

ANTENAS MICROSTRIP NA AVALIAÇÃO DA DENSIDADE ÓSSEA: POTENCIAL PARA TRIAGEM DE OSTEOPOROSE

¹DR. GERARDO ANTONIO IDROBO PIZO, ¹DR. JOSÉ MAURÍCIO S.T. MOTTA, ¹EDUARDA GOMES
¹FILLIPE LEITE

¹Universidade de Brasília (UnB)

<gerardo_idrobo@unb.br>, <jmmotta@unb.br>, <eduarda.leao@aluno.unb.br>, <fillipe.leite@aluno.unb.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v19.3830

Resumo. O estudo aborda o uso de antenas microstrip para diagnóstico precoce de osteoporose, uma condição que eleva significativamente os custos de saúde globalmente. Contrariando métodos convencionais que utilizam radiações prejudiciais, este método inovador emprega ondas eletromagnéticas de baixa frequência geradas pelas próprias antenas microstrip. Utilizando o software *Ansys HFSS*, foram realizadas simulações a 2,3 GHz para analisar a interação das ondas com tecidos que imitam características ósseas. Os parâmetros S11 e S21 foram fundamentais na análise das alterações na densidade óssea. As simulações confirmaram a capacidade das antenas *microstrip* de detectar variações na densidade óssea, validando a eficácia desta tecnologia para diagnosticar osteoporose. Os resultados indicam que as antenas *microstrip* são uma ferramenta viável e não invasiva para o diagnóstico precoce de osteoporose, representando uma melhoria significativa para a qualidade de vida dos pacientes, especialmente em regiões com acesso limitado a tecnologias avançadas.

Palavras-chave: osteoporose; antenas *microstrip*; *ansys HFSS*; densidade óssea; tecnologias não invasivas.

MICROSTRIP ANTENNAS IN BONE DENSITY ANALYSIS: POTENTIAL FOR OSTEOPOROSIS SCREENING

Abstract. The study addresses the use of microstrip antennas for the early diagnosis of osteoporosis, a condition that significantly increases healthcare costs worldwide. Unlike conventional methods that use harmful radiation, this innovative approach employs low-frequency electromagnetic waves generated by the microstrip antennas themselves. Using the *Ansys HFSS* software, simulations were conducted at 2.3 GHz to analyze the interaction of the waves with tissues that mimic bone characteristics. The S11 and S21 parameters were crucial in analyzing changes in bone density. The simulations confirmed the capability of microstrip antennas to detect variations in bone density, validating the effectiveness of this technology for diagnosing osteoporosis. The results indicate that microstrip antennas are a viable and non-invasive tool for early osteoporosis diagnosis, representing a significant improvement in patients' quality of life, especially in regions with limited access to advanced technologies.

Keywords: osteoporosis; microstrip antennas; *ansys HFSS*; bone density; non-invasive technologies.

1 INTRODUÇÃO

A osteoporose é uma condição global que afeta cerca de 200 milhões de pessoas, com aproximadamente 10 milhões de casos só no Brasil, representando um desafio crescente para a saúde pública em todo o mundo (Harvey; Dennison; Cooper, 2020). Estudos recentes indicam que os custos globais com hospitalizações decorrentes de fraturas relacionadas à osteoporose chegam a aproximadamente 3,6 bilhões de dólares, superando os custos de doenças graves como infartos, acidentes vasculares cerebrais e câncer de mama (Kanis *et al.*, 2022).

À medida que a população envelhece, a incidência de fraturas e os custos relacionados aumentam rapidamente, tornando o diagnóstico precoce e o tratamento essenciais para a implementação de medidas preventivas e para a redução das fraturas e suas consequências (Javaid *et al.*, 2020). No entanto, as técnicas convencionais para avaliação da densidade mineral óssea, como a Tomografia Computadorizada Quantitativa (QCT), Ultrassonografia Quantitativa (QUS) e Absorciometria de Raios X de Dupla Energia (DEXA), utilizam ondas de raios X de alta frequência e energia, que possuem grande poder de penetração e apresentam riscos à saúde do paciente devido ao seu potencial ionizante (Suetens, 2017).

Em contrapartida, uma abordagem inovadora surge com o uso de antenas *microstrip* para a detecção da perda de massa óssea. Com base nos princípios da engenharia de ondas eletromagnéticas de baixa frequência, o estudo apresenta uma alternativa segura, econômica e viável para o monitoramento contínuo da saúde óssea (Kerketta; Ghosh, 2020).

A frequência de ressonância de 2,3 GHz foi escolhida com base na capacidade das antenas *microstrip* de detectar variações de densidade em materiais biológicos. Essa frequência está dentro de uma faixa ideal para obter um bom comprometimento entre penetração no tecido ósseo e resolução espacial. A pesquisa utiliza o *software Ansys HFSS* para realizar simulações de ondas eletromagnéticas em uma frequência de ressonância de 2,3 GHz, integrando conhecimentos de engenharia e fisiologia óssea, abrindo novas possibilidades para diagnósticos mais sensíveis e acessíveis, com implicações significativas para a saúde e a qualidade de vida dos pacientes. Assim, este trabalho contribui não apenas para o avanço tecnológico, mas também para a prática clínica, oferecendo uma ferramenta promissora para o monitoramento contínuo da saúde óssea.

