com múltiplos elementos, o número de antenas em um conjunto tem o potencial de reduzir a SAR, apesar da

diretividade aumentada. Isso ocorre porque, embora a diretividade seja maior, a energia eletromagnética é distribuída de maneira mais controlada e focada, o que pode resultar em uma menor intensidade de radiação em determinadas áreas, como em proximidade ao corpo humano. Assim, a configuração otimizada de múltiplos elementos permite uma gestão eficiente da radiação eletromagnética, contribuindo para a redução da SAR.

A comunidade científica tem se dedicado a entender melhor a interação entre EMFs e o corpo humano, e enquanto os limites estabelecidos para a SAR parecem garantir segurança até o momento, a evolução rápida das tecnologias sem fio torna este campo de estudo mais relevante do que nunca. As implicações para a saúde pública, bem como os impactos sobre as diretrizes de design de dispositivos, são pontos de foco contínuo para a comunidade científica.

Para além dos estudos mencionados, vale ressaltar a importância da metodologia e precisão dos modelos utilizados em pesquisas. Muitos estudos empregam modelos detalhados do corpo humano, considerando a heterogeneidade dos tecidos, visando obter resultados mais acurados e confiáveis na análise da interação dos campos elétricos com os tecidos biológicos. Técnicas experimentais como a tomografia de impedância elétrica estão sendo empregadas em pesquisas médicas. Esta técnica de imagem médica não invasiva mapeia a distribuição de impedância elétrica em um objeto ou corpo, baseando-se em medições de correntes e tensões produzidas por eletrodos em sua superfície. Essa técnica é utilizada para validar simulações e oferecer uma avaliação da interação entre ondas eletromagnéticas e o corpo humano.

Em resumo, a pesquisa em SAR e exposição humana a EMFs tem evoluído rapidamente, e o crescente uso de dispositivos sem fio torna este campo de estudo mais relevante do que nunca. As implicações para a saúde pública, bem como os impactos sobre as diretrizes de projeto de dispositivos, são pontos de foco contínuo para a comunidade científica.

A Tabela 1 apresenta uma reunião desses estudos apresentados no capítulo, em ordem cronológica, com pontos-chaves de cada um e, ao final da tabela, encontra-se também o presente trabalho e sua contribuição para a sequência de desenvolvimento sobre o tema.

Tabela 1: Resumo de estudos sobre avaliação de SAR em dispositivos de comunicação e eletrônicos.

Autores	Ano	Objetivo do Estudo	Metodologia	Principais Conclusões
Wang; Wang	2008	Estudo sobre implicações de segurança biológica de UWB em aplicações BAN	Dois métodos para calcular SA e SAR	Níveis de SAR abaixo dos limites da IEEE
Whittow et al.	2009	SAR no crânio humano devido a múltiplas fontes	Análise do SAR para frequências distintas ou idênticas	SAR total é soma dos SARs individuais
Kientega et al.	2011	Avaliar SAR usando um modelo humano heterogêneo	Avaliação do SAR para cinco ondas planas	Modelo de regressão para WBSAR e várias incidências
Bamba et al.	2012	Caracterizar ambiente de sala fechada como cavidade com perdas	Teorias acústicas em câmaras de reverberação eletromagnética	Método simplificado para calcular ACS
Le et al.	2014	Estimar SAR de sistemas de transmissão multi-antena	Sondas de SAR/campo elétrico escalares	Mínimo desvio nas estimativas de SAR
Le; Hai	2015	Complexidade técnica em compatibilidade eletromagnética	Médias de pico espacial de medições planares e volumétricas	Procedimento simplificado para média espacial do SAR
Le; Chu	2015	Avaliação SAR em sistemas multi-antena avançados	Técnica para avaliação máxima do SAR	Menos de 0.8% de desvio entre estimativa e simulação

Continua na próxima página

Tabela 1 – Continuação

Autores	Ano	Objetivo do Estudo	Metodologia	Principais Conclusões
Ishak et al.	2017	Relação entre SAR e antenas microstrip	Uso de SAM para simulação de exposição	SAR dentro dos limites para configurações de antena
Li et al.	2017	Modelo de SAR de alta ordem para múltiplos transmissores	Expansão da série de Fourier do modelo de SAR	Avaliação mais rápida e precisa do SAR
Xu et al.	2019	Avaliação da exposição à RFR de múltiplas fontes de antena	Formulações para métricas de exposição incluindo SAR	SDR para avaliação rigorosa da exposição
Le et al.	2019	Estimativa avançada de SAR para transmissores multi-antena	Modelo k-ordem com $(2K + 1)N - 1$ medições iniciais	Alta precisão em estimativas de SAR com menos medições
Zhou; Zhang; Li	2020	Design de antenas e interação com modelos de cabeça humana	Antena retangular com fendas em SAM	Técnica precisa para estimativa de SAR
Aberbour et al.	2018	Avaliação de SAR em dispositivos MIMO com diversidade de transmissão	ART-MAN para medir campo elétrico em tecido humano	Abordagem eficiente com menos de 4% de erro
Ghasemifard et al.	2021	Deslocamento de fase em arranjos de duas antenas para SAR	Análise de avaliação de curto alcance	SAR preciso sem deslocamento de fase
Ishak; Seman	2022	Efeitos térmicos de exposição a EMFs em frequências sub-6 GHz	Influência de potência de excitação, frequência e tecido humano	Antenas multi-elemento reduzem SAR

Continua na próxima página

Tabela 1 – Continuação

Autores	Ano	Objetivo do Estudo	Metodologia	Principais Conclusões
SOARES, Escopelli Norton	2023	Estudo sobre a exposição à radiação de múltiplas fontes em salas de aula e avaliação da SAR.	Uso do CST Studio Suite® para simular SAR em sala de aula com variação de distância entre mesas	Aumento da psSAR 1 g e 10 g na cabeça com proximidade entre alunos

3 METODOLOGIA

Neste capítulo de metodologia, detalham-se as abordagens e técnicas utilizadas no presente trabalho que investiga a exposição à RFR em uma sala de aula em que cada aluno porta um laptop.

Iniciando com a definição do ambiente de estudo, o capítulo segue com o modelamento das fontes de radiação e a implementação de condições de contorno específicas. Também são abordados aspectos da malha utilizada nas simulações e dos modelos humanos empregados. Além disso, serão discutidas as considerações práticas que influenciaram a escolha dos métodos escolhidos, como a otimização dos recursos computacionais e a busca pela precisão dos resultados.

3.1 Definição do Ambiente de Ensino

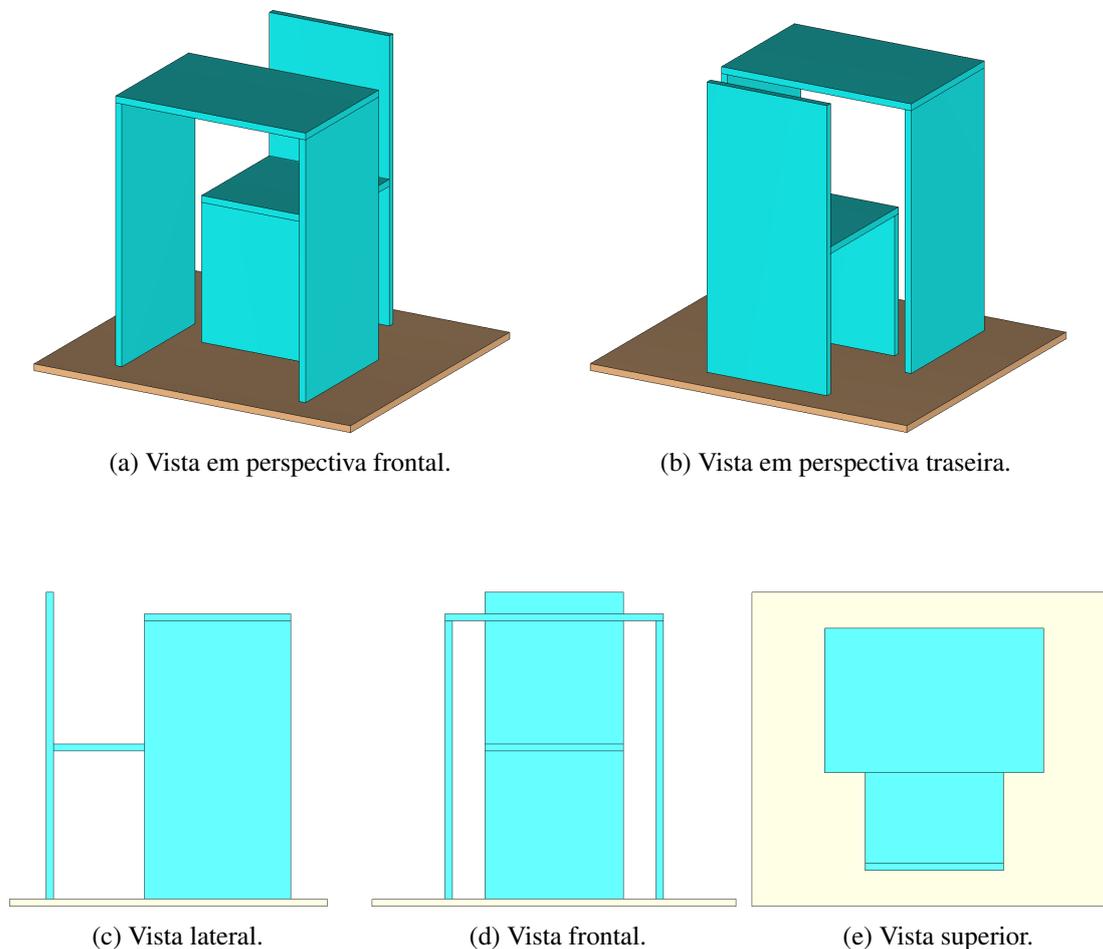
A definição detalhada do ambiente de ensino que compõe as simulações realizadas neste trabalho é fundamental para a compreensão e replicabilidade do estudo. Nesta seção são detalhadas a configuração da sala de aula proposta, as dimensões e distâncias, os materiais utilizados e as condições de contorno adotadas.

O ambiente de ensino deste estudo é concebido como uma sala de aula tradicional, com mesas e cadeiras individuais, dispostas em filas e colunas ordenadas. Esta configuração comum em salas de aula motivou sua seleção. Sobre cada mesa, há um laptop, e as antenas dos laptops são as únicas fontes de radiação consideradas neste trabalho.

Para a sala de aula que considerou o modelo humano adulto, as mesas possuem altura de 790 mm, largura de 600 mm e comprimento de 400 mm. As cadeiras apresentam altura do assento de 430 mm, largura e comprimento do assento são 380 mm e 370 mm respectivamente, e a altura do encosto é de 850 mm. A espessura dos componentes tanto da mesa quanto da cadeira é de 20 mm. A Figura 1 ilustra esse mobiliário.

Para a sala de aula que considerou o modelo humano infantil, as mesas possuem altura de 450 mm, largura de 600 mm e comprimento de 400 mm. As cadeiras apresentam altura do assento de 260 mm, largura e comprimento do assento são 380 mm e 270 mm respectivamente, e a altura do encosto é de 530 mm. A espessura dos componentes tanto

Figura 1 – Ilustrações do modelo de mesa e cadeira utilizados nas simulações com o modelo humano adulto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

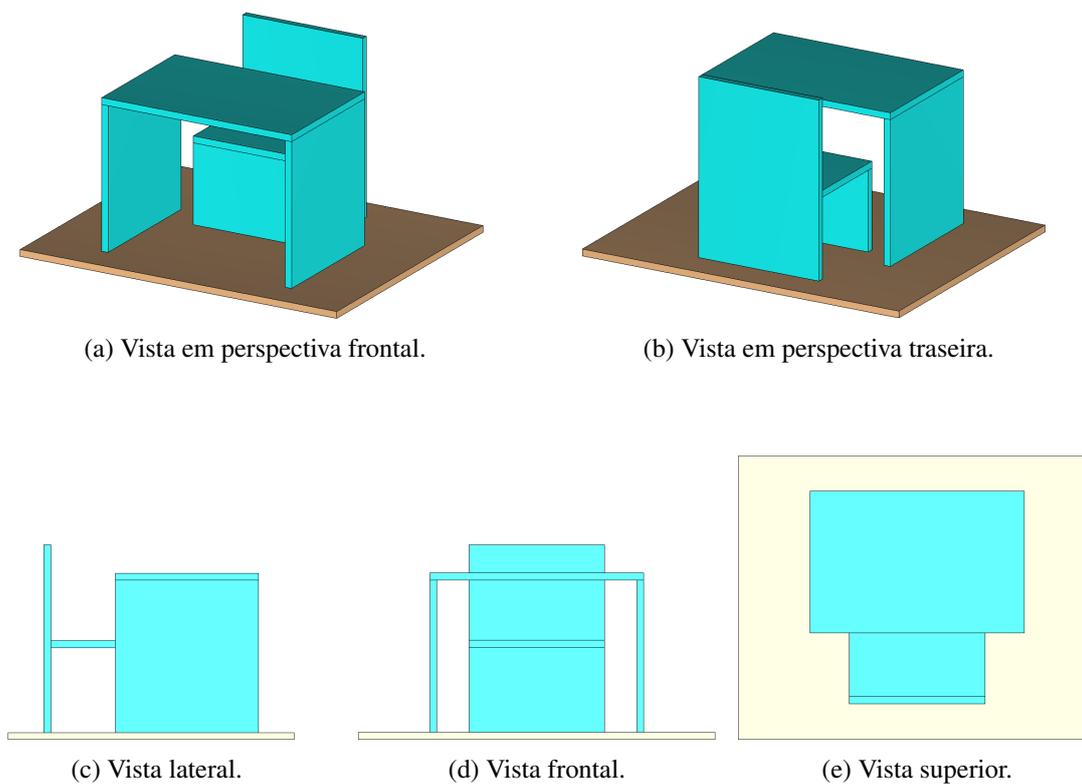
da mesa quanto da cadeira é de 20 mm. A Figura 2 ilustra esse mobiliário.

