

# Análise Computacional da Taxa de Absorção Específica (SAR) em Antenas Flexíveis para Dispositivos *Wearable* em Tecnologias WBAN.

Elison Wediley dos Reis Silva  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Centro de Ciências Exatas e Naturais  
Mossoró, Brasil  
elison.silva@alunos.ufersa.edu.br

Pedro Arthur Freitas da Silva  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Centro de Ciências Exatas e Naturais  
Mossoró, Brasil  
pedro.silva67350@alunos.ufersa.edu.br

Humberto Dionísio de Andrade  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Mossoró, Brasil  
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Nickson Saymon de Oliveira Lopes  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Mossoró, Brasil  
nicksonsaymon@gmail.com

Caiky Breno Santiago Chaves  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Centro de Ciências Exatas e Naturais  
Mossoró, Brasil  
caiky.chaves@alunos.ufersa.edu.br

Emerson Nunes dos Santos  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Mossoró, Brasil  
emerson.nnds@gmail.com

**Resumo**— A utilização de sensores de monitoramento de saúde com redes de comunicação sem fio vem sendo amplamente empregados em âmbito médico e militar. Com o advento de dispositivos *wearable* utilizando tecnologia WBAN, tornou-se possível realizar o monitoramento em tempo real dos parâmetros de saúde do usuário. Contudo, com a disseminação dessa tecnologia, surgem preocupações sobre a segurança da exposição do corpo humano a campos eletromagnéticos gerados por esses dispositivos, sendo necessário a avaliação da taxa de absorção específica (SAR), com a intenção de garantir que os níveis de radiação estejam dentro dos limites seguros estabelecidos por órgãos reguladores. Este trabalho tem como objetivo realizar a verificação do SAR através do uso de ferramenta computacional para analisar a taxa de absorção específica gerada por uma antena flexível operando em WBAN com largura de banda ISM, além de avaliar os impactos no desempenho da antena devido à sua aplicação em dispositivos *wearable*.

**Palavras-Chave**— WBAN; Dispositivos *Wearable*; Taxa de Absorção Específica (SAR); Antena Flexível; Sensores de Monitoramento.

**Abstract**—The use of health monitoring sensors with wireless communication networks has been widely employed in medical and military fields. With the advent of wearable devices utilizing WBAN technology, it has become possible to perform real-time monitoring of users' health parameters. However, the spread of this technology, raises concerns about the safety of human body exposure to electromagnetic fields generated by these devices, making it necessary to evaluate the Specific Absorption Rate (SAR) to ensure that radiation levels are within the safe limits established by regulatory bodies. This study aims to verify the SAR using computational tools to analyze the specific absorption rate generated by a flexible antenna operating in WBAN with an ISM bandwidth, as well as to assess the impacts on antenna performance due to its application in wearable devices.

**Keywords**— WBAN; Wearable Devices; Specific Absorption Rate (SAR); Flexible Antenna; Monitoring Sensors.

## I. INTRODUÇÃO

O crescimento da aplicação de sensores de monitoramento vestíveis implantados, sobre a pele ou roupa, vem tomando importância em diversas áreas, como engenharia biomédica e

em âmbito militar. Esta tecnologia, conhecida como dispositivos *wearable*, busca utilizar de antenas flexíveis como uma saída para garantir sua aplicabilidade, conforto e não prejudicar a mobilidade do usuário, desta forma será necessário a confecção de antenas compostas por matérias têxteis e flexíveis como forma de garantir sua aplicabilidade [1][2].

A utilização crescente de dispositivos *wearable* proporciona o desenvolvimento das tecnologias WBAN (*Wireless Body Area Network*), que por meio de comunicação em rádio frequência é capaz de reunir e compilar informações de sensores e atuadores dispostos pelo corpo do usuário, desta forma é possível realizar o monitoramento dos parâmetros de saúde em tempo real pelo profissional de saúde responsável utilizando de redes *Wi-Fi* para a comunicação a longas distâncias [3].

Entretanto visto a disseminação da tecnologia WBAN para dispositivos vestíveis se torna imprescindível o estudo sobre os efeitos causados por sua utilização. Estudos realizados pela ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) e IEEE indicam que o único fator de interferência na saúde do usuário é representado pela energia absorvida pelo corpo em decorrência do campo eletromagnético gerado pelo dispositivo, para tal foi criado o conceito de SAR, que visa padronizar os estudos desta energia absorvida e definir níveis seguros de exposição [4][5].