2 QUADRO TEÓRICO

Para estabelecer uma base sólida de conceitos e métodos aplicados neste estudo, realizou-se uma revisão da literatura que abrange conceitos-chave, componentes e metodologias relevantes.

2.1 Tecido ósseo humano

O tecido ósseo, um tipo especializado de tecido conjuntivo, é fundamental para o suporte estrutural do corpo humano. Composto por fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) e cristais de hidroxiapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$], fortalecidos por íons como sódio e magnésio, apresenta alta resistência à compressão. Essa composição torna o tecido ideal para estudos de permissividade elétrica, que avaliam a interação de campos elétricos com materiais biológicos (Njeh; Genant, 2000). Antenas *microstrip*, sensíveis a variações dielétricas, podem detectar alterações na massa óssea de forma não invasiva, contribuindo para o diagnóstico precoce da osteoporose (Kerketta; Ghosh, 2020).

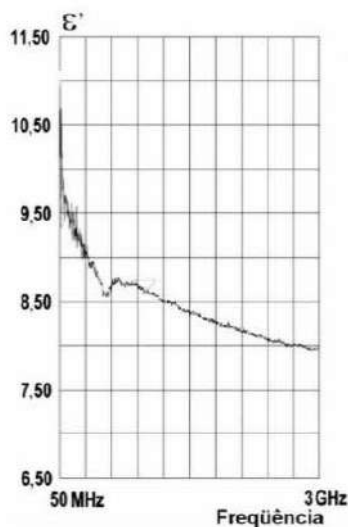
2.2 Permissividade óssea

A permissividade elétrica (ϵ) é uma propriedade fundamental que descreve a capacidade de um material em armazenar energia elétrica quando submetido a um campo elétrico. No contexto dos materiais biológicos, como o tecido ósseo, essa propriedade é particularmente relevante para a propagação de ondas eletromagnéticas.

É importante diferenciar entre *permissividade absoluta* e *permissividade relativa*. A permissividade absoluta (ϵ) refere-se à capacidade de um material de armazenar energia elétrica e é medida em *Farads* por metro (F/m). Já a *permissividade relativa* (ϵ') é a razão entre a permissividade de um material e a permissividade do vácuo ($\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$ F/m). A permissividade relativa é um parâmetro adimensional que indica como o material se comporta em relação ao vácuo.

Em 2008, De Polli, Migliano e Sartori realizaram um estudo sobre a caracterização da permissividade relativa (ϵ') em ossos corticais desidratados de fêmures bovinos, abrangendo uma faixa de frequência de 50 MHz a 3 GHz.

Figura 1: Parte real da permissividade elétrica do osso cortical do fêmur bovino. Cada divisão no eixo x corresponde a um intervalo de frequência de 295 MHz.



Fonte: Polli (2008).

Esse estudo propôs uma metodologia para medir a permissividade complexa dos ossos corticais bovinos desidratados, utilizando o método de impedância em uma configuração de linha de transmissão, conforme descrito por De Polli (2008). Os resultados apresentados, como ilustrados na **Figura 1**, indicam que a permissividade diminui significativamente com o aumento da frequência, estabilizando-se em torno de $\epsilon' = 8$, quando próxima a 3 GHz.

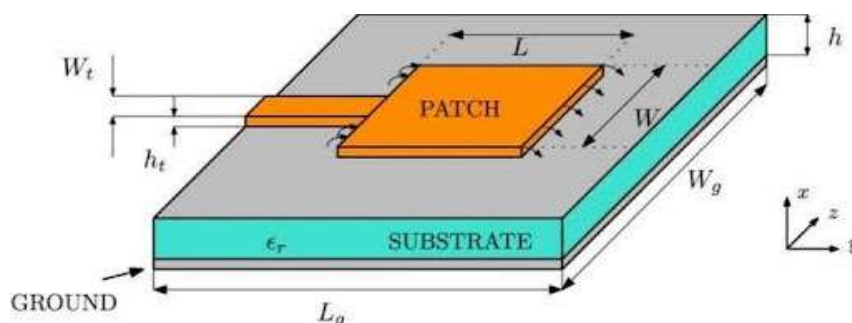
A análise da permissividade relativa óssea é crucial para o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico baseados em antenas *microstrip*, uma vez que as mudanças nas propriedades dielétricas dos ossos podem ser detectadas por essas antenas. Ao operar em frequências na faixa de *Giga-Hertz*, as antenas *microstrip* são capazes de monitorar alterações na densidade óssea, o que pode ser um indicativo de condições como osteoporose. Essa tecnologia permite o desenvolvimento de métodos não invasivos para o acompanhamento contínuo da saúde óssea, complementando as técnicas convencionais (Polli, 2008).

2.3 Osteoporose e diagnóstico

Para o diagnóstico precoce da osteoporose, é recomendado que indivíduos com fatores de risco se submetam a exames que avaliem a saúde óssea. O teste de Densidade Mineral Óssea (BMD) é o método mais eficaz para diagnosticar a osteoporose antes da ocorrência de fraturas. Esse diagnóstico utiliza técnicas avançadas, como a Densitometria Óssea de Dupla Energia (DEXA), a Tomografia Computadorizada Quantitativa (QCT) e a Ultrassonografia Quantitativa (QUS), conforme relatado por Suetens (2017).