Em cima de cada mesa também foi colocado um suporte para o laptop, visando a ergonomia da posição que o modelo humano se encontra. Sem o suporte para o laptop, o modelo humano fica posicionado com os braços e as mãos de maneira menos anatômica, e também a parte superior da tela não estaria na altura dos olhos. O suporte para o laptop é uma peça de base retangular e seção transversal triangular, conforme ilustrado na Figura 3. A largura e comprimento da base são 400 mm e 300 mm, respectivamente, e a altura é de 80 mm.

Para a modelagem deste ambiente, atribuiu-se uma espessura de 20 mm ao piso, e o material escolhido tanto para o mobiliário (mesa, cadeira e suporte para laptop) quanto para o piso foi a madeira. As características elétricas desse material foram consideradas, sendo o valor da constante dielétrica $\epsilon_r = 1,65$ e da tangente de perda dielétrica $\tan(\delta) = 0,035$.

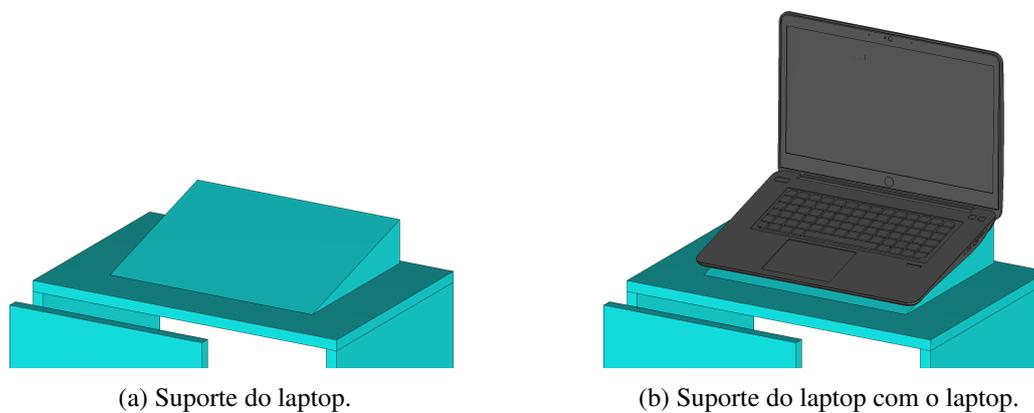
Seria possível utilizar peças metálicas no mobiliário, mas optou-se por não incluí-las,

Figura 2 – Ilustrações do modelo de mesa e cadeira utilizados nas simulações com o modelo humano infantil.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3 – Ilustração do suporte do laptop.



Fonte: Elaborada pelo autor.

uma vez que outras configurações de mobiliário são viáveis. A incorporação de componentes metálicos no mobiliário induziria alterações na dinâmica de propagação dos EMFs. Os metais atuariam como refletores para ondas eletromagnéticas. Esta reflexão resulta-

ria em padrões de interferência mais complexos, onde a superposição de ondas refletidas com as ondas incidentes originais poderia levar a fenômenos de interferência construtiva e destrutiva. Tal interação também interferiria na distribuição espacial da intensidade dos EMFs, criando zonas de amplificação (interferência construtiva) ou atenuação (interferência destrutiva). Além disso, a presença de superfícies metálicas poderia gerar efeitos de múltiplas reflexões e difrações, adicionando complexidade ao perfil de propagação dos sinais.

O mobiliário foi elaborado de forma a possuir uma geometria bastante simplificada com ângulos retos apenas, com exceção do suporte para o laptop que tem seção transversal triangular. A opção pela simplicidade e pelos ângulos retos foi motivada pela necessidade de tornar a malha de simulação menos densa, reduzindo assim o consumo de recursos computacionais. Também considerou-se que detalhes menores de mobiliário pouco contribuiriam para a qualidade dos resultados da psSAR.

Observa-se uma diferença significativa na comparação entre a quantidade de células necessárias para formar a malha de dois mobiliários diferentes — um com extremo refinamento geométrico e outro, utilizado neste trabalho, com extrema simplificação geométrica — e considerando o comprimento de onda para a frequência de 2,45 GHz no domínio da simulação. Para o mobiliário mais detalhado foram necessárias 37 746 696 células, enquanto para o mobiliário mais simplificado foram necessárias apenas 3 239 775 células. A Figura 4 mostra o modelo detalhado de mesa e cadeira utilizado para essa comparação.

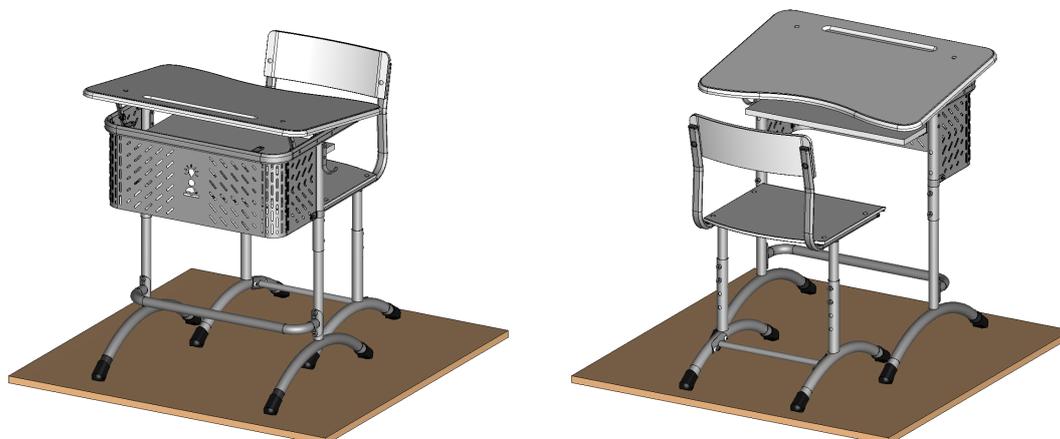
3.2 Modelamento das Fontes de Radiação

O modelamento das fontes de radiação é fundamental para entender e quantificar a exposição a EMFs. Nesta seção serão detalhadas as características técnicas das antenas dos laptops.

Cada laptop neste estudo possui uma antena para comunicação wi-fi na frequência de 2,45 GHz. A banda de wi-fi de 5,5 GHz não foi abordada, assim como comunicação por Bluetooth e quaisquer outros tipos de comunicação que possam representar outras fontes de radiação eletromagnética. É relevante notar que existe uma variedade de antenas utilizadas em laptops para a comunicação wi-fi, sendo que antenas de banda dupla para as bandas de 2,45 GHz e 5,5 GHz são comuns (IEEE, 2021).

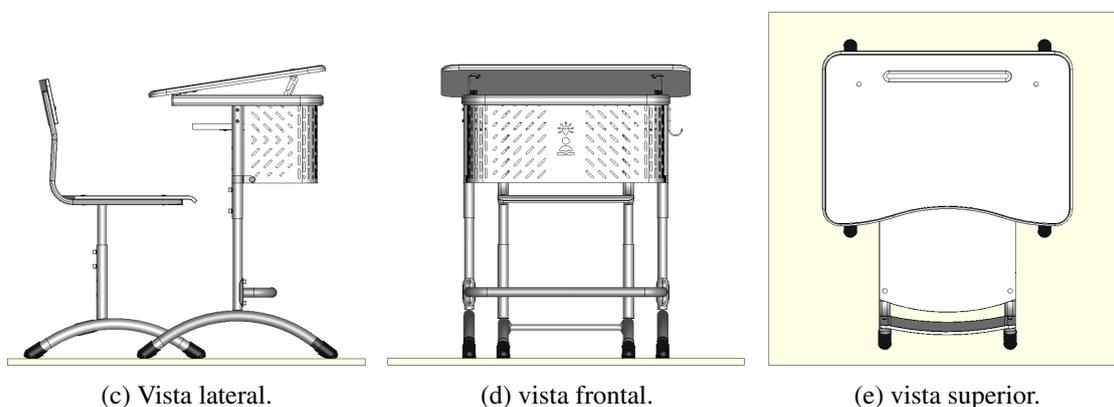
Apesar de existirem antenas de banda dupla que operam em 2,45 GHz e 5,5 GHz, optou-se por não abordar a frequência de 5,5 GHz devido ao aumento significativo no consumo de recursos computacionais associado a esta frequência. O comprimento de onda associado à frequência de 5,5 GHz é menor que o associado à frequência de 2,45 GHz. Na formulação básica do FIT, uma técnica numérica amplamente utilizada em eletromagnetismo, a resolução da malha (ou tamanho da célula) geralmente é determinada com base no comprimento de onda da frequência de interesse. Assim, frequências mais altas, com

Figura 4 – Ilustrações do modelo detalhado de mesa e cadeira.



(a) Vista em perspectiva frontal.

(b) vista em perspectiva traseira.



(c) Vista lateral.

(d) vista frontal.

(e) vista superior.

Fonte: Elaborada pelo autor.

comprimentos de onda menores, exigem células de malha menores para um modelamento adequado.

Nas investigações realizadas neste estudo, simular a frequência de 5,5 GHz requer uma malha aproximadamente 9,5 vezes mais densa que a necessária para 2,45 GHz, conseqüentemente aumentando o tempo de simulação.

Além das considerações computacionais, a escolha da frequência de 2,45 GHz também tem implicações biológicas significativas. Em meios gerais, a profundidade de penetração pelicular, δ , está associada ao inverso da constante de atenuação α . A constante α , por sua vez, depende tanto da permissividade ϵ quanto da tangente de perda dielétrica do meio $\tan \theta$. Na frequência de 2,45 GHz, a constante de atenuação é geralmente menor do que em 5,5 GHz, resultando em uma maior profundidade de penetração. Isso implica que a radiação eletromagnética pode penetrar mais profundamente nos tecidos humanos na frequência de 2,45 GHz, alcançando maiores valores de SAR em regiões mais profundas, como o cérebro. A relação entre a profundidade de penetração pelicular e a constante de atenuação é dada por:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

e a relação de α com a permissividade e a tangente de perda é:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2}} \left(\sqrt{1 + \tan^2 \theta^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (3)$$

onde ω é a frequência angular e ε' é a parte real da permissividade.

A escolha da frequência de 2,45 GHz para este estudo relacionado à interação de EMFs com tecidos biológicos, especialmente no contexto de SAR, tem implicações não apenas em termos de profundidade de penetração e atenuação, mas também em relação ao tempo de relaxação do dipolo molecular.

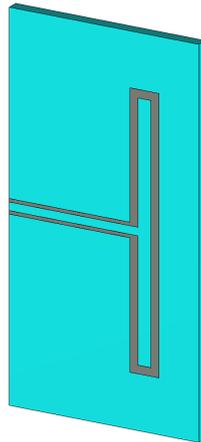
Na frequência de 2,45 GHz, a interação da radiação eletromagnética com os tecidos humanos é significativamente influenciada pelas propriedades dielétricas desses tecidos, como a constante dielétrica e a tangente de perda dielétrica. Estas propriedades estão intimamente ligadas ao tempo de relaxação dos dipolos moleculares nos tecidos, especialmente das moléculas de água, que são abundantes no corpo humano.

