

ANÁLISE DOS EFEITOS DE DIFERENTES SUBSTRATOS TÊXTEIS NOS PARÂMETROS DE ANTENAS DE MICROFITA FLEXÍVEIS

João V. Macedo de O. Silva¹, Samanta Mesquita de Holanda²

Resumo: Neste trabalho foi realizada uma pesquisa acerca de antenas de microfita desenvolvidas para a tecnologia 5G, com substratos têxteis e estrutura flexíveis. As duas antenas estudadas foram construídas com materiais diferentes em suas seções dielétricas, sendo uma composta de algodão, um material natural, e outra de poliéster, um composto sintético. A fim de analisar o comportamento destes dispositivos, foram efetuadas curvaturas nas suas estruturas maleáveis em diferentes superfícies arredondadas, para adaptar os aparelhos a esse plano não linear. Tais superfícies apresentam características cilíndricas, que são distintas pelos diâmetros, sendo de 150mm, 100mm e 75mm. O desenvolvimento desta ação foi inserido num ambiente simulado, tratando-se do Ansys HFSS 19.2, e para o ambiente de medições reais, foi utilizado o LiteVNA 64. A finalidade desses estresses mecânicos nas antenas é verificar como isso afeta seus parâmetros de desempenho, analisando e concluindo se determinados aparelhos ainda são aptos para operação ou não. Com os resultados obtidos nas medições para as duas antenas, presumiu um comportamento adequado e estável para ambas quando são submetidas aos arqueamentos dos cilindros de 150mm e 100mm. Entretanto, observou-se um limite para essa tensão mecânica, pois, caso ela seja aplicada em um grau mais crítico, há perdas na eficiência das antenas, como ocorreu para a curvatura de 75mm.

Palavras-chave: antena; microfita; têxtil; curvatura; substrato

1. INTRODUÇÃO

A comunicação é um dos atributos mais primordiais e essenciais para o ser humano, desde os simples gestos corporais, até tecnologias de comunicação a longas distâncias. Com o avanço da ciência e tecnologia, foram aprimorados os meios de comunicação, a fim de facilitar essa interação. No setor da engenharia, mais em específico, na telecomunicação, foram desenvolvidas diversas tecnologias neste âmbito, como as antenas de microfita, que consistem na comunicação sem fio, mediante um dispositivo cujo suas dimensões são pequenas, como na escala de centímetros, milímetros e até micrometros [1-3]. Uma das adaptações para estas antenas foi tornar sua estrutura rígida em flexível. O avanço da eletrônica flexível possibilitou a inovação no setor de antenas [4]. Essa característica permitiu uma variação de funcionalidade para o equipamento, quando comparado com seus modelos tradicionais, pois, com ela se torna possível algumas atribuições, como por exemplo: adaptar seu acoplamento em superfícies não planas, devido sua flexibilidade; maior resistência a estresses físicos, pois as características dos materiais permitem suportar maiores forças sobre si; diminuição de gastos, com o uso de materiais de fácil aquisição. Dentro destes segmentos, há diversos ramos de pesquisas que buscam estudar melhor a adaptação destas antenas com esta implementação, em especial com o uso de materiais têxteis, com a realização de testes que visam à análise dos parâmetros de desempenho, como a frequência de ressonância, coeficiente de reflexão e largura de banda, quando implementado essa adaptação [5-9].

Um assunto pautado quando se aborda o tema de telecomunicações é sobre as gerações de redes móveis, mais conhecidas como, por exemplo, tecnologias 1G, 2G, 3G, 4G, 4.5G, 5G e 6G. Estas nomenclaturas abreviadas são referentes ao desenvolvimento da tecnologia de dados móveis, com cada geração trazendo melhorias na velocidade, capacidade e qualidade de informações. A ilustração na Figura 1 exibe essa evolução.



Figura 1. Gerações das redes móveis. (Adaptado de [10])

Entre esses avanços, um que se destaca no campo da área profissional e pesquisas científicas é a tecnologia 5G. Essa geração, assim como as demais, proporcionou avanços em diversos setores da sociedade, sendo na área militar, na saúde, segurança pública, econômica e em outros âmbitos [11,12]. Convém destacar que essa nova geração de redes possibilitou utilizações mais diversas em dispositivos eletrônicos, entre eles, as antenas de microfita. Essa progressão nessas tecnologias os tornou alvo de novas pesquisas, impulsionando melhorias em suas operacionalidades e ampliando a pluralidade de suas aplicações.