2.4 Antenas *microstrip*

As antenas *microstrip*, também conhecidas como antenas de linha *microstrip*, são compostas por um elemento radiante metálico, denominado *patch*, que é impresso sobre uma camada de material dielétrico. Este *patch* está localizado acima de um plano de terra, que fica na parte inferior do substrato da antena, conforme descrito por Balanis (2016). A **Figura 2** ilustra, respectivamente, os componentes típicos e os modelos de *patch* de uma antena *microstrip*. O *patch* dessas antenas pode assumir diferentes formas geométricas, como quadrada, retangular, circular e outras, dependendo das exigências específicas do projeto e das frequências de operação desejadas. A escolha da forma geométrica do *patch* é um aspecto crítico para otimizar o desempenho da antena em aplicações específicas.

Figura 2: Componentes de uma antena *microstrip*.

Fonte: Balanis (2016).

2.4.1 Descrição dos parâmetros S11 e S21

Os parâmetros S11 e S21 são essenciais na caracterização de antenas e sistemas de transmissão. Eles fazem parte dos parâmetros de espalhamento, ou parâmetros S, que descrevem como as ondas de rádio se propagam e são refletidas em sistemas de comunicação e medição.

Parâmetro de Reflexão: O S11 é conhecido como o coeficiente de reflexão e mede a quantidade de energia que é refletida de volta para a fonte quando uma onda encontra uma descontinuidade no meio de transmissão, como uma antena ou um cabo. Um valor de S11 próximo de zero indica que a antena está bem adaptada à sua carga e que pouca energia é refletida, o que é ideal para a eficiência da transmissão. Valores mais altos de S11 indicam má adaptação e podem levar a perdas significativas de energia.

Parâmetro de Transmissão: O S21 é o coeficiente de transmissão e mede a quantidade de energia que passa de um ponto a outro no sistema. Em um contexto de antenas, ele pode ser utilizado para avaliar a eficácia com que a energia é transmitida de uma antena para outra ou através de um meio específico. Em aplicações médicas, como na medição da densidade óssea, um S21 alterado pode indicar mudanças nas propriedades do meio (osso), como variações na densidade que são indicativas de condições como a osteoporose.

Esses parâmetros são normalmente medidos em um ambiente controlado utilizando equipamentos como analisadores de rede vetorial, que fornecem informações detalhadas sobre o desempenho da antena em diferentes frequências. A análise desses parâmetros permite que os engenheiros ajustem o *design* da antena para maximizar a transmissão de energia e minimizar as reflexões indesejadas (Balanis, 2016).

3 METODOLOGIA

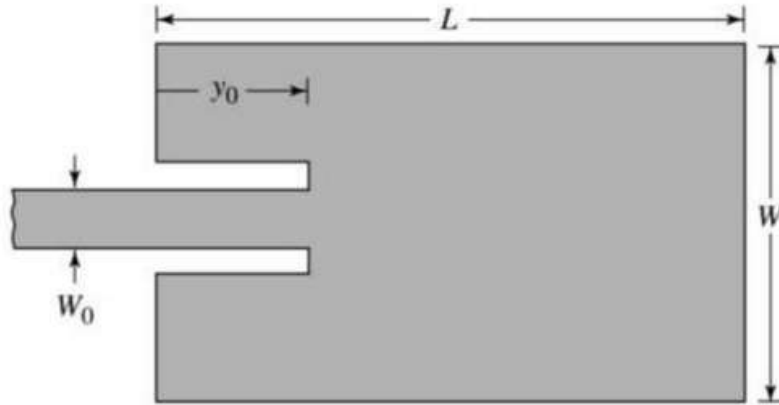
Esta seção descreve os métodos e ferramentas utilizados no design da antena, além das experimentações e simulações conduzidas para investigar a detecção de osteoporose por meio da análise do sinal da antena. O estudo envolveu o desenvolvimento e a simulação de uma antena *microstrip* retangular, escolhida devido à sua simplicidade construtiva e eficiência nas características de radiação.

3.1 Configuração da antena

A antena foi projetada utilizando os seguintes parâmetros iniciais:

- Altura do substrato (h): 1.6 mm
- Constante dielétrica do substrato (ϵ_r): 4.4 (substrato FR4 de fibra de vidro)
- Frequência de ressonância (f_r): 2.4 GHz
- Impedância de entrada (R_{in}): 50 Ω

As fórmulas a seguir, adaptadas de Balanis (2016), foram utilizadas para definir a largura e o comprimento da *microstrip*, bem como as dimensões do plano de terra:

Figura 3: Ilustração de antena *microstrip* retangular.


Fonte: Balanis (2016).

- Largura da antena W :

$$W = \frac{c}{2f_r} \quad (1)$$

- Constante dielétrica efetiva ε_{ref} :

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

- Ajuste da dimensão do comprimento ΔL :

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{ref}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{ref}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

- Comprimento efetivo L :

$$L = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ref}}}} \quad (4)$$

- Comprimento efetivo W_0 (Largura do Alimentador):

$$W_0 = \quad (5)$$

- Comprimento efetivo y_0 (Distância de Inserção do Alimentador):

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arcsin \quad (6)$$

A **Figura 3** mostra uma ilustração da antena *microstrip* retangular usando as equações (1 até 6).