O tempo de relaxação do dipolo molecular é um parâmetro que descreve a rapidez com que os dipolos respondem a um campo elétrico externo. Em frequências próximas ou inferiores ao inverso do tempo de relaxação, como é o caso dos 2,45 GHz para muitos tecidos biológicos, os dipolos podem seguir o campo elétrico alternado mais eficientemente. Isso significa que a absorção de energia e a conversão subsequente em calor (processo que contribui para a SAR) podem ser mais eficazes nessa frequência em comparação com frequências mais altas, como os 5,5 GHz.

Com a frequência de operação estabelecida, a próxima etapa envolve a análise detalhada das antenas utilizadas nos laptops. Optou-se pelo dipolo dobrado como a antena responsável pela comunicação wi-fi dos laptops. Essa antena é descrita em (BALANIS, 2016). Nesse trabalho suas características técnicas incluem uma espessura de substrato de 1,6 mm e uma constante dielétrica do substrato de $\varepsilon_r = 4,35$, utilizando material FR4. As dimensões planares são de 52 mm \times 27 mm. A largura das trilhas na linha de alimentação de 0,45 mm e um espaçamento entre elas de 1,12 mm. A largura da trilha no dipolo também é de 1,12 mm. O seu design compacto a torna uma escolha adequada para locais com espaço limitado, assegurando a robustez necessária para operações confiáveis. Quando devidamente projetada para operar em frequências específicas, a antena dipolo dobrado é também apta para aplicações em wi-fi. A Figura 5 ilustra esta antena. A escolha do dipolo dobrado foi motivada por ser uma antena planar e pela facilidade de análise, além de proporcionar um padrão de irradiação omnidirecional, característica essencialmente desejada neste dispositivo. A Figura 7a ilustra o laptop utilizado neste estudo. A antena, posicionada na parte superior da tampa do laptop, é exibida na Figura 7b. Essa disposição assegura que os nulos do diagrama de irradiação sejam orientados verticalmente, con-

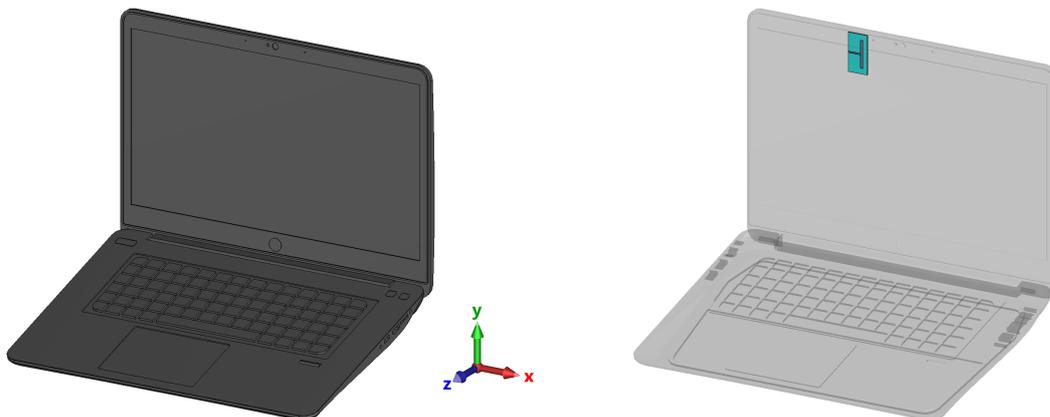
forme demonstrado na Figura 8. Na Figura 7 é mostrada a foto de um notebook pavilion zv5000 da HP aberto exibindo as antenas wi-fi do dispositivo. No sistema de coordenadas esféricas adotado para o diagrama de irradiação, um ângulo $\theta = 90^\circ$ corresponde ao plano xy , um ângulo $\phi = 0^\circ$ corresponde ao plano xz e um ângulo $\phi = 90^\circ$ corresponde ao plano yz .

Figura 5 – Antena do tipo dipolo dobrado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Ilustração do laptop e laptop translúcido exibindo o posicionamento da antena.



(a) Ilustração do laptop utilizado e eixos coordenados.

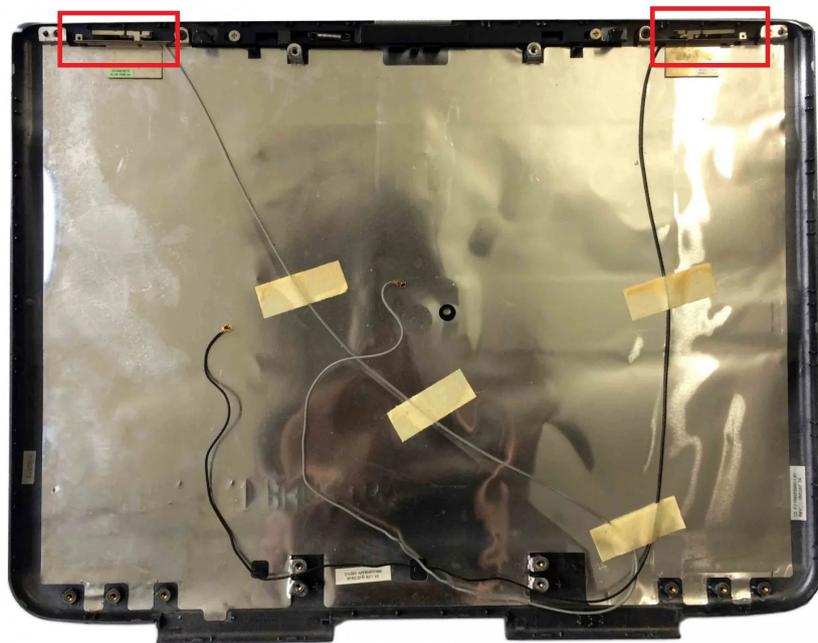
(b) Localização da antena.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a antena de wi-fi em laptops é usualmente utilizada a potência de 100 mW conforme o padrão IEEE 802.11-2020 (IEEE, 2021). O tipo de porta utilizada para alimentação dessa antena foi do tipo “porta discreta”, com impedância de 50Ω .

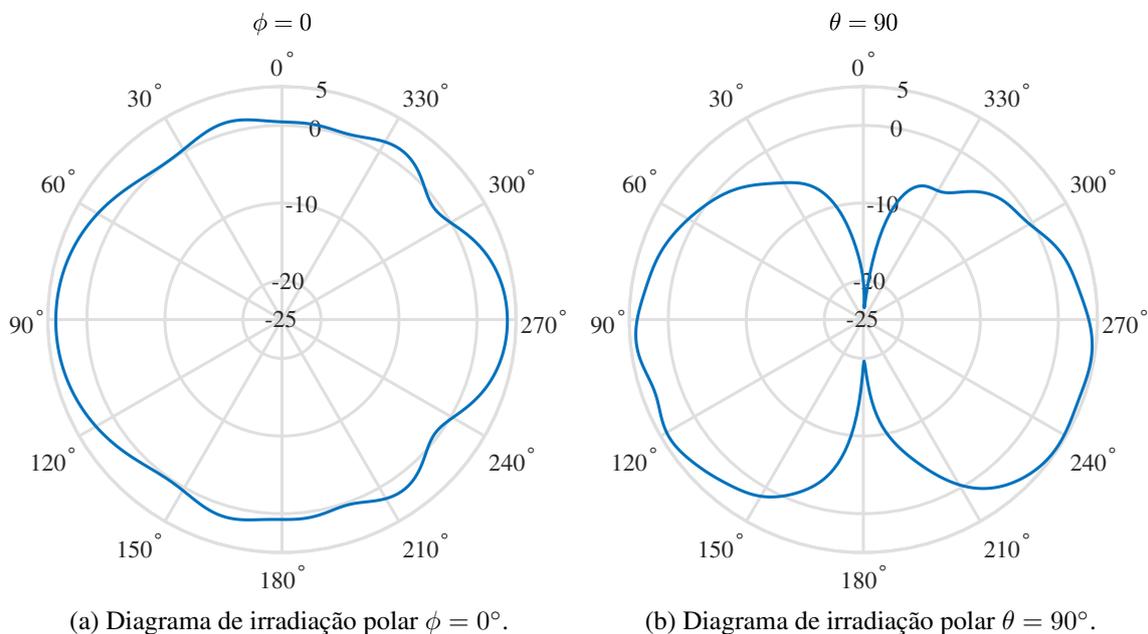
Foi realizada uma análise da eficiência da antena em três cenários distintos, medindo seu coeficiente de reflexão (parâmetro S_{11}) em cada situação. Inicialmente, avaliou-se

Figura 7 – Foto do interior da tampa de um notebook Hp Pavilion Zv5000 com destaque das antenas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Diagrama de irradiação do laptop.

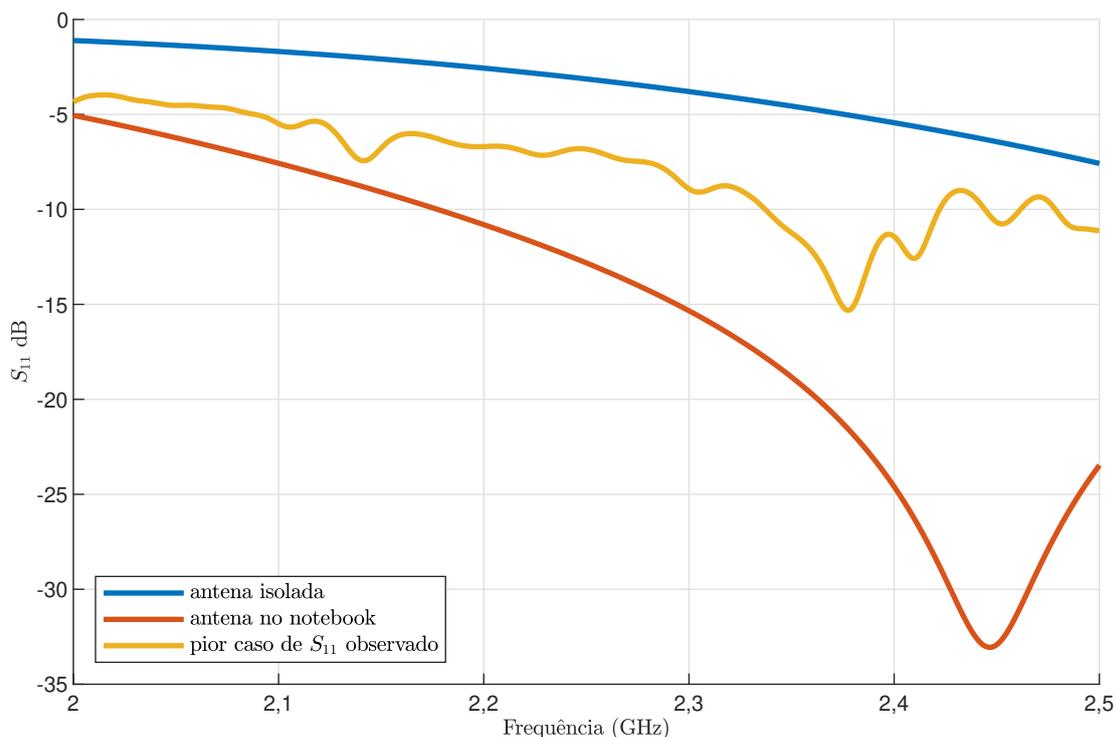


Fonte: Elaborada pelo autor.

a antena isoladamente, sem quaisquer outros dispositivos ou influências externas. Posteriormente, procedeu-se à análise da antena integrada ao laptop, mantendo as mesmas condições de isolamento, para determinar o impacto da integração no seu desempenho. Finalmente, a antena integrada ao laptop foi examinada em um ambiente de sala de aula,

introduzindo fatores externos como a presença de outros alunos, mobiliário e laptops adicionais, visando identificar o pior cenário para a eficiência da antena em termos de adaptação de impedância. Os resultados destas medições são apresentados na Figura 9, onde constata-se que não houve uma variação drástica no parâmetro S_{11} na frequência de operação. Especificamente, o S_{11} alterou-se de -13 dB no cenário em que o laptop estava isolado para $-10,7$ dB no cenário mais adverso encontrado nas simulações. Este último ocorreu quando na simulação a distância entre as classes foi de 25 mm, e apesar do valor parâmetro S_{11} na frequência de operação, percebe-se que em decorrência das inúmeras interferências do ambiente a curva ficou bastante descaracterizada quando comparada às demais. Observou-se uma melhora no parâmetro S_{11} quando a antena está acoplada ao laptop. Esta melhora deve-se ao design da antena, projetada para funcionar em conjunto com o laptop, ao invés de maneira isolada.