O objetivo desta pesquisa é realizar a simulação e análise computacional do espectro de SAR em aplicação WBAN de uma antena de microfita de *patch* retangular, operando na frequência de 2,45GHz utilizando uma largura de banda ISM (*Industrial, Scientific & Medical*), bem como identificar as possíveis variações nos coeficientes de reflexão e no ganho total pelo efeito da proximidade entre a antena e o corpo. Sendo capaz por meio dos resultados obtidos, analisar o espectro de SAR em relação aos limites de segurança estabelecidos pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) [6].

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Tecnologia WBAN

O padrão IEEE Std 802.15.6 define tecnologias WBAN como comunicação sem fio de curto alcance aplicada próxima ou dentro do corpo. Sua aplicação utiliza banda industrial científica e médica (ISM) que possui uma largura de 83,5 MHz e abrange uma variação entre 2,4 GHz e 2,4835 GHz de operação [7].

Conforme ilustra a Figura 1, tecnologias WBAN em dispositivos *wearable* são capazes de garantir o monitoramento em tempo real da saúde do usuário, contudo será necessário a utilização de um gateway que possibilite a transmissão desses dados para hospitais, familiares médicos e especialistas [8].



Fig. 1. Estrutura de uma rede de comunicação sem WBAN. Fonte: MESQUITA 2021.

B. Antenas de microfita de patch retangular

Para garantir a aplicação de comunicação sem fio de formar eficaz em um contexto de miniaturização dos dispositivos é necessário a utilização de antenas que possam cumprir os requisitos necessários, para tal as antenas de microfita se tornam uma escolha ideal visto a seu tamanho, eficiência e baixo consumo energético [9].

Antenas de microfita são constituídas por um elemento condutor irradiante conhecido como patch, aplicado sobre um substrato composto de um material dielétrico sobre um plano terra condutor. Os parâmetros construtivos de uma antena de microfita afetam diretamente sua frequência de operação. A Figura 2 ilustra os componentes que constituem uma antena de microfita de patch retangular.

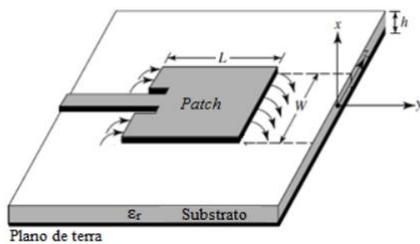


Fig. 2. Estrutura de antena de microfita retangular. Fonte: Adaptado de BALANIS, 2009.

Para assegurar o casamento de impedância ideal, buscando uma aproximação de 50Ω, emprega-se a técnica chamada inset feed, que consiste na inserção de fendas no patch conforme ilustra a Figura 3.

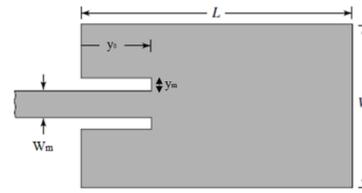


Fig. 3. Geometria do inset feed. Fonte: Adaptado de BALANIS, 2009.

III. METODOLOGIA

A. Cálculo dos parâmetros da antena

Utilizando o método de linha de transmissão, que leva em consideração os efeitos de borda causados pelas dimensões finitas do patch que geram um efeito de franjamento ao longo do comprimento e largura do patch, é necessário o cálculo de um modelo de permissividade efetiva ( $\epsilon_{ref}$ ) de forma que a linha de transmissão da antena possua características elétricas semelhantes à de uma antena ideal, para o este cálculo utilizamos a Equação (1), onde  $\epsilon_r$  é a permissividade do substrato,  $h$  é a altura do substrato e  $W$  é a largura do patch.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-2} \quad (1)$$

Em decorrência do efeito de franjamento pode ocorrer a variação do comprimento da antena ( $\Delta L$ ), para isto é necessário a utilização da Equação (2) para o cálculo desta variação.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2)$$

Desta forma, o comprimento da antena ( $L$ ) em função de sua variação pode ser calculado pela Equação (3), assim como a Equação (4) mostra como calcular a largura da antena ( $W$ ) de microfita utilizando dos parâmetros calculados anteriormente e a frequência de ressonância ( $f_r$ ) desejada.