3.2 Simulações

As simulações foram realizadas utilizando o *software Ansys HFSS*, com o objetivo de analisar a resposta da antena *microstrip* à presença de um modelo representativo do osso. O modelo de osso foi representado por um cilindro com permissividade relativa de 8, simulando a densidade óssea.

Além disso, foi atribuída ao material do osso uma perda tangencial de 0.005 (perda dielétrica), que descreve o quanto de energia eletromagnética é dissipada na forma de calor à medida que a onda passa através do osso. Uma

perda tangencial baixa, como o valor utilizado nas simulações, indica que o osso perde apenas uma pequena quantidade de energia durante a transmissão das ondas, mantendo uma alta eficiência de propagação. Essa característica é importante para simulações em aplicações médicas, pois reflete a realidade de como as ondas interagem com a estrutura óssea. Para simular condições que imitam a osteoporose, foram ajustados três parâmetros principais:

- Diâmetro do cilindro: variou de 8 mm a 30 mm, simulando diferentes densidades ósseas.
- Distância entre as antenas: variou de 25 mm a 65 mm.
- Variações internas no osso: o espaço vazio dentro do osso foi emulado com esferas de diâmetros variando de 0.5 mm a 4.5 mm.

Essas variações nas configurações refletem as mudanças que podem ocorrer na estrutura óssea devido à osteoporose, simulando a alteração na densidade do osso.

3.3 Análise dos parâmetros S11 e S21

Para avaliar o comportamento da antena *microstrip* em diferentes condições experimentais, os parâmetros de espalhamento S11 e S21 foram analisados nas simulações realizadas. Esses parâmetros possibilitam observar como a antena responde em termos de reflexão e transmissão de sinal, fatores essenciais para investigar sua capacidade de detectar variações na densidade óssea.

Durante as simulações, a antena foi configurada para operar em uma faixa de frequência específica, com o objetivo de estudar sua resposta sob diferentes configurações experimentais, incluindo:

- As dimensões do obstáculo (simulando o osso);
- A presença de espaços vazios (representando perda de densidade óssea); e
- A distância relativa entre as antenas.

Essas configurações são projetadas para simular cenários variados de densidade óssea, permitindo estabelecer as condições experimentais ideais para a detecção de alterações ósseas. A análise dos parâmetros S11 e S21 orienta a adaptação da antena, visando otimizar a precisão e sensibilidade das medições, enquanto leva em consideração as limitações experimentais.

4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia descrita na seção anterior, focando na operação da antena *microstrip* desenvolvida e na sua capacidade de detecção de alterações na densidade óssea, que são indicativas de osteoporose.

4.1 Análise dos parâmetros da antena

As dimensões da antena *microstrip*, apresentadas na **Tabela 1**, foram projetadas com base nas equações 1 a 6 para otimizar sua operação em torno de 2,3 GHz. Esse ajuste minimiza reflexões indesejadas e maximiza a eficiência de transmissão.

A análise do parâmetro S11, ilustrada na **Figura 4**, mostra que a antena opera eficientemente em uma faixa estreita de 2,25 GHz a 2,31 GHz. Esse desempenho é essencial para testar sua viabilidade em simulações voltadas a diagnósticos de densidade óssea por técnicas não invasivas.

4.2 Representação óssea

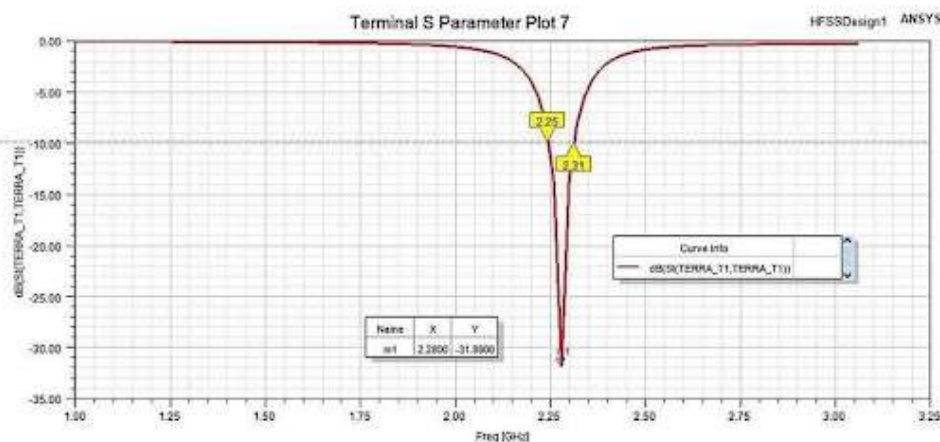
Para simular o comportamento do osso, foi utilizado um cilindro como obstáculo entre as duas antenas. O objetivo desta simulação é avaliar como diferentes diâmetros do cilindro influenciam a resposta do sinal das antenas, especificamente no parâmetro S21, que indica a atenuação do sinal transmitido.

A **Figura 5** apresenta os resultados do parâmetro S21 para diferentes diâmetros de cilindro, variando de 4 mm a 15 mm. Observa-se que, para cada diâmetro, a atenuação do sinal ocorre em frequências distintas, produzindo

Quadro 1: Dimensões da antena.

Dimensão	Valor (mm)
Largura do Patch	39,69
Comprimento do Patch	30,75
Largura do plano de terra	40,35
Comprimento do plano de terra	49,29

Fonte: Autores.