Figura 9 – Parâmetro S_{11} da antena em situações distintas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As eficiências de radiação da antena, avaliada tanto de forma isolada quanto quando integrada ao laptop, são respectivamente 0,90 e 0,89.

As eficiências, tanto de radiação quanto total, da antena, quando avaliada de forma isolada e quando integrada ao laptop, estão discriminadas na Tabela 2.

Quando analisamos o funcionamento das antenas dos laptops em conjunto, o estudo se concentrou na representação de uma situação de pior caso, onde todos os dispositivos estão ativos ao mesmo tempo. Isso significa que cada laptop está emitindo radiação eletromagnética de forma contínua, sem pausas ou intermitência.

Tabela 2 – Eficiências da antena isolada e no laptop.

Localização da antena	Eficiência de radiação e_r	Eficiência total e_t
isolada	0,90	0,74
integrada ao laptop	0,89	0,89

3.3 Simulações e Implementação de Condição de Contorno Periódica

A simulação de SAR em ambientes específicos, como uma sala de aula, exige uma análise detalhada que contempla a interação entre as fontes de radiação eletromagnética e os elementos no local. Assim, um desafio significativo é a complexidade geométrica e a elevada demanda por recursos computacionais. Nas simulações realizadas neste trabalho, adotaram-se Condições de Contorno Periódicas (PBC, do inglês *Periodic Boundary Condition*). Sob essas condições, o domínio da simulação é confinado a uma célula unitária, denominada aqui de “célula unitária PBC”, para distinção das células da malha de simulação, conforme abordado na Seção 3.4. Esta estratégia permite replicar a célula unitária PBC infinitamente em direções específicas, garantindo assim uma representação adequada da regularidade geométrica do problema.

As células unitárias PBC neste trabalho são compostas por um modelo humano, uma mesa e uma cadeira, todos adequados ao modelo humano utilizado, além de piso. As direções de replicação das células ocorrem no plano horizontal, nos sentidos $+x$, $-x$, $+y$ e $-y$; e as condições de contorno abertas ocorrem na direção vertical, nos sentidos $+z$ e $-z$.

As condições de contorno abertas disponíveis no *software*, para uso com o solucionador no domínio do tempo, incluem a Camada Perfeitamente Adaptada (PML, do inglês *Perfectly Matched Layer*). A PML é uma camada absorvedora que permite estender a geometria de simulação virtualmente ao infinito, permitindo que as ondas eletromagnéticas atravessem os limites do domínio simulado com reflexões mínimas, simulando assim um espaço aberto infinito. No CST Studio Suite®, utiliza-se o parâmetro nível estimado de reflexão (e.r.l., do inglês *estimated reflection level*) para quantificar a eficiência da absorção de ondas por uma condição de fronteira aberta. Um e.r.l. de 1×10^{-4} , equivalente a 0,0001, indica que a amplitude da onda refletida é apenas 0,0001 vezes a da onda incidente, significando uma absorção eficaz. Embora diminuir o e.r.l. possa aumentar a precisão da simulação, isso também eleva a demanda computacional em termos de memória e tempo de simulação.

A célula unitária PBC com o modelo humano “Laura 2.0” tem a forma de um paralelepípedo com as dimensões 100 cm \times 87 cm \times 149 cm, já a do modelo humano “child 7y” tem dimensões 100 cm \times 80 cm \times 105 cm. A Figura 10 ilustra uma célula unitária PBC com o modelo humano “Laura 2.0” e a Figura 11 mostra outra com o modelo humano

“child 7y”. Os modelos humanos utilizados nesse trabalho fazem parte de um conjunto de modelos já preexistentes no simulador. Em ambos os casos, tanto a distância da parte inferior do piso até a PML quanto a distância da parte mais alta do modelo humano até a PML é de aproximadamente 3,1 cm. Esta distância corresponde a $1/4$ do comprimento de onda da frequência analisada (2,45 GHz) no vácuo.

Nessas figuras, as arestas do contorno da célula unitária PBC, formando um paralelepípedo, são visíveis. As faces com contornos laranja marcam as fronteiras com as células replicadas, indicando a direção da replicação. As faces com contornos violeta representam condições de contorno abertas, que simulam a interação das ondas com um ambiente externo ao da célula unitária.

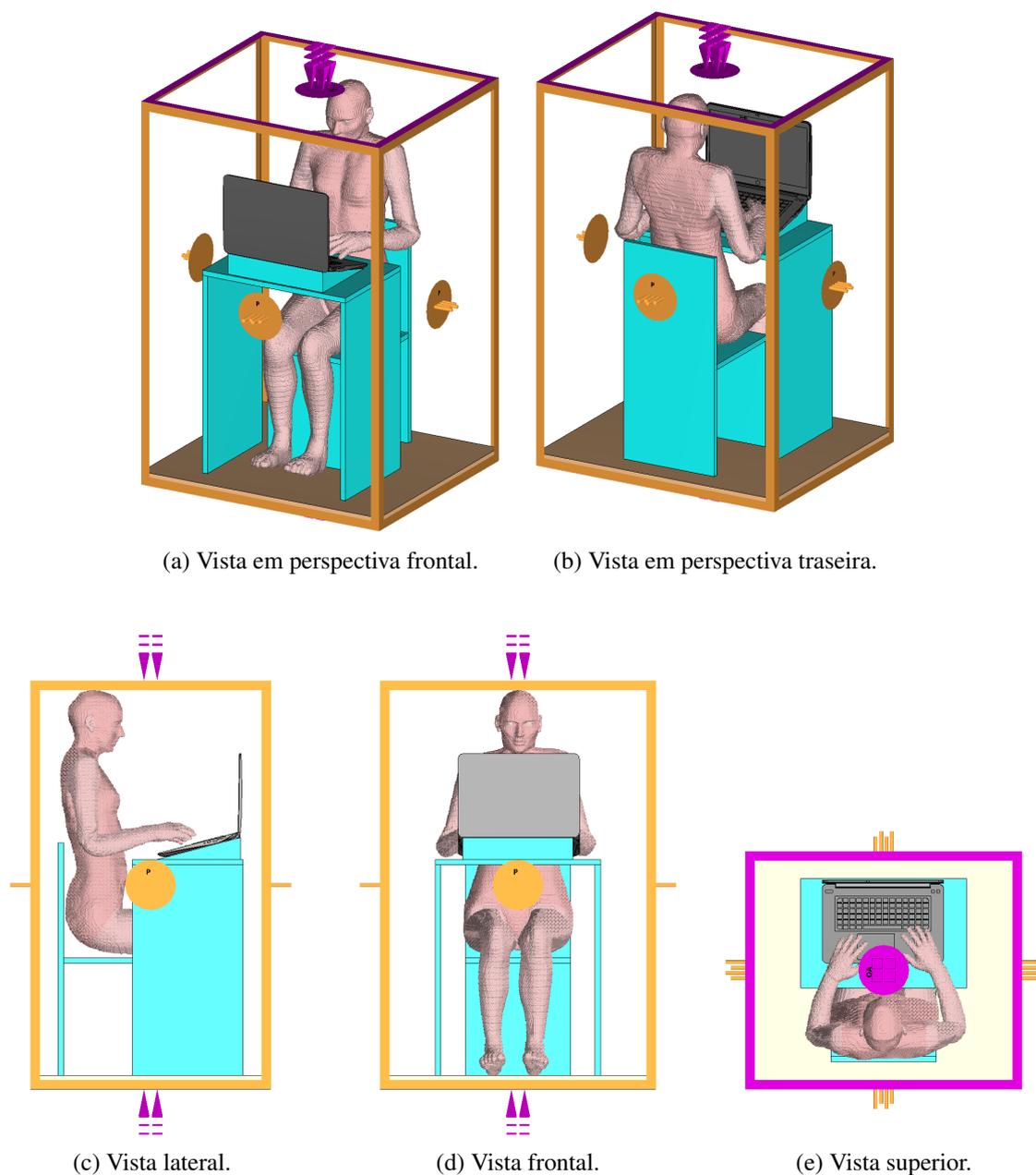
Esta técnica não representa uma sala de aula real, mas simula uma configuração infinita, aproximando-se da exposição de um estudante no centro da sala, cercado por colegas em todas as direções. Esta célula foi planejada para assegurar que ela reflita as distâncias desejadas entre os estudantes. Ao repetir esta célula geometricamente idêntica no espaço, garante-se uma representação da relação entre um estudante e todas as fontes de radiação presentes em seu entorno imediato. Elementos como paredes, portas, janelas e o teto foram deliberadamente excluídos. Esta decisão baseia-se na natureza específica da condição de contorno periódica, que exige a replicação de uma configuração simplificada e representativa em um padrão infinito. Incluir tais elementos estruturais na célula unitária PBC não seria viável, pois eles não se repetem de maneira uniforme e contínua como as mesas e laptops, que são os focos principais desta simulação. O objetivo é simular a exposição direta ao SAR dentro do ambiente imediato do estudante, e a ausência desses elementos estruturais não compromete a precisão desse objetivo.

A Figura 12 ilustra a visão superior de uma célula de simulação posicionada ao centro, acompanhada de suas réplicas que a circundam. Na figura, as setas pretas indicam as distâncias laterais entre as classes, que são mantidas fixas, e as setas vermelhas indicam as distâncias que foram variadas no conjunto de simulações efetuadas.

A distância lateral entre as mesas foi mantida constante, com o objetivo de avaliar somente a influência da distância frontal/traseira entre as mesas na psSAR. A distância lateral foi fixada em 400 mm. Por sua vez, a distância frontal/traseira variou de 0 mm a 1000 mm. Inicialmente, foram realizadas simulações com intervalos de 25 mm na faixa de 0 mm a 250 mm. Posteriormente, foram realizadas simulações para distâncias de 500 mm e 1000 mm.

A implementação matemática das condições de contorno periódicas segue o Teorema de Bloch-Floquet, que descreve as soluções de onda em meios periódicos. Este teorema fundamenta a igualdade dos EMFs nas fronteiras opostas da célula unitária, implicando que os campos em um lado da célula sejam idênticos aos do lado oposto. Ao aplicar este princípio, é possível focar na simulação de uma única célula unitária, representativa da estrutura total, otimizando significativamente os recursos computacionais e reduzindo os

Figura 10 – Ilustrações de uma das células unitárias PBC utilizada nas simulações com o modelo humano adulto.

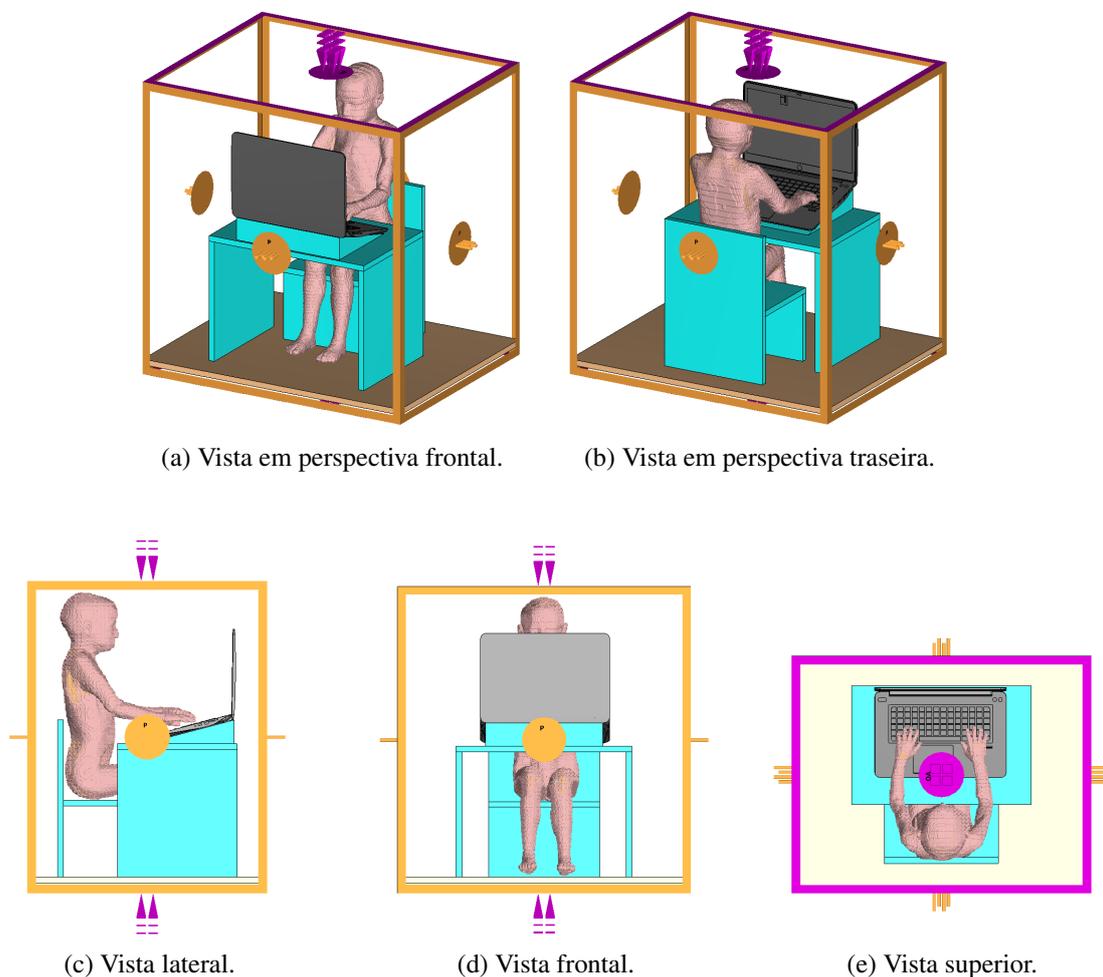


Fonte: Elaborada pelo autor.

tempos de simulação.