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (3)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

Para o cálculo do comprimento ( $L_m$ ) e largura ( $W_m$ ) da linha de transmissão será utilizado as Equações (5) e (6) respectivamente. Para a obtenção da largura da linha se fez necessário a utilização de softwares de resolução de cálculo numérico para a aplicação do método da bissecção.

$$L_m = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (5)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left[ \frac{W_m}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left( \frac{W_m}{h} + 1,44 \right) \right]}, & \frac{W_m}{h} > 1 \\ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{8h}{W_m} + \frac{W_m}{4h} \right)}, & \frac{W_m}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Para garantir o valor esperado de impedância será necessário a utilização do *inset feed*, cujo parâmetros podem

ser obtidos pelas Equações (7) e (8). Entretanto é importante ressaltar que o comprimento ( $y_0$ ) e largura ( $y_m$ ) poderão ser obtidas de forma empírica visando um ideal casamento de impedância para a antena.

$$y_0 = 10^{-4}(0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697)\frac{L}{2} \quad (7)$$

$$y_m = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ref}}} \frac{4,56 \times 10^{-12}}{f_r} \quad (8)$$

Devido a curvatura da antena e necessidade de sua faixa de operação na banda ISM foi utilizado a ferramenta *opmétrics* presente no software *ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator)*, que permite a variação dos parâmetros construtivos da antena visando seu melhor desempenho para a aplicação preestabelecida, a Figura 4 ilustra a geometria do patch utilizado para o estudo.

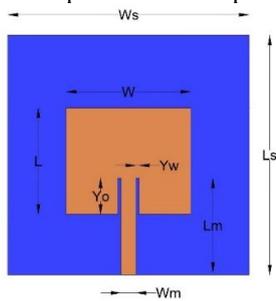


Fig. 4. Estrutura de antena estudada. Fonte: Autoria própria.

**B. Modelagem dos componentes**

O software utilizado para a modelagem e simulação do objeto de estudo deste trabalho foi *ANSYS HFSS (High Frequency Simulation Software) Release 19.0*. A modelagem da antena foi realizada inicialmente de forma plana e posteriormente aplicado uma curvatura correspondente a um cilindro de 100 mm de diâmetro, simulando uma curvatura gerado por sua utilização em dispositivos *wearable*, conforme ilustrado na Figura 5. Seu substrato é composto 100% de poliéster, com uma permissividade relativa é igual a 1,9. A escolha deste material foi realizada para garantir a flexibilidade da antena e facilitar sua confecção, visto a disponibilidade deste material no mercado. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para a modelagem da antena.

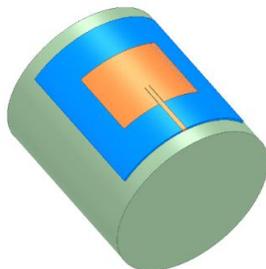


Fig. 5. Curvatura de antena sobre cilindro. Fonte: Autoria própria.

TABELA I. PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DA ANTENA.

PARÂMETROS	VALOR (mm)
Ws	87,67
Ls	87,67
W	51,68
L	42,51
Wm	2,62
Lm	38,88
Yw	3,3
Yo	14,3
Altura do substrato	1,55

Para a modelagem dos *phantoms* (modelos 3D de simulação de membros humanos), foi utilizado o modelo disponibilizado pela biblioteca de componentes do *HFSS*. A Figura 6 apresenta o modelo de simulação de um corpo humano adulto, no qual será realizado o estudo de SAR tendo foco na análise separada de seus membros.



Fig. 6. Phantom corpo humano adulto. Fonte: Autoria própria.

**C. Simulação**

Finalizado o processo de modelagem dos componentes, foi realizado o posicionamento da antena a uma distância de 10mm dos modelos de membros do *phantom*, distância utilizada para simular sua aplicação em dispositivos *wearable*. Para este estudo foram utilizados os seguintes modelos: braço, perna, mão e pé. A Figura 7 ilustra a disposição da antena nas diferentes regiões do corpo.

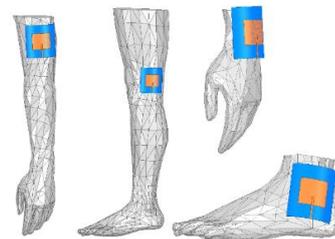


Fig. 7. Disposição de antena sobre membros. Fonte: Autoria própria.