Figura 4: Curva do parâmetro S11 da antena microstrip, mostrando operação eficiente em 2,3 GHz com largura de banda de 2,25 a 2,31 GHz e nível de reflexão adequado em -10 dB.

picos de resposta variados. Esses picos refletem a interação entre o sinal da antena e o cilindro, que representa o osso, com variações de frequência que dependem do tamanho do obstáculo.

Essas variações nos picos de frequência indicam que o aumento no diâmetro do cilindro (representando uma densidade óssea variável) afeta diretamente a frequência de ressonância da antena e a intensidade de atenuação do sinal. Isso sugere que a técnica pode ser sensível a mudanças no volume e densidade do material simulado, o que é relevante para futuras aplicações em diagnósticos de densidade óssea.

4.3 Espaço vazio dentro dos ossos

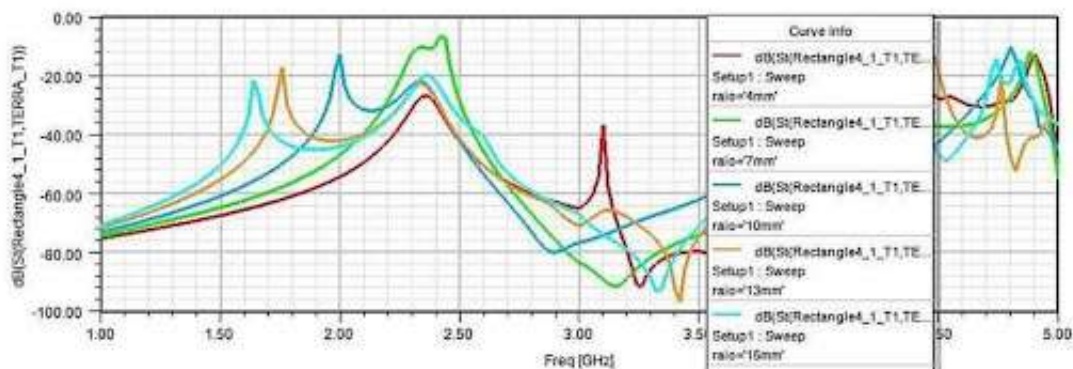
Para simular a porosidade óssea, 30 esferas ocas foram inseridas dentro do cilindro representando o osso, preenchidas com ar. O objetivo é investigar como a presença de espaços vazios afeta a resposta das antenas. Foram realizadas cinco simulações com esferas de diferentes raios (0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 mm) para entender a influência dessas dimensões na propagação do sinal.

A **Figura 6** apresenta uma vista isométrica do sistema configurado, mostrando o cilindro central com as esferas distribuídas internamente, enquanto as antenas estão posicionadas em ambos os lados do cilindro para a análise da transmissão de sinal.

As **Figuras 7 e 8** mostram o comportamento do parâmetro S21 da antena microstrip em relação à presença de esferas ocas com diferentes raios. Observa-se uma atenuação de aproximadamente 2 dB para cada incremento no raio das esferas, o que indica uma sensibilidade da antena às variações no tamanho dos espaços vazios simulados. Esse resultado sugere que a técnica pode potencialmente distinguir diferentes níveis de densidade óssea, como no caso da osteoporose.

4.4 Posição relativa das antenas

O último conjunto de simulações focou na variação da posição relativa entre as antenas e, por extensão, em relação ao cilindro. A distância de uma antena até o centro do cilindro foi alterada de 20 mm a 65 mm, com

Figura 5: Parâmetro S21 do cilindro com diferentes diâmetros (4 mm, 7 mm, 10 mm, 13 mm e 15 mm).

incrementos de 5 mm. Conforme demonstrado na **Figura 9**, observou-se uma atenuação de sinal de 2 dB para cada etapa de ajuste de posição. Este resultado sugere que a posição das antenas deve ser mantida constante durante os experimentos para minimizar distúrbios no sinal. No entanto, uma vez estabelecida a distância, as variações subsequentes nos incrementos de distância testados não mostraram diferenças significativas na atenuação do sinal, conforme avaliado pelo parâmetro S21.

Por outro lado, para o parâmetro S11, mostrado na **Figura 10**, há uma diferença considerável na atenuação do sinal, próxima a 28dB, entre a posição relativa de uma antena e o centro do cilindro de 28mm e 65mm. Na posição de 65mm, há maior atenuação do sinal na frequência de ressonância da antena, o que facilita a detecção da presença do obstáculo.

5 TRABALHOS CORRELATOS

Este segmento discute trabalhos anteriores relacionados ao uso de antenas *microstrip* para a identificação da osteoporose, com foco em um estudo experimental relevante realizado por Cruz, Silva e Castro (2013). Esse estudo utilizou antenas *microstrip* para examinar a densidade óssea, empregando nove ossos bovinos modificados com orifícios, conforme demonstrado na **Figura 11**. Os resultados desse experimento foram essenciais para o desenvolvimento e a aferição das técnicas aplicadas no presente estudo.

A **Tabela 2** resume as características dos ossos utilizados no estudo de Cruz, Silva e Castro (2013), apresentando o peso dos ossos antes e depois das modificações. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada da atenuação do sinal, relacionada à perda de massa óssea.