Para simular uma sala de aula inteira com 25 alunos, mantendo as configurações de malha usadas nas simulações deste trabalho e sem a utilização das PBC (Condições de Contorno Periódicas), seriam necessários mais de 256 GB de memória RAM, que é a capacidade máxima instalável na workstation utilizada. Em contraste, a simulação com a maior célula unitária PBC exigiu apenas cerca de 45 GB. Também em função do tamanho da malha que seria gerada nesse domínio, com mais de 2 bilhões de células, seria

Figura 11 – Ilustrações de uma das células unitárias PBC utilizada nas simulações com o modelo humano infantil.

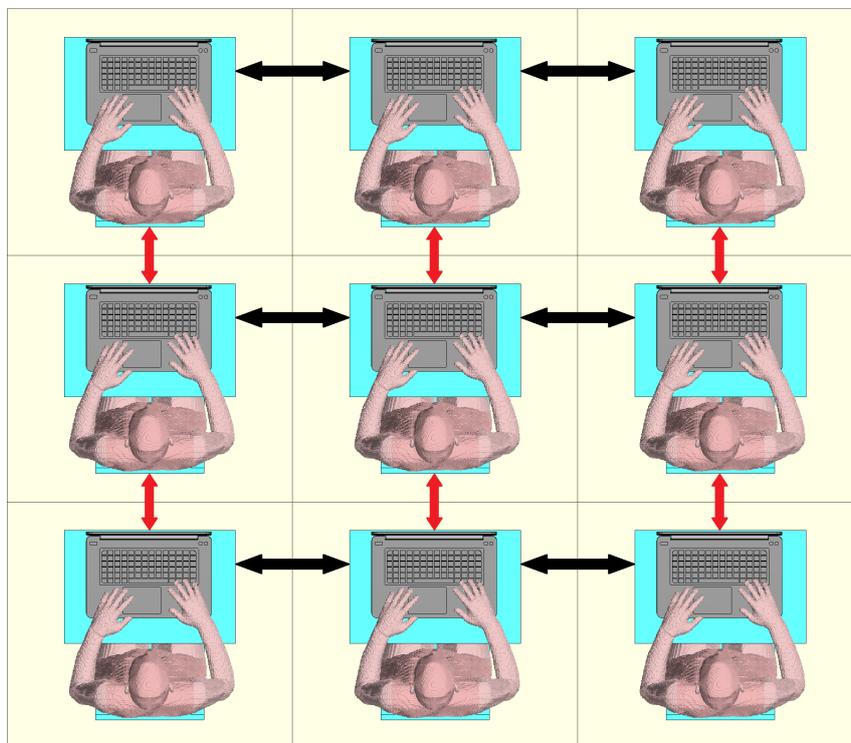


Fonte: Elaborada pelo autor.

necessário, além da workstation, outros núcleos de processamento para processamento paralelo visto que o *software* não permite o processamento todo em um único núcleo após determinado tamanho.

Para complementar o estudo, conduziu-se uma simulação comparativa utilizando o mesmo domínio da célula unitária PBC, mas, desta vez, aplicando condições de contorno abertas com PML em todas as suas faces. Este cenário simula a situação de um aluno isolado em uma sala de aula, onde a única fonte de radiação é o seu laptop. Esta configuração visa avaliar a exposição à radiação em um ambiente sem outras influências externas. A aplicação de PML em todas as faces do domínio de simulação garante que as ondas eletromagnéticas emitidas pelo laptop sejam absorvidas, evitando reflexões. Assim, os resultados obtidos com as PBC podem ser comparados com os resultados obtidos nesses casos do aluno isolado. Esse caso particular do aluno isolado será definido como o caso da distância infinita, pois é o equivalente às classes estarem a uma distância infinita

Figura 12 – Replicação da célula de simulação e indicação da distância variável (setas vermelhas) e não variável (setas pretas) no trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor.

umas das outras.

3.4 Geração da Malha

Neste estudo, utilizou-se o CST Studio Suite[®], empregando especificamente o solver FIT (do inglês *Finite Integration Technique*), um método numérico de análises eletromagnéticas aplicável em diversos contextos, neste caso para alta frequência. A seguir, é detalhado o processo de geração de malha para este solver, enfatizando as técnicas e estratégias empregadas neste trabalho.

A geração de malha para esse solver é um processo que desempenha um papel importante na precisão e eficiência das simulações eletromagnéticas. Inicialmente, o espaço de simulação é discretizado em uma malha composta predominantemente por células hexahedrais, denominadas no contexto deste trabalho como “células de espaço FIT” para evitar ambiguidade com o conceito de “célula unitária PBC” apresentado na Seção 3.3. A densidade da malha para o solver FIT adapta-se para capturar as complexidades geométricas no domínio da simulação e as variações dos EMFs. No entanto, essa abordagem pode levar a um alto consumo de recursos computacionais, principalmente quanto menor for o comprimento de onda comparado ao domínio total da simulação. A complexidade geométrica também influencia nos recursos computacionais e no tempo necessário, pois

geralmente detalhes geométricos necessitam de subcélulas de espaço FIT locais para serem devidamente representados.

Além da modelagem, a malha hexahedral facilita também a integração das equações de Maxwell sobre os volumes finitos determinados pelas células de espaço FIT. Além da malha primária, o FIT emprega uma malha dual, ortogonal à primeira, permitindo uma discretização mais detalhada e precisa das equações de Maxwell ao alocar componentes elétricos e magnéticos em malhas separadas.

Na execução de simulações usando o *software* CST Studio Suite[®], vários parâmetros de malha influenciam o total de células de espaço FIT empregadas, refletindo na precisão e desempenho do modelo simulado. O parâmetro *cells per maximum cell near to model* define a quantidade de células de espaço FIT na área mais próxima à borda do modelo, afetando diretamente a resolução da malha nessa zona específica. Elevando esse valor, a resolução da malha nas proximidades do modelo é ampliada, enquanto *cells per max model box edge* diz respeito ao número de células de espaço FIT ao longo da aresta mais extensa da caixa delimitadora do modelo, impactando também a resolução e o total de células de espaço FIT.

Com o intuito de economizar recursos computacionais, foi proposta uma estratégia baseada em reduzir a quantidade total de células de espaço FIT através de ajuste no parâmetro *cells per wavelength* (células por comprimento de onda). Este parâmetro determina o limite máximo para as dimensões das células de espaço FIT em relação ao comprimento de onda, e também define a frequência de amostragem espacial para as ondas no interior da estrutura. O valor escolhido para esse parâmetro exerce um impacto significativo tanto na qualidade final dos resultados quanto no tempo necessário para a realização da simulação. Elevar esse valor resulta em maior precisão, porém prolonga o tempo total de simulação.

Avaliou-se então, experimentalmente, valores diferentes para o parâmetro células por comprimento de onda nas simulações. Assim, foi determinada uma quantidade menor que o padrão do *software* (15 células por comprimento de onda) e que ainda produzisse resultados próximos de SAR, com diferença máxima inferior a 10 % em relação a simulação utilizando o valor padrão do parâmetro. A redução no valor desse parâmetro permitiu uma economia de até 6 vezes o número total de células de espaço FIT em toda extensão do domínio para a realização das simulações em relação ao número de células de espaço FIT que seria obtido com a configuração padrão do *software*. Isso se refletiu principalmente no tempo de processamento necessário para cada simulação. Essa economia de tempo é de extrema importância, pois permite um maior número de iterações ou variações de parâmetros em um período de tempo limitado.

As simulações para esse trabalho variaram de aproximadamente 7 h para a menor célula simulada (modelo humano “child 7y” com a menor distância entre as classes, 0 mm) até mais de 120 h para a maior célula simulada (modelo humano “Laura 2.0” com a maior

distância entre as classes, 1000 mm)

Técnicas como a Aproximação de Fronteira Perfeita (PBA, do inglês *Perfect Boundary Approximation*) e a Técnica de Folha Fina (TST do inglês *Thin Sheet Technique*) são incorporadas para melhorar a modelagem de estruturas curvas e finas. Juntamente a esses parâmetros, as funcionalidades de *volume refinement* e *edge refinement* oferecem refinamento adicional no volume e nas arestas do modelo, contribuindo para uma simulação mais precisa. Assim, ainda que o parâmetro “número de células por comprimento de onda” em áreas homogêneas do domínio seja o responsável majoritário pela quantidade total de células de espaço FIT nessas regiões, o número total de células de espaço FIT é uma função de vários parâmetros. A Tabela 3 mostra o total de células de espaço FIT no domínio da simulação em função da variação do parâmetro “numero de células por comprimento de onda”. Estes valores foram adquiridos através do arquivo de registro gerado após o término de cada simulação.

Tabela 3 – Parâmetro “número de células por comprimento de onda” e total de células de espaço FIT.

número de células por comprimento de onda	Total de células de espaço FIT
1	18 906 615
2	19 071 630
3	107 956 849
4	108 957 420
5	112 017 500
6	120 557 835
7	126 741 408
8	624 672 072
9	677 686 665
10	694 489 600
15	1 190 518 280

Ao analisar os dados fornecidos relativos ao parâmetro “número de células por comprimento de onda” em relação à quantidade total de células, é evidente que os valores não seguem uma tendência bem definida, variando abruptamente em alguns casos, como de 8 para 7 “número de células por comprimento de onda” em que o total de células variou de aproximadamente 624 milhões para aproximadamente 126 milhões.

As dimensões mínimas e máximas das arestas utilizadas na composição das células de espaço FIT foram 0,150 mm e 13,333 mm, respectivamente.

O valor da psSAR foi avaliado em oito cenários distintos para analisar o impacto da redução da malha nos resultados. Essa análise permitiu a seleção de um valor do parâmetro

“número de células por comprimento de onda” que equilibra a precisão com a viabilidade dos tempos de simulação para as simulações subsequentes. A Tabela 4 apresenta os dados obtidos, incluindo o valor do parâmetro “número de células por comprimento de onda” e os valores de psSAR correspondentes para massas de tecido de 1 g e 10 g.

Tabela 4 – Parâmetro “número de células por comprimento de onda” e psSAR para 1 g e 10 g.

Número de células por comprimento de onda	psSAR 1 g (W/kg)	psSAR 10 g (W/kg)
1	0,123	0,075
2	0,088	0,046
3	0,090	0,061
5	0,117	0,069
7	0,148	0,087
8	0,133	0,091
10	0,135	0,093
15	0,137	0,094

Analisando os dados fornecidos sobre a quantidade total de células de espaço FIT em comparação com o valor do parâmetro “número de células por comprimento de onda”, torna-se evidente que os valores não seguem a tendência bem definida, caracterizada por variações abruptas em certas situações. Um exemplo dessa variação é a mudança na quantidade total de células de espaço FIT, que sofreu uma redução de aproximadamente 624 milhões para cerca de 126 milhões quando o número de células por comprimento de onda passou de 8 para de 7.

No contexto dos métodos de simulação no campo do eletromagnetismo, os métodos FDTD e FIT apresentam distinções tanto na discretização espacial quanto na modelagem de EMFs. O FDTD, desenvolvido em 1960 por Kane Yee, estabeleceu-se como uma técnica amplamente utilizada, reconhecida pela sua abordagem eficaz na resolução das equações de Maxwell no domínio do tempo. Em contraste, o FIT, embora mais recente, se destaca na modelagem precisa de superfícies e interfaces complexas. Essas diferenças entre os dois métodos refletem não apenas suas características técnicas distintas, mas também a evolução das técnicas de simulação no eletromagnetismo. Em um cenário ideal utilizando o método FDTD, aumentar o número de células por comprimento de onda leva a um aumento significativo no total de células da simulação. Utilizando o método FDTD em três dimensões, o número total de células cresce proporcional ao cubo do número de células em cada dimensão espacial, aumentando por um fator de 2^3 ou oito vezes, cada vez que o número de células é dobrado em cada dimensão espacial.