Para realizar a simulação, foi retirado o cilindro anteriormente utilizado para curvar a antena, visto que o mesmo tem seu propósito exclusivo para a modelagem. A disposição da antena tem como objetivo simular regiões do corpo onde seriam utilizados dispositivos *wearable* com rede *WBAN*. Para o processo de simulação, realizado computacionalmente, foi utilizado o método de interpolação de objetos finitos onde cada nó presente nos modelos de

análise é influencia no valor final em qualquer ponto do elemento.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 e Tabela 2 apresentam os resultados obtidos da simulação computacional para a frequência de 2,45GHz referentes ao coeficiente de reflexão obtido com a antena isolada e sua aplicação para cada membro proposto.

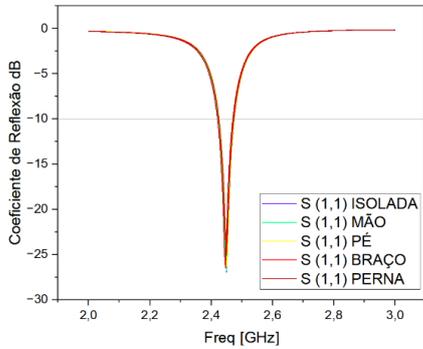


Fig. 8. Gráfico de coeficiente de reflexão. Fonte: Autoria própria.

TABELA II. COEFICIENTES DE REFLEXÃO E LARGURAS DE BANDA.

Estado	S(1,1) [dB]	Frequência		BW [MHz]
Isolada	-26,940	2,427	2,473	46,0
Mão	-26,753	2,425	2,473	48,0
Pé	-26,35	2,427	2,473	46,0
Braço	-25,017	2,427	2,473	46,0
Perna	-23,077	2,423	2,47	47,0

É possível observar que, apesar das aplicações da antena sobre os modelos de *phantom*, sua frequência de ressonância, assim como seu coeficiente de reflexão, apresentou resultados satisfatórios em relação a antena isolada, e sua largura de banda permaneceu na faixa de frequência de operação *ISM*. Ademais, seus coeficientes de reflexão apresentaram -10 dB, apontando a reflexão de menos de 10% da potência de entrada, garantindo sua aplicabilidade nas tecnologias embarcadas.

As Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam os valores de ganho total em duas e três dimensões para a antena aplicada isoladamente e sobre os *phantoms*.

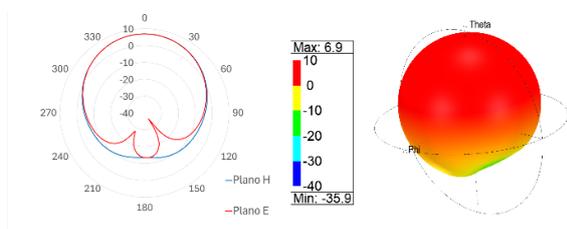


Fig. 9. Ganho total antena isolada. Fonte: Autoria própria.

O gráfico presente na Figura 9 representa o ganho da antena em um ambiente isolado, livre de interferências dos modelos de *phantom*. As projeções 2D e 3D revelam um padrão de otimizado para os planos E e H.

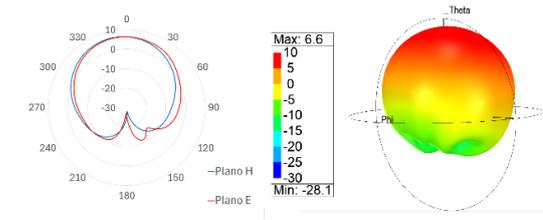


Fig. 10. Ganho total antena sobre mão. Fonte: Autoria própria.

A proximidade com a mão humana demonstra uma alteração no padrão de radiação. Observa-se uma distorção na simetria, com áreas de menor ganho devido à absorção e reflexão das ondas eletromagnéticas pela superfície da pele

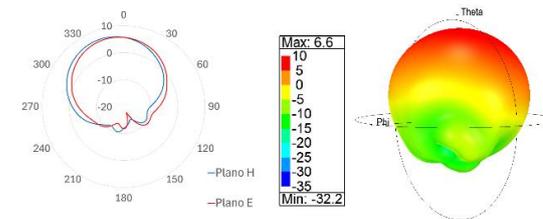


Fig. 11. Ganho total antena sobre pé. Fonte: Autoria própria.

Quando posicionada sobre o pé, o gráfico revela uma redução no ganho nas direções E e H, afetando a dispersão de radiação nessas direções.

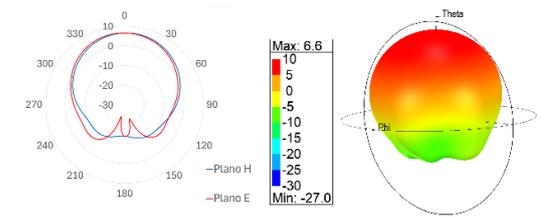


Fig. 12. Ganho total antena sobre braço. Fonte: Autoria própria.