Diante destes temas abordados, foram realizadas pesquisas sobre antenas de microfita têxteis e de estrutura flexível. As antenas de microfita selecionadas para este trabalho possuem os mesmos atributos físicos mencionados, porém, são diferenciadas pelo material têxtil composto em sua parte dielétrica, sendo um material 100% natural e outro 100% sintético. O objetivo da diferença entre estas antenas é analisar os impactos gerados nos seus parâmetros de desempenho: frequência de ressonância, coeficiente de reflexão e largura de banda. Observando qual destes dispositivos têm uma melhor performance em seus estados padrões e quando são submetidos a curvaturas em suas estruturas maleáveis.

2. METODOLOGIA

Conforme o que foi apresentado na introdução, assim como o objetivo proposto para este trabalho, foi criado um fluxograma das etapas a serem seguidas na metodologia deste experimento, demonstrado na Figura 2.

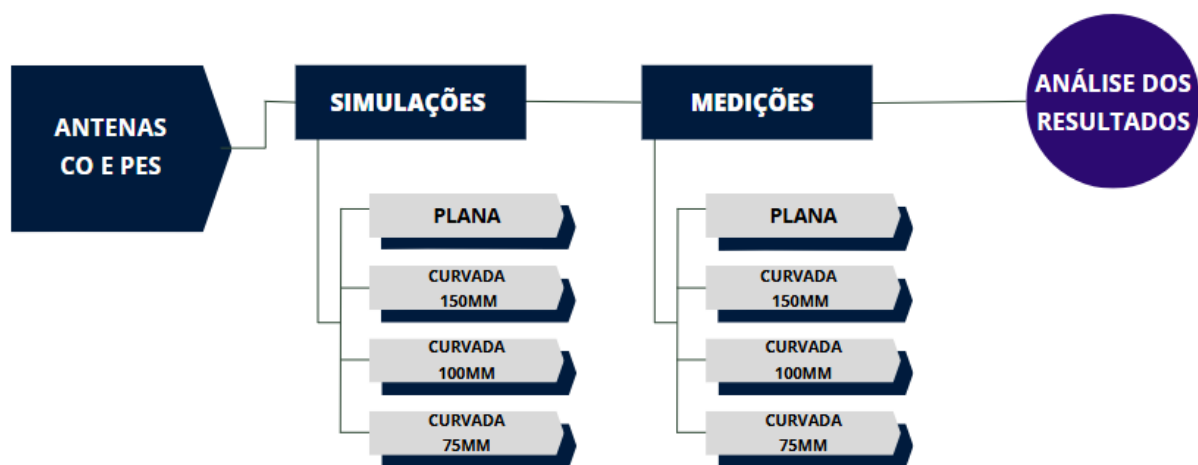


Figura 2. Fluxograma sobre as etapas de simulações e medições da pesquisa. (Autoria própria)

A princípio, os dois materiais a serem estudados são as duas antenas de microfita, desenvolvidas para operarem na tecnologia 5G, ou seja, ressonantes na frequência de 3,5 GHz. Estas antenas possuem em sua estrutura duas seções: condutora e dielétrica. Na parte condutora, sendo o *patch*, *plano de terra*, *linha de transmissão* e o *Grounded Coplanar Wave Guide (GCPW)* – método usado para aperfeiçoar o casamento de impedância da antena de microfita, que consiste na garantia da máxima transferência do sinal entre o transmissor e a antena -, são inteiramente compostas por uma folha de cobre (Cu), nas duas antenas. Por outro lado, a parte isolante, que é o *substrato*, é distinto entre os dois dispositivos. Uma das antenas possui o *substrato* completamente feito de algodão (CO), o qual é um material natural. Já a outra antena, é totalmente composta por poliéster (PES), um material sintético. De acordo com as características individuais de cada dispositivo, foram atribuídas as seguintes nomenclaturas: “Antena CO”, para aquela com substrato de algodão; e “Antena PES”, para a que possui substrato de poliéster. Além destas características de materiais, elas também possuem suas respectivas dimensões em milímetros (mm) evidenciadas na Figura 3. O processo de desenvolvimento e fabricação dessas antenas é relatado em [13], cuja obra serviu como base para esta pesquisa.