Quadro 2: Características dos ossos.

Osso	Peso original (g)	Peso alterado (g)
A1	204,2	198,6
A2	142,9	137,2
A3	145,3	141,0
B1	148,3	144,2
B2	139,3	133,1
B3	120,6	117,1
C1	123,0	120,2
C2	145,7	143,4
C3	132,6	123,4

Fonte: Autores.

Foram realizadas 200 leituras de sinal por osso, totalizando 1800 leituras, sendo metade das leituras para ossos originais e a outra metade para ossos alterados. Os resultados indicam uma maior atenuação do sinal para os ossos originais em comparação com os ossos alterados, como apresentado na **Tabela 3**.

Figura 6: Vista isométrica do sistema configurado com o cilindro central contendo esferas ocas para simulação de porosidade óssea e antenas posicionadas nas laterais.

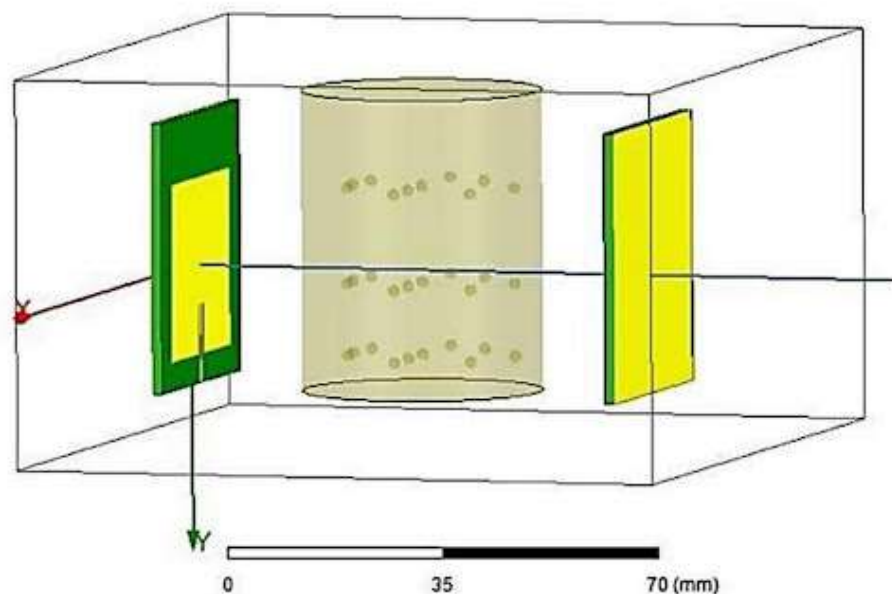
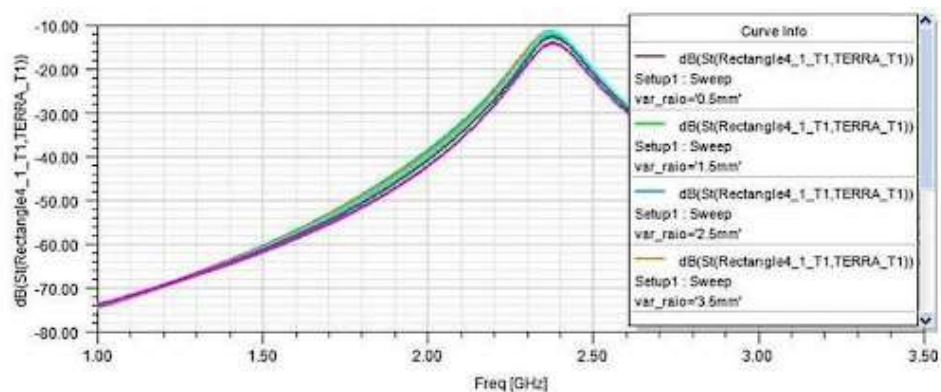


Figura 7: Parâmetro S21 com diferentes raios de esferas ocas (0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm).



Uma frequência de 2,49 GHz foi aplicada para verificar os níveis de atenuação correspondentes em todos os casos apresentados. O estudo realizado por Cruz, Silva e Castro (2013), proporciona uma base comparativa significativa para a validação das metodologias aplicadas no presente trabalho, evidenciando a viabilidade do uso de antenas *microstrip* na detecção e caracterização da osteoporose. Essas informações são fundamentais para compreender a eficácia das antenas *microstrip* em identificar variações na densidade óssea e oferecem um paralelo valioso para as configurações e resultados alcançados em nossa pesquisa.

5.1 Inovação tecnológica e implicações clínicas

Os resultados deste estudo sugerem que as antenas *microstrip* podem ser eficazes na detecção de variações na densidade óssea, oferecendo um método promissor e não invasivo para o diagnóstico precoce da osteoporose. As simulações evidenciaram o potencial de aplicar algoritmos avançados na análise de sinais, o que aprimora tanto a sensibilidade quanto a precisão da técnica. Essa solução possibilita a criação de dispositivos médicos portáteis, de fácil uso e baixo custo, expandindo a disponibilidade do diagnóstico precoce, especialmente em áreas com

Figura 8: Análise detalhada do parâmetro S21 com esferas ocas – Zoom no gráfico. Esta figura apresenta um zoom na resposta do parâmetro S21 para diferentes raios de esferas ocas (0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm e 4,5 mm), focando na faixa de frequência entre 2,33 GHz e 2,45 GHz.