3.5 Modelos Humanos Utilizados

Para que a simulação da exposição aos EMFs seja mais realista, foram utilizados dois modelos humanos distintos que fazem parte de um conjunto de modelos já preexistentes no simulador, representando diferentes segmentos da população. Estes modelos são baseados em dados antropométricos reais e proporcionam uma representação detalhada da interação da radiação com o corpo humano.

Abaixo são relacionadas algumas informações dos modelos infantil e adulto utilizados.

- **Modelo Infantil:**

- **Nome:** Child
- **Idade/Sexo:** 7 anos, feminino
- **Tamanho:** 115 cm
- **Massa:** 21,7 kg
- **Número de Tecidos Representados:** 28
- **Resolução:** $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$
- **Observações:** modelo articulável

- **Modelo Adulto:**

- **Nome:** Laura 2.0
- **Idade/Sexo:** 43 anos, feminino
- **Tamanho:** 163 cm
- **Massa:** 51 kg
- **Número de Tecidos Representados:** 44
- **Resolução:** $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$
- **Observações:** modelo articulável.

Os componentes anatômicos que compõem os modelos humanos incluem tecidos sólidos (como músculos e ossos), órgãos (como o coração e o fígado), fluidos (como sangue e líquido cefalorraquidiano), e até espaços ou conteúdos específicos do corpo (como o ar dentro do corpo ou o conteúdo do intestino). A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os modelos humanos utilizados, indicando a presença ou ausência de cada componente anatômico em ambos os modelos. Adicionalmente, no modelo “Laura 2.0”, estão incluídos os tecidos designados como “ext”, que correspondem a componentes anatômicos específicos dos membros, como músculos, ossos, ligamentos e tendões externos.

Tabela 5: Comparação dos Componentes Anatômicos nos Modelos Humanos “Laura 2.0” e “child 7y”.

Componente anatômico	“Laura 2.0”	“child 7y”
Ar dentro do corpo	Sim	Sim
Sangue (no coração)	Sim	Sim
Sangue Arterial	Sim	Sim
Sangue Venoso	Sim	Sim
Osso Cortical	Sim	Sim
Cavidade Medular Óssea	Sim	Sim
Matéria Cinzenta do Cérebro	Sim	Sim
Matéria Branca do Cérebro	Sim	Sim
Tecido Glandular Mamário	Sim	Não
Cartilagem	Sim	Sim
Líquido Cefalorraquidiano	Sim	Sim
Conteúdo do Cólon	Sim	Sim
Parede do Cólon	Sim	Sim
Cartilagem da Orelha	Sim	Não
Pele da Orelha	Sim	Não
Sangue Arterial Externo	Sim	Não
Sangue Venoso Externo	Sim	Não
Osso Cortical Externo	Sim	Não
Cavidade Medular Óssea Externa	Sim	Não
Tecido Adiposo Externo	Sim	Não
Ligamento Externo	Sim	Não
Músculo Externo	Sim	Não
Pele Externa	Sim	Não
Tendão Externo	Sim	Não
Bulbo do Olho	Sim	Sim
Lente do Olho	Sim	Sim
Tecido Adiposo	Sim	Sim
Vesícula Biliar	Sim	Sim
Conteúdo da Vesícula Biliar	Sim	Sim
Coração	Sim	Sim
Córtex Renal	Sim	Sim
Ligamento	Sim	Sim
Fígado	Sim	Sim

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação

Componente anatômico	“Laura 2.0”	“child 7y”
Pulmão	Sim	Sim
Músculo	Sim	Sim
Nervo	Sim	Sim
Esôfago	Sim	Sim
Ovários	Sim	Sim
Pâncreas	Sim	Sim
Líquido Pericárdico	Não	Sim
Pericárdio	Não	Sim
Glândula Pituitária	Sim	Sim
Pele	Sim	Sim
Conteúdo do Intestino Delgado	Sim	Sim
Parede do Intestino Delgado	Sim	Sim
Baço	Sim	Sim
Conteúdo do Estômago	Sim	Sim
Parede do Estômago	Sim	Sim
Dentes	Sim	Sim
Tendão	Sim	Sim
Timo	Sim	Sim
Glândula Tireoide	Sim	Sim
Amígdalas	Sim	Sim
Ureter	Sim	Sim
Conteúdo da Bexiga Urinária	Sim	Sim
Parede da Bexiga Urinária	Sim	Sim
Colo do Útero	Sim	Sim
Ventrículos	Sim	Sim

A compilação dos valores das propriedades dos tecidos utilizados nos modelos foi baseada nos dados coletados e publicados por (GABRIEL, 1996). Esses valores representam uma ampla variedade de tecidos humanos e são derivados de medições realizadas tanto em tecidos frescos recém-coletados como em tecidos preservados, visando oferecer uma representação precisa das características dielétricas relevantes para aplicações biomédicas e de engenharia de radiofrequência. Esta abordagem busca fornecer uma base para os modelos refletirem as propriedades dos tecidos humanos, abrangendo um amplo espectro de condições para uma aproximação mais precisa de suas características dielétricas.

Esta referência é fundamentada em dispersões conhecidas no espectro dielétrico de materiais biológicos, expressas como uma soma de termos correspondentes aos principais

mecanismos de polarização. Este espectro abrange desde Hz até GHz, mostrando quatro regiões de dispersão.

Devido à complexidade da estrutura e composição dos materiais biológicos, cada região de dispersão é influenciada por múltiplas contribuições, podendo ser descrita pela expressão Cole-Cole. Desenvolvida por Kenneth Cole e Robert Cole em 1941, esta fórmula modela o comportamento dielétrico de materiais em resposta a campos elétricos variáveis. A expressão é representada matematicamente como:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (4)$$

em que $\epsilon^*(\omega)$ é a permissividade dielétrica complexa, ϵ_s a permissividade estática, ϵ_∞ a permissividade dielétrica no limite de alta frequência, τ é o tempo de relaxação dielétrico médio, e α é um parâmetro que descreve a distribuição do tempo de relaxação. A inclusão de α aprimora o modelo de Debye ao incorporar a resposta dielétrica mais complexa de materiais reais. A expressão Cole-Cole é utilizada para analisar como materiais se polarizam sob a influência de um campo elétrico (COLE; COLE, 1941). A formulação deste modelo descreve a dependência da frequência das propriedades dielétricas na faixa de Hz a GHz. Este modelo é confiável para frequências acima de 1 MHz. Para frequências mais baixas, onde os valores da literatura são escassos e têm incertezas maiores que a média, o modelo deve ser usado com cautela, pois fornece uma “melhor estimativa” baseada no conhecimento atual. É vital entender as limitações deste modelo, especialmente onde não há dados para sustentar suas previsões.

Os parâmetros do modelo foram ajustados para alinhar-se com o conjunto de dados mais completo e detalhado disponível para cada tecido específico. Esta abordagem permite uma representação precisa da interação da radiação eletromagnética com o corpo humano, levando em conta as características dielétricas específicas dos tecidos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações de psSAR para os dois modelos humanos: “Laura 2.0” e “Criança de 7 anos”. Os valores da psSAR de 1 g e 10 g em diferentes partes do corpo — cabeça, costas e mãos — são detalhados, e a variação destes valores com a distância entre as mesas é analisada.

4.1 Apresentação dos Resultados

Os valores de psSAR para 1 g e 10 g são detalhados nas tabelas 6 a 9 para ambos os modelos humanos. Para o modelo “Laura 2.0”, os valores de psSAR para 1 g e 10 g são apresentados nas tabelas 6 e 7, respectivamente. Já para o modelo “criança de 7 anos”, esses valores são encontrados nas tabelas 8 e 9, respectivamente.

Além dos valores tabulados, os gráficos a seguir mostram os resultados de SAR normalizada: as figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, a 1 g psSAR e a 10 g psSAR para o modelo “Laura 2.0”, normalizada com relação a de um estudante com seu laptop, na cabeça, costas e mãos; as figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a 1 g psSAR e a 10 g para o modelo “criança de 7 anos”, normalizada com relação a de um estudante com seu laptop, na cabeça, costas e mãos.

A Figura 17 mostra o campo elétrico na superfície dos modelos, em um plano sagital e em um plano axial (horizontal). À esquerda para um único estudante e à direita para a sala de aula com vários estudantes.

4.2 Discussão dos Resultados

Em uma análise inicial, pode-se esperar que, ao aumentar a distância entre as classes (e, portanto, entre as fontes de radiação), a SAR experimentada por um estudante diminua de forma consistente. No entanto, os resultados mostram que essa relação não é estritamente monótona.

A razão para a natureza não-monótona da curva SAR é a presença de efeitos de multipercursos. Em ambientes fechados, como salas de aula, as ondas eletromagnéticas não se propagam em uma única direção. Elas refletem nos móveis, nos laptops, no chão, nos

Tabela 6 – Valores de psSAR 1 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “Laura 2.0”.

Distância (mm)	psSAR 1 g (W/kg)		
	Cabeça	Costas	Mãos
0	81.196	418.124	27.160
25	56.861	87.790	22.537
50	31.796	63.400	16.601
75	40.395	26.733	22.071
100	36.614	25.846	27.560
125	44.022	17.947	17.545
150	52.852	18.731	17.575
175	62.851	17.109	25.253
200	39.610	10.861	32.405
225	34.484	10.337	30.952
250	31.479	8.219	18.434
500	23.360	5.098	25.887
1000	33.226	2.863	15.060
∞	7.543	0.243	10.132

próprios alunos e em outros objetos, criando múltiplos caminhos. Quando essas ondas refletidas e diretas se encontram, elas podem interferir construtivamente (aumentando a SAR) ou destrutivamente (diminuindo a SAR), dependendo da fase em que se encontram. Esses efeitos de interferência são a principal razão para as variações observadas nos valores de SAR à medida que a distância entre as classes muda.

Ao examinar os valores de psSAR para massas de 1 g e 10 g, é importante compreender as implicações dessas medições na distribuição da energia de radiação. O psSAR para 10 g mede a absorção de energia em um volume correspondente à massa de 1 grama, indicando a intensidade de exposição nesse volume específico. Valores altos de psSAR para 1 g sugerem uma absorção concentrada de energia nesse volume limitado. Em contraste, o psSAR para 10 g avalia a absorção em um volume correspondente à massa de 10 gramas. Um valor menor de psSAR para 10 g, em comparação com o de 1 g, não implica uma redução da exposição, mas indica que a absorção de energia está sendo avaliada em um volume maior. Isso significa que, ao calcular a média de absorção sobre uma massa maior, como no caso de 10 g, variações locais de intensidade podem ser mais atenuadas, o que pode levar ao mascaramento de áreas de alta absorção de radiação dentro desse volume maior.

Na comparação entre os modelos “Laura 2.0” e “Criança de 7 anos” em relação à psSAR, observam-se diferenças na absorção de radiação. Para o psSAR medido em uma massa de 1 g, o modelo “Laura 2.0” registra valores médios de 41,16 mW/kg para

Tabela 7 – Valores de psSAR 10 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “Laura 2.0”.

Distância (mm)	psSAR 10 g (W/kg)		
	Cabeça	Costas	Mãos
0	31,634	209,219	15,483
25	23,918	48,144	12,366
50	13,411	37,258	10,057
75	16,687	18,059	12,409
100	15,457	16,102	15,997
125	15,110	14,997	8,801
150	18,679	14,165	11,401
175	22,275	12,475	13,678
200	16,090	7,152	16,543
225	12,064	6,851	16,772
250	10,404	5,759	11,239
500	10,380	3,605	14,157
1000	14,559	4,917	7,854
∞	2,604	0,128	6,019

a cabeça e 50,95 mW/kg para as costas, indicando uma absorção maior nessas áreas em comparação com o modelo infantil, que apresenta valores de 30,56 mW/kg para a cabeça e 22,45 mW/kg para as costas. Por outro lado, nas mãos, o modelo “Criança de 7 anos” mostra um valor médio de 27,71 mW/kg, superior ao valor de 22,08 mW/kg observado no modelo “Laura 2.0”.