O impacto do braço humano no ganho da antena é evidenciado por um desvio no padrão de radiação, com zonas de menor eficiência, devido a área de interação com a superfície da pele.

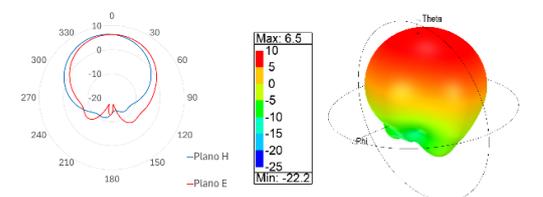


Fig. 13. Ganho total antena sobre perna. Fonte: Autoria própria.

Similar ao braço, a presença da perna modifica o comportamento da radiação. O gráfico apresenta uma diminuição no ganho em regiões específicas, influenciada pelas características anatômicas e pelo volume do membro.

Pode-se notar que o ganho máximo da antena isolada é de 6,9 dB enquanto o menor ganho máximo pela influência dos membros é de 6,5 dB. Considerando a pequena variação observada em relação as antenas instaladas sobre os membros,

pode-se concluir que os ganhos totais da antena não foram substancialmente alterados na aplicação proposta.

O propósito principal da análise dos resultados é a comparação do espectro de SAR obtido por meio da simulação computacional com as diretrizes de segurança estabelecidas pela ANATEL para o limite de exposição a campos eletromagnéticos. A Tabela 3 apresenta os limites de SAR local aplicáveis aos membros do corpo.

TABELA III. RESTRIÇÕES BÁSICAS PARA EXPOSIÇÃO AO CAMPO ELETROMAGNÉTICO DE 100 KHZ A 300 GHZ (ADAPTADA DE ICNIRP GUIDELINES).

Cenário de exposição	Faixa de frequência	Membro local SAR (Wkg-1)
Ocupacional	100 kHz a 6 GHz	20
Público em geral	100 kHz a 6 GHz	4

As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam os espectros de SAR obtidos para cada membro do corpo utilizando a antena proposta para aplicação para tecnologias *wearable* e *WBAN*, a uma distância de 10mm entre a antena e o *phantom*.

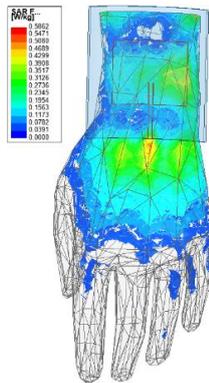


Fig. 14. Espectro de SAR da mão. Fonte: Autoria própria.

Para a Figura 14 que ilustra o espectro de SAR da mão, seu valor máximo registrado foi de 0,5862 W/kg, representando aproximadamente 2,93% para aplicação ocupacional e 14,66% do limite para o público em geral, apresentando uma menor concentração em razão da reduzida área de contato e da baixa concentração de tecido muscular na região.

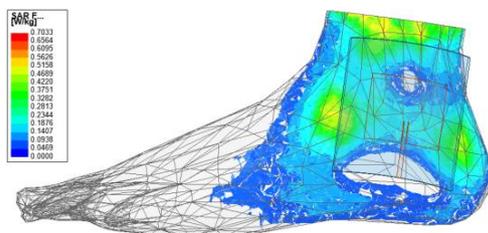


Fig. 15. Espectro de SAR do pé. Fonte: Autoria própria.

Conforme Figura 15, o SAR máximo apresentado para o pé foi de 0,7033 W/kg, correspondendo a 3,52% do limite

ocupacional e 17,58% do limite para o público em geral, registrando o segundo menor valor de SAR nas simulações, principalmente devido ao aglomerado de massa óssea presente na região, o que limita a absorção de energia.

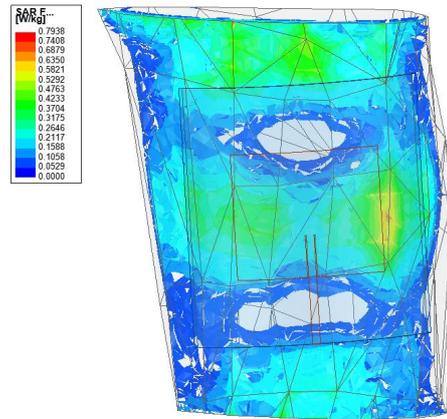


Fig. 16. Espectro de SAR do braço. Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 16, o espectro de SAR máximo para o braço foi de 0,7938 W/kg, o que equivale a 3,97% do limite ocupacional e 19,84% do limite para o público em geral. Observa-se que o tecido muscular contribui para a absorção da energia proveniente do campo eletromagnético.