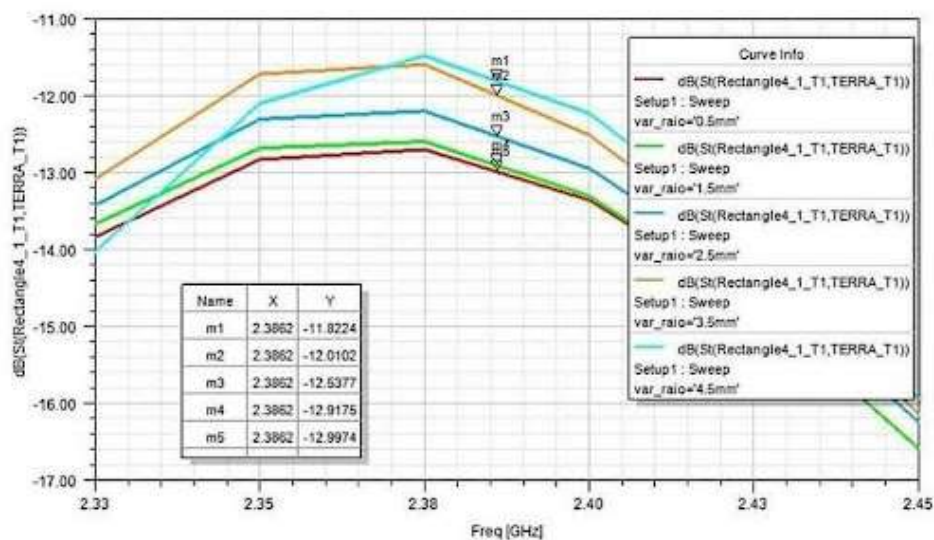
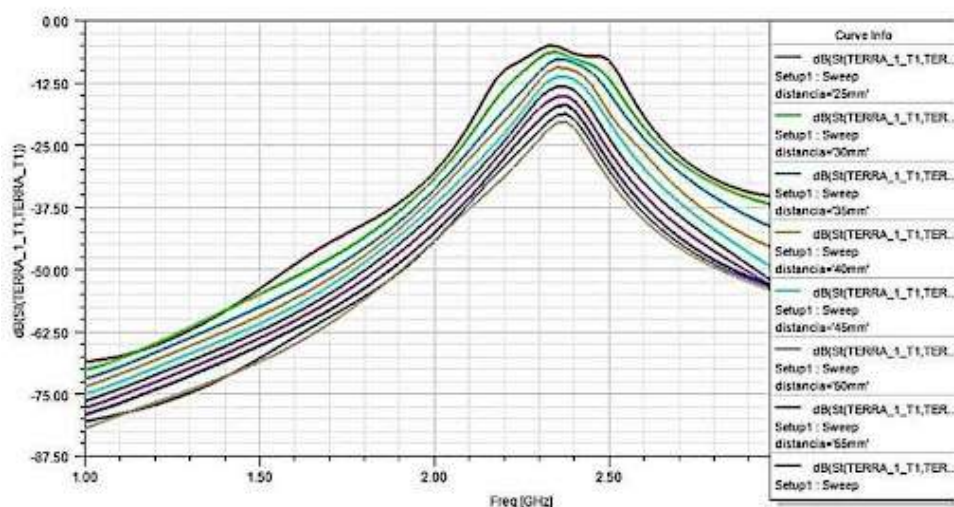


Figura 9: Parâmetro S21 – Variação da posição relativa das antenas.



Quadro 3: Atenuação média dos ossos.

Osso	Atenuação original (dB)	Atenuação alterada (dB)	Varição (dB)
A1	-38,88	-38,67	0,21
A2	-39,79	-39,52	0,27
A3	-40,39	-40,32	0,07
B1	-43,78	-42,86	0,92
B2	-40,59	-39,96	0,63
B3	-38,95	-38,81	0,14
C1	-39,90	-39,88	0,02
C2	-41,44	-40,89	0,61
C3	-40,44	-38,96	1,48

Fonte: Autores.

Figura 10: Parâmetro S11 - Variação da posição relativa das antenas.