Esta tendência também é notada para o psSAR de 10 g, embora com diferenças menos marcadas. O modelo “Laura 2.0” mantém valores mais altos de psSAR na cabeça (15,95 mW/kg) e nas costas (28,49 mW/kg), enquanto o modelo “Criança de 7 anos” apresenta um valor mais elevado nas mãos, com 15,56 mW/kg, em comparação a 12,34 mW/kg no modelo “Laura 2.0”.

Em relação às diretrizes da ICNIRP, os valores de SAR obtidos para ambos os modelos, em todas as configurações simuladas, estão dentro dos limites estabelecidos para a exposição do público em geral. No entanto, é essencial observar que, mesmo estando dentro dos limites, a exposição contínua pode ter implicações a longo prazo, principalmente para os mais jovens, cujos tecidos estão em desenvolvimento.

Neste estudo, conduziu-se uma análise da SAR em modelos humanos, resultante da RFR emitida por laptops, em um contexto específico de sala de aula. Os resultados destacam a importância de considerar os efeitos de multipercursos e a variação entre diferentes modelos humanos ao avaliar a exposição à radiação eletromagnética.

Tabela 8 – Valores de psSAR 1 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “criança de 7 anos”.

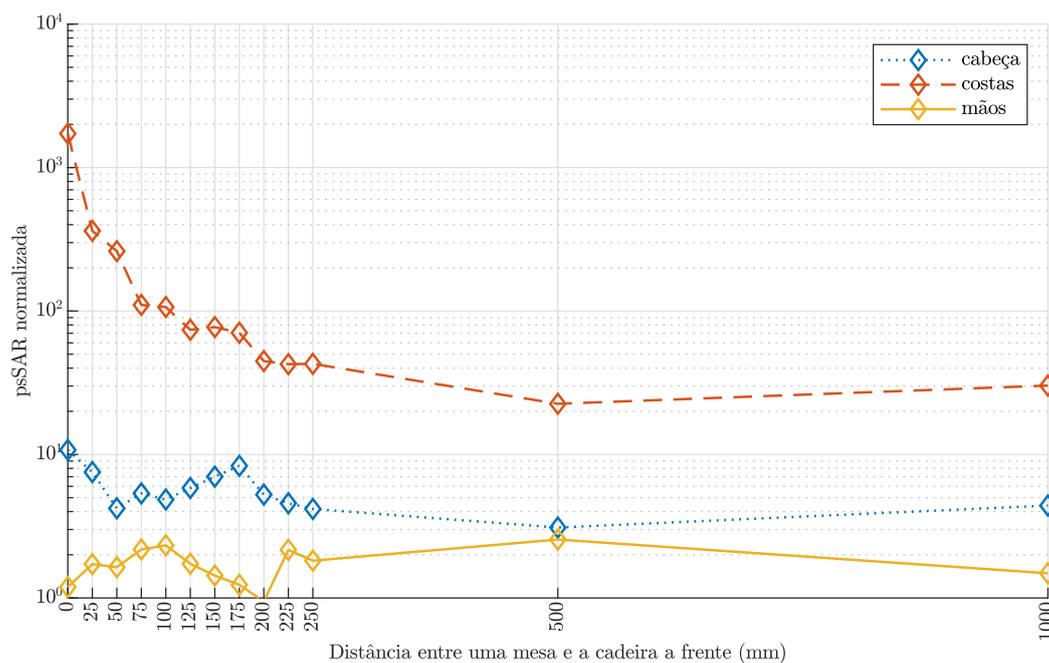
Distância (mm)	psSAR 1 g (W/kg)		
	Cabeça	Costas	Mãos
0	119,157	62,251	24,900
25	47,648	43,244	34,036
50	37,724	22,643	32,430
75	33,637	16,611	31,769
100	24,203	22,981	40,156
125	24,284	19,262	32,709
150	23,688	17,092	24,055
175	21,159	30,112	37,281
200	20,237	18,250	22,828
225	17,629	17,369	18,994
250	27,876	27,953	28,650
500	14,381	8,277	22,209
1000	12,227	6,732	30,078
∞	3,981	1,535	7,776

Embora os valores de SAR obtidos estejam em conformidade com as diretrizes internacionais, é importante considerar precauções adicionais, especialmente ao expor populações vulneráveis, como crianças, à radiação por longos períodos. O estudo da *International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields* — ICBE-EMF (2022) em *Environmental Health* sugere a necessidade de reavaliar as medidas de segurança em relação à exposição à RFR, alinhando-se com o princípio ALARA. Este princípio enfatiza a redução da exposição à radiação ao mínimo viável, o que se torna ainda mais relevante quando se considera a sensibilidade das crianças a formas não ionizantes de radiação. O artigo destaca efeitos adversos observados em exposições abaixo do limiar de SAR assumido, como a indução não térmica de espécies reativas de oxigênio, danos ao DNA, cardiomiopatia, carcinogenicidade e efeitos neurológicos, incluindo hipersensibilidade eletromagnética, além de associações estatisticamente significativas entre a exposição ao RFR e um aumento do risco de câncer no cérebro e na tireoide. Assim, ressalta a necessidade de limites de exposição mais protetores para a saúde humana e o meio ambiente, baseados em evidências científicas, especialmente em face das crescentes exposições ao RFR, incluindo a radiação de telecomunicações 5G (BRYANT, 2023).

Tabela 9 – Valores de psSAR 10 g simulada, na cabeça, costas e mãos para o modelo “criança de 7 anos”.

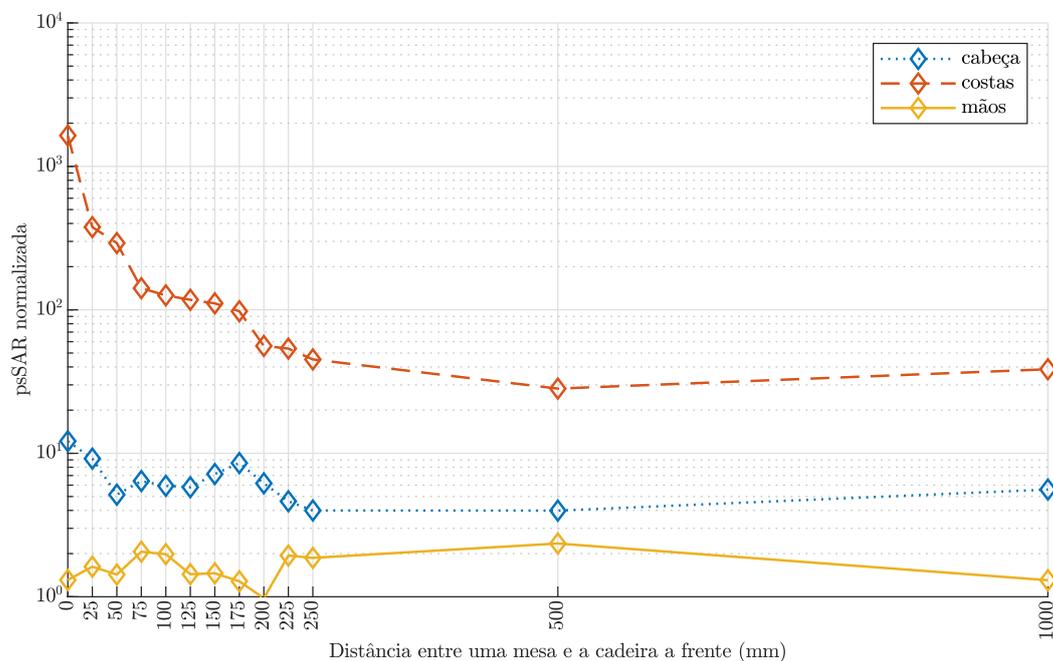
Distância (mm)	psSAR 10 g (W/kg)		
	Cabeça	Costas	Mãos
0	77,061	48,187	17,901
25	35,943	31,291	20,033
50	28,608	16,025	16,216
75	21,898	11,150	19,519
100	14,045	13,421	22,814
125	13,526	13,024	17,987
150	12,837	11,098	11,230
175	13,600	13,784	21,973
200	15,190	9,317	11,011
225	12,882	9,456	11,034
250	15,151	13,653	21,066
500	5,949	5,369	10,148
1000	4,212	4,631	12,375
∞	1,740	1,202	4,576

Figura 13 – Razão da psSAR 1 g normalizada no modelo “Laura 2.0” para um estudante com seu notebook.



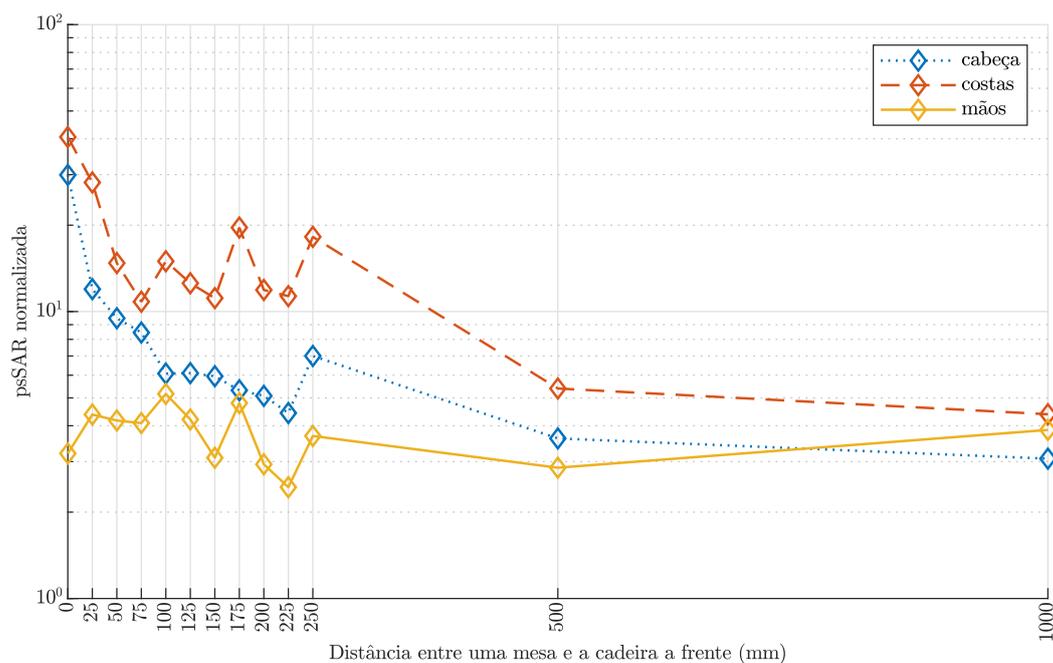
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Razão da psSAR 10 g normalizada no modelo “Laura 2.0” para um estudante com seu notebook.



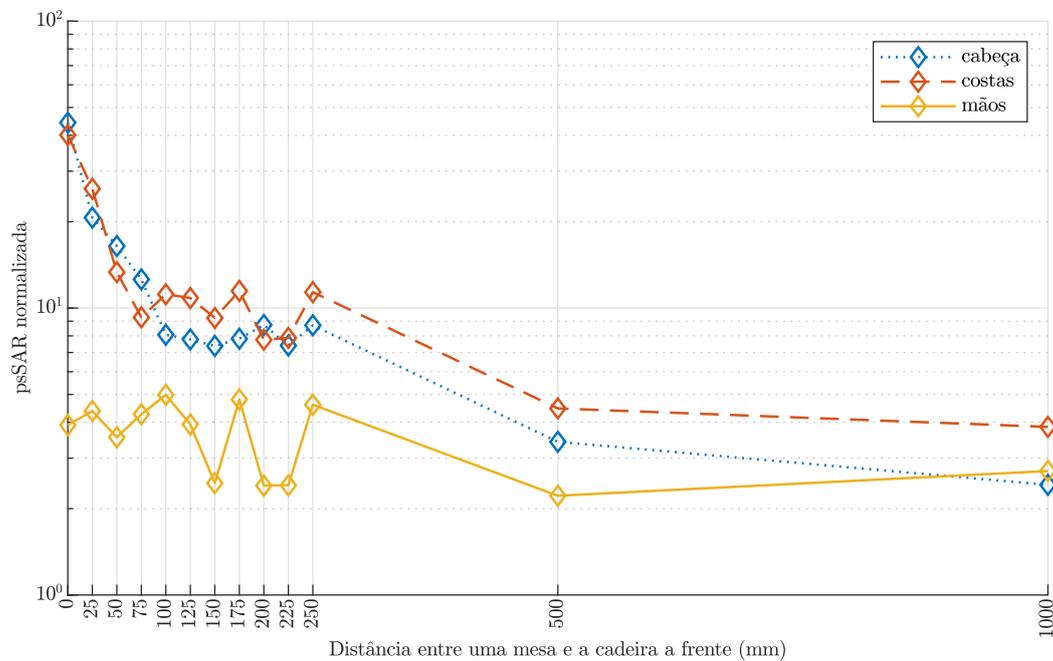
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Razão da psSAR 1 g normalizada no modelo “criança de 7 anos” para um estudante com seu notebook.