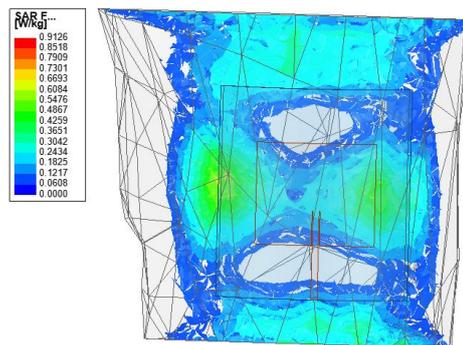


Fig. 17. Espectro de SAR da perna. Fonte: Autoria própria.

Para perna, o valor máximo de SAR atingiu 0,9126 W/kg, correspondendo a 4,56% do limite operacional e 22,82% do limite para o público em geral. Apresentando a maior taxa de absorção em comparação com os membros estudados, assim como visto para o braço isto se deve a sua alta concentração de tecido muscular, afetando sua permissividade específica e contribuindo para uma maior taxa de absorção específica.

Os resultados indicam que os níveis de SAR nos membros analisados estão dentro dos limites de segurança. O braço e a perna apresentaram valores mais elevados de SAR, atribuídos à maior concentração de tecido muscular, que, devido ao seu maior teor de água, favorece a absorção de energia. Por outro lado, a mão e o pé registraram valores menores, influenciados pela menor área de contato e maior presença de massa óssea, que limita a absorção. Esses dados reforçam a influência da composição tecidual na interação com campos eletromagnéticos.

## V. CONCLUSÃO

A análise computacional da Taxa de Absorção Específica (SAR) em antenas flexíveis para dispositivos *wearable* em tecnologias WBAN mostrou que, apesar da proximidade com a pele, os parâmetros de desempenho da antena, como coeficiente de reflexão e ganho, permanecem dentro das faixas de operação ISM. Os níveis de SAR observados ficaram bem abaixo dos limites de segurança definidos pela ANATEL, indicando que o uso dessas antenas em dispositivos *wearable* é seguro. Assim, os resultados confirmam a viabilidade da aplicação dessas antenas em tecnologias WBAN, garantindo tanto o bom desempenho quanto a segurança do usuário.

## AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Os autores agradecem também, a CAPES, UFERSA, GEPEAT, ao capítulo Estudantil MTTs – UFERSA, ao ramo Estudantil IEEE UFERSA e a equipe do Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas da UFERSA.

## REFERÊNCIAS

- [1] EMANUEL, M. "Desenvolvimento de um biossensor na comunicação sem fio por meio do conceito e-têxtil e de protocolos da tecnologia WBAN na aplicação do monitoramento aos cuidados de paciente sob risco de lesões por pressão". 2020. 157 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.
- [2] POTEY, P. M.; TUCKLEY, K. "Design of wearable textile antenna with various substrate and investigation on fabric selection. 2018". In: Proceedings of the 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, India, 2018.
- [3] MUSTAFA, T.; VAROL, A. "Review of the Internet of Things for Healthcare Monitoring. 2020. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)", Beirut, Lebanon, 2020.
- [4] IEC/IEEE. "Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 1528: Human models, instrumentation, and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz)". In: IEC/IEEE 62209-1528:2020, vol., no., pp. 1-284, 19 out. 2020.
- [5] ICNIRP. "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)." Health Physics, v. 118, n. 5, p. 483-524, maio 2020.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). "Resolução Normativa nº 915, de 23 de fevereiro de 2021. Regulamenta a Lei nº 11.934", de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e revoga as resoluções normativas nº 398/2010, nº 413/2010 e nº 616/2014. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021915.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.
- [7] IEEE. IEEE "Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 15.6: Wireless Body Area Networks (IEEE Std 802.15.6)." Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 22 fev. 2025.
- [8] MESQUITA, S. "Estudo de Metamaterial Têxtil para Aplicação em Substrato de Antenas Planares para Tecnologia WBAN. 2021." 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.
- [9] BALANIS, "Constantine A. Teoria de antenas: análise e síntese." Vol. 1 e 2. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.