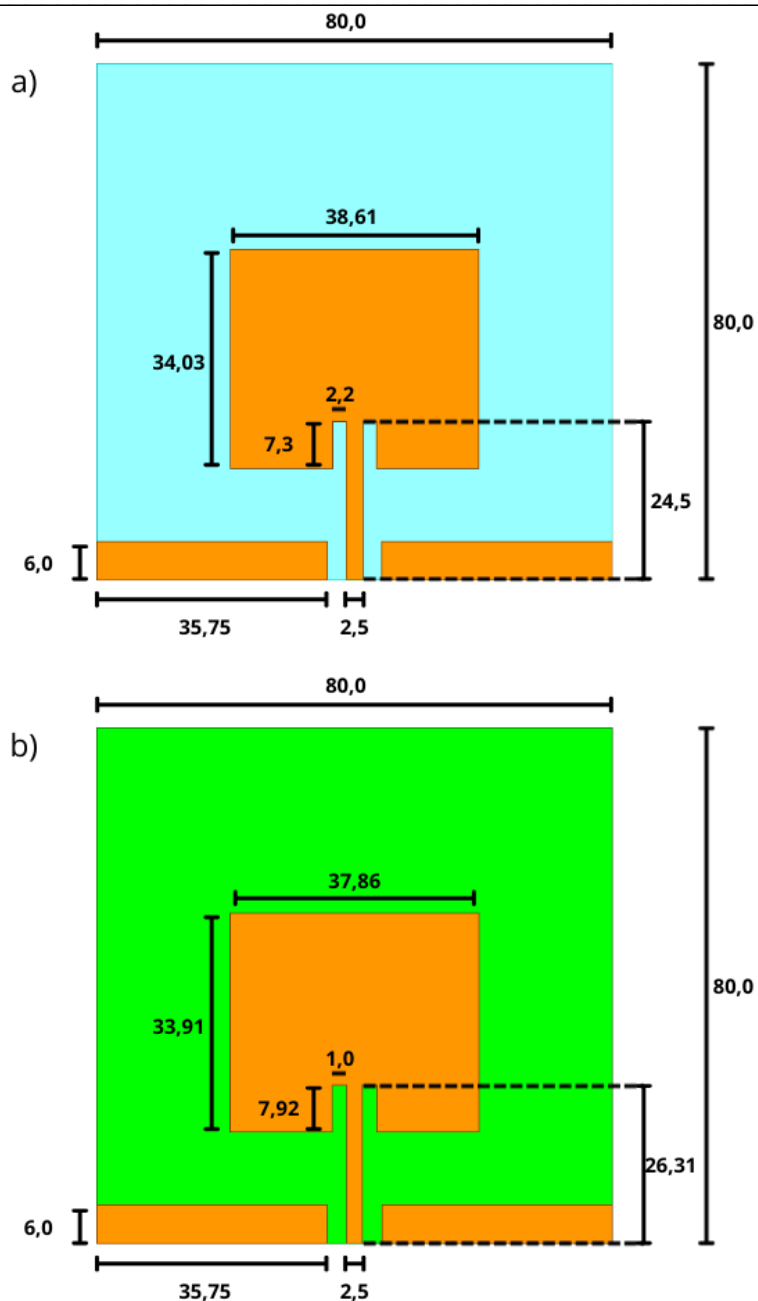


Figura 3. Geometria numericamente em milímetros (mm) da (a) antena CO e (b) antena PES. (Autoria própria)

Destaca-se que a altura total dos substratos de cada antena são: 1,24 mm para a antena CO; e 1,36 para a antena PES.

Na Figura 4 é demonstrado as duas antenas no ambiente real, como também, as mesmas recriadas no ambiente virtual ANSYS HFSS versão 19.2, o qual foi utilizado para as simulações destes dispositivos.