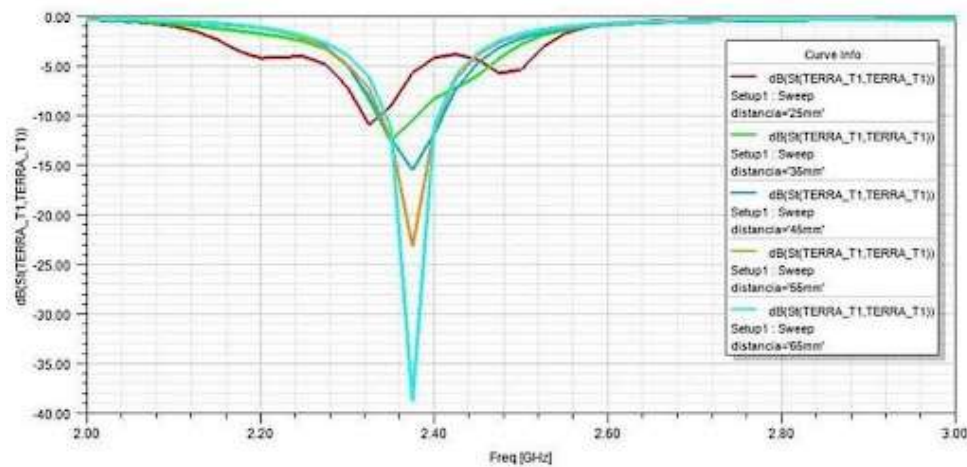
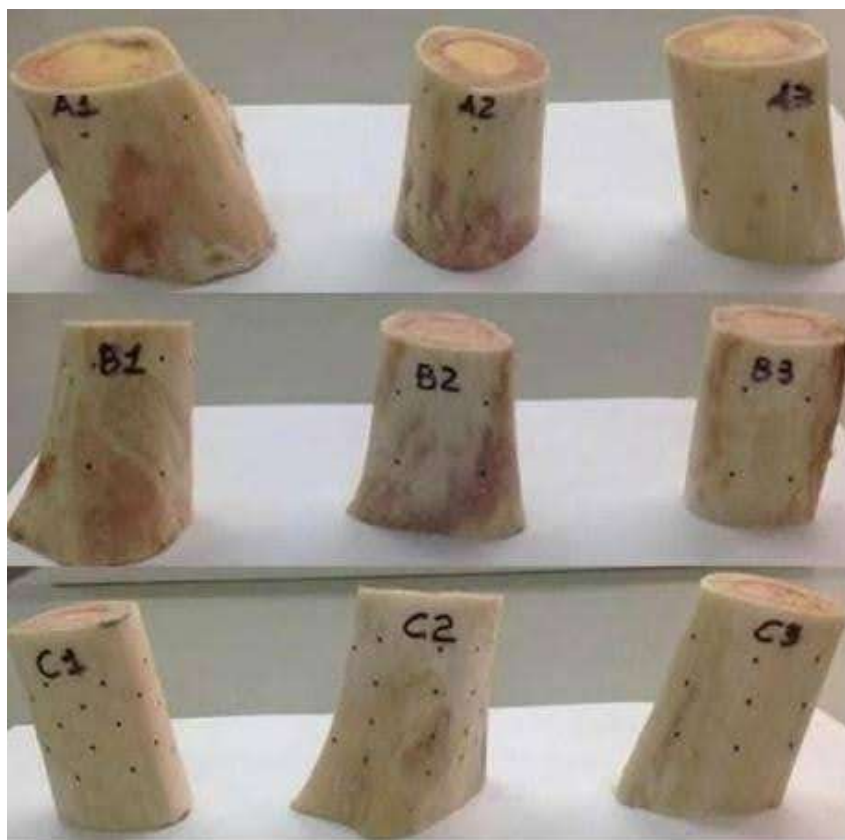


Figura 11: Amostras de ossos bovinos.



Fonte: Cruz, Silva e Castro (2013).

infraestrutura médica reduzida.

6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade de utilizar antenas *microstrip* para detectar e quantificar a perda de massa óssea, potencialmente auxiliando no diagnóstico da osteoporose. As simulações conduzidas, empregando modelos ósseos com variações dimensionais específicas, ofereceram insights valiosos sobre como diferentes configurações e características dos ossos afetam a atenuação do sinal detectado pelas antenas.

A análise detalhada dos parâmetros S11 e S21 das antenas *microstrip* indicou que é possível diferenciar osso original de osso alterado, mostrando assim que a técnica pode ser eficaz para identificar variações na densidade óssea. Importante destacar, a frequência de operação de cerca de 2,3 GHz se mostrou adequada para a detecção das propriedades desejadas, com a largura de banda entre 2,25 GHz a 2,31 GHz fornecendo um equilíbrio entre resolução e sensibilidade.

Este trabalho não apenas confirmou a aplicabilidade das antenas *microstrip* como uma ferramenta promissora para monitoramento contínuo da saúde óssea, mas também contribuiu significativamente para a prática clínica, oferecendo uma nova abordagem para a detecção precoce de osteoporose.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- CRUZ, A. S.; SILVA, S. G. d.; CASTRO, B. H. d. Bone density measurement through electromagnetic waves. *In: Biomedical engineering international conference*. Amphur Muang, Tailândia: [s.n.], 2013. p. 1–5.
- HARVEY, N. C.; DENNISON, E. M.; COOPER, C. Osteoporosis epidemiology: impact on bone health. **Osteoporosis International**, v. 31, n. 1, p. 125–135, 2020.
- JAVAI, M. K.; KAFATOS, G.; LEE, J. *et al.* Fracture liaison services for the evaluation and management of patients with osteoporosis. **Osteoporosis International**, v. 31, p. 1193–1204, 2020.
- KANIS, J. A. *et al.* European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women. **Osteoporosis International**, v. 33, p. 1–19, 2022.
- KERKETTA, S.; GHOSH, D. Microwave sensing for human bone health evaluation. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, 2020.
- NJEH, C. F.; GENANT, H. K. Bone loss: quantitative imaging techniques for assessing bone mass in rheumatoid arthritis. **Arthritis Research & Therapy**, v. 2, p. 446, 2000.
- POLLI, Y. C. D. **Caracterização da anisotropia na permissividade de osso cortical utilizando o método da impedância**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br>.
- SUETENS, P. **Fundamentals of medical imaging**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.