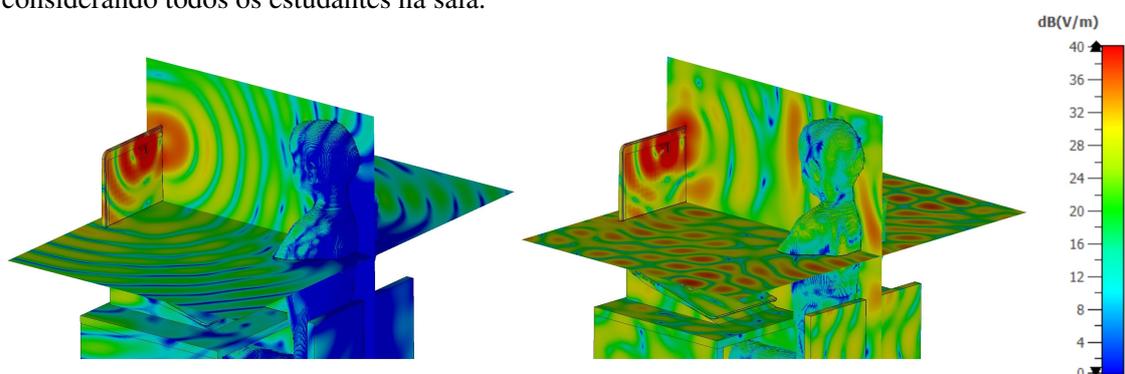
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Razão da psSAR 10 g normalizada no modelo “criança de 7 anos” para um estudante com seu notebook.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Campo elétrico em dB (V/m): na esquerda, para um estudante sozinho a na direita considerando todos os estudantes na sala.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma investigação sobre os efeitos das radiações eletromagnéticas emitidas por notebooks em estudantes situados em um ambiente de sala de aula. Este capítulo aborda as considerações finais obtidas a partir das simulações e análises realizadas no estudo.

1. **Complexidade da Interferência de múltiplas fontes:** Foi observado que a psSAR não exibe um padrão uniforme de variação com o aumento da distância entre as mesas na sala de aula. Esta observação realça a complexidade das interações eletromagnéticas em um ambiente com múltiplas fontes, como os laptops. A falta de monotonicidade na SAR é atribuída à interferência das ondas eletromagnéticas provenientes dessas fontes diversas e à influência de variáveis ambientais, como a disposição espacial dos dispositivos, características arquitetônicas da sala e materiais construtivos que influenciam a propagação das ondas eletromagnéticas.
2. **Os multicaminhos das Ondas Eletromagnéticas:** Além da interferência direta, um fator adicional contribuindo para a complexidade das medições da psSAR é o fenômeno dos multicaminhos das ondas eletromagnéticas. Esse efeito ocorre quando as ondas emitidas pelas múltiplas fontes percorrem caminhos não diretos antes de atingir um ponto de medição. Este fenômeno é causado pela reflexão, refração e difração das ondas ao interagirem com diversos elementos no ambiente, como paredes, mobiliário e elementos estruturais da sala. Os caminhos múltiplos resultam em padrões complexos de interferência, onde as ondas podem se somar ou se cancelar mutuamente, levando a variações imprevisíveis na intensidade do campo eletromagnético e, conseqüentemente, na psSAR observada.
3. **Importância da Modelagem:** A utilização de modelos humanos específicos, como os modelos “Laura 2.0” e o modelo “criança de 7 anos”, revelou variações significativas na absorção de radiação, ressaltando a importância da estrutura corporal e da composição dos tecidos. Por exemplo, as medidas indicaram que a psSAR na cabeça e nas costas era maior no modelo “Laura 2.0” (com valores médios de 41,16 mW/kg e 50,95 mW/kg respectivamente para a massa de 1 g) em

comparação com o modelo infantil (valores médios de 30,56 mW/kg para a cabeça e 22,45 mW/kg para as costas). Por outro lado, nas mãos, o modelo infantil apresentou maior absorção (27,71 mW/kg) em comparação com o modelo adulto (22,08 mW/kg).

4. **Comparação com Normas da ICNIRP:** A comparação dos resultados obtidos com as diretrizes da ICNIRP contribui para uma compreensão melhor da segurança dos níveis de radiação em diferentes cenários. Essa análise proporciona uma perspectiva sobre como os achados do estudo se alinham com as normas existentes, embora seja importante notar que tais comparações devem ser vistas como parte de um processo contínuo de avaliação e não como uma validação definitiva. Além disso, os resultados destacam áreas onde mais pesquisas podem ser necessárias, especialmente no que se refere à aplicação dessas diretrizes em ambientes de exposição prolongada e recorrente, como os ambientes educacionais. Esta abordagem sugere a importância de revisões periódicas e atualizações das recomendações, à medida que novos dados e modelos de simulação se tornam disponíveis.
5. **Economia Computacional:** A abordagem adotada neste trabalho, focando na simulação de células unitárias e na implementação da condição de contorno periódica, mostrou-se eficaz em reproduzir o ambiente da sala de aula com precisão, ao mesmo tempo que economizava recursos computacionais significativos.
6. **Relevância Potencial para Ambientes Educacionais:** As constatações deste estudo podem colaborar para um melhor entendimento acerca da exposição às ondas eletromagnéticas em ambientes educacionais, um aspecto que pode ser relevante para a saúde e segurança de todos presentes no ambiente escolar.

Em conclusão, este trabalho destaca uma área de crescente importância na interseção entre tecnologia e saúde humana. As constatações aqui apresentadas colaboram para futuras investigações e para a elaboração de diretrizes que assegurem ambientes educacionais seguros e favoráveis ao aprendizado. Com a contínua integração da tecnologia em nosso cotidiano, a necessidade de tais estudos somente aumentará, marcando este trabalho como mais um passo nessa trajetória.

REFERÊNCIAS

- ABERBOUR, L. *et al.* Efficient Experimental Assessment of The Specific Absorption Rate (SAR) Induced by MIMO Wireless Communication Devices; Application of Vector Near-Field Measurement System. *In: IEEE CONFERENCE ON ANTENNA MEASUREMENTS & APPLICATIONS (CAMA)*, 2018., 2018, Västerås, Sweden. **Proceedings [...]** IEEE, 2018. p. 1–4. DOI: 10.1109/CAMA.2018.8530621.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: analysis and design**. 4^o. ed. New Jersey: Wiley, 2016. 505-512 p. OCLC: 933291646, ISBN: 978-1-119-17899-6.
- BAMBA, A. *et al.* Experimental Assessment of Specific Absorption Rate Using Room Electromagnetics. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, [S.l.], v. 54, n. 4, p. 747–757, 2012.
- BRYANT, P. The role of public engagement in the journey to ALARA. **Radiation Protection Dosimetry**, [S.l.], v. 199, n. 8-9, p. 705–709, 2023.
- COLE, K. S.; COLE, R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. **Journal of Chemical Physics**, [S.l.], v. 9, n. 4, p. 341–351, 1941.
- FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION — FCC. **Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields**. Washington, D.C., USA: Office of Engineering and Technology, Federal Communications Commission, 1997. Disponível em <https://www.fcc.gov/general/oet-bulletins-line>.
- GABRIEL, C. **Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies**. [S.l.]: King's College London, 1996.
- GHASEMIFARD, F. *et al.* Assessment of Combined SAR for Low Power Radio Base Stations with Multiple Antennas. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP)*, 2021., 2021, Dusseldorf, Germany. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4.

Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE. **IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications.** [S.l.]: IEEE, 2021. 1-4379 p. Revision of IEEE Std 802.11-2016.

Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE. **IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz.** [S.l.]: IEEE, 2019. 1-312 p. (IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019) IEEE Std C95.1-2019).

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON IONIZING RADIATION PROTECTION — ICNIRP. **Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz).** Munich, Germany: [s.n.], 2020. Disponível em <https://www.icnirp.org/en/publications/icnirp-guidelines-2020/>.

International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields — ICBE-EMF. Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. **Environmental Health**, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 92, Oct. 2022.

ISHAK, N. I. A.; SEMAN, N. Sub-6 GHz Electromagnetic Field Exposure Assessment utilizing Specific Absorption Rate. *In: IEEE INTERNATIONAL RF AND MICROWAVE CONFERENCE (RFM), 2022., 2022, Kuala Lumpur, Malaysia. Proceedings [...]* IEEE, 2022. p. 1–4.

ISHAK, N. I. A. *et al.* Specific Absorption Rate Investigation on Multiple Antennas. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION (ISAP), 2017., 2017, Phuket, Thailand. Proceedings [...]* IEEE, 2017. p. 1–2.

KIENTEGA, T. *et al.* A new approach to assess the Specific Absorption Rate induced by multiple plane waves at 2.1 GHz. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 5., 2011, Rome, Italy. Proceedings [...]* IEEE, 2011. p. 2589–2592. Electronic ISBN: 978-88-8202-074-3; Print ISBN: 978-1-4577-0250-1; CD: 978-88-8202-074-3.

LE, D. T.; CHU, V. H. An analysis of vector estimation for uncertainty reduction in evaluating the specific absorption rate of multiple transmitting antenna devices. *In: NATIONAL FOUNDATION FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT CONFERENCE ON INFORMATION AND COMPUTER SCIENCE (NICS), 2015., 2015, Ho Chi Minh City, Vietnam. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2015. p. 235–238.

LE, D. T.; HAI, C. V. Analyses on the maximum local specific absorption rate of multiple antenna devices in different measurement planes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGIES FOR COMMUNICATIONS (ATC), 2015., 2015, Ho Chi Minh City, Vietnam. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2015. p. 496–500.*

LE, D. T. *et al.* A method in determination of the specific absorption rate of multi-antenna devices. *In: IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM (APSURSI), 2014., 2014, Memphis, TN, USA. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2014. p. 1196–1197.*

LE, D. T. *et al.* Determining the Maximum Local Specific Absorption Rate of a Multiple-Antenna Transmitter Using K-Order Electric Field Models. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION AND USNC-URSI RADIO SCIENCE MEETING, 2019., 2019, Atlanta, GA, USA. **Proceedings** [...] IEEE, 2019. p. 523–524.*

LE, D. T. *et al.* A New Measurement Technique to Determine the Maximum SAR of Multiple-Antenna Transmitters Using *K*-Order Models and Scalar E-Field Probes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS (ICT), 2019., 2019, Hanoi, Vietnam. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2019. p. 453–457.*

LI, J. *et al.* A high-order SAR model for multiple transmitters in portable devices. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS AND PROPAGATION & USNC/URSI NATIONAL RADIO SCIENCE MEETING, 2017., 2017, San Diego, CA, USA. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2017. p. 221–222.*

TENIOU, M. *et al.* A Fast and Rigorous Assessment of the Specific Absorption Rate (SAR) for MIMO Cellular Equipment Based on Vector Near-Field Measurements. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 2020., 2020, Copenhagen, Denmark. **Proceedings** [...] IEEE, 2020. p. 1–5.*

WANG, Q.; WANG, J. SA/SAR analysis for multiple UWB pulse exposure. *In: ASIA-PACIFIC SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND 19TH INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2008., 2008, Singapore. **Proceedings** [...] IEEE, 2008. p. 212–215. Date Added to IEEE Xplore: 15 July 2008, INSPEC Accession Number: 10104579.*

WHITTOU, W. *et al.* Correlation of specific absorption rates in the human head due to multiple independent sources. *In: LOUGHBOROUGH ANTENNAS & PROPAGATION CONFERENCE, 2009., 2009, Loughborough, UK. **Proceedings** [...] IEEE, 2009. p. 405–408.*

WORLD HEALTH ORGANIZATION — WHO. **Electromagnetic Fields and Public Health: mobile phones**. [S.l.]: WHO, 2014. Disponível em <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electromagnetic-fields-and-public-health-mobile-phones>. Acesso em: 15 de setembro de 2023.

XU, B. *et al.* Radio Frequency Exposure Compliance of Multiple Antennas for Cellular Equipment Based on Semidefinite Relaxation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, [S.l.], v. 61, 2019.

ZHOU, Y.; ZHANG, X.; LI, H. Assessment for the Radio Frequency Exposure Worst Case of Multiple Antennas Based on Particle Swarm Optimization. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER APPLICATIONS (AEECA), 2020., 2020, Dalian, China. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2020. p. 567–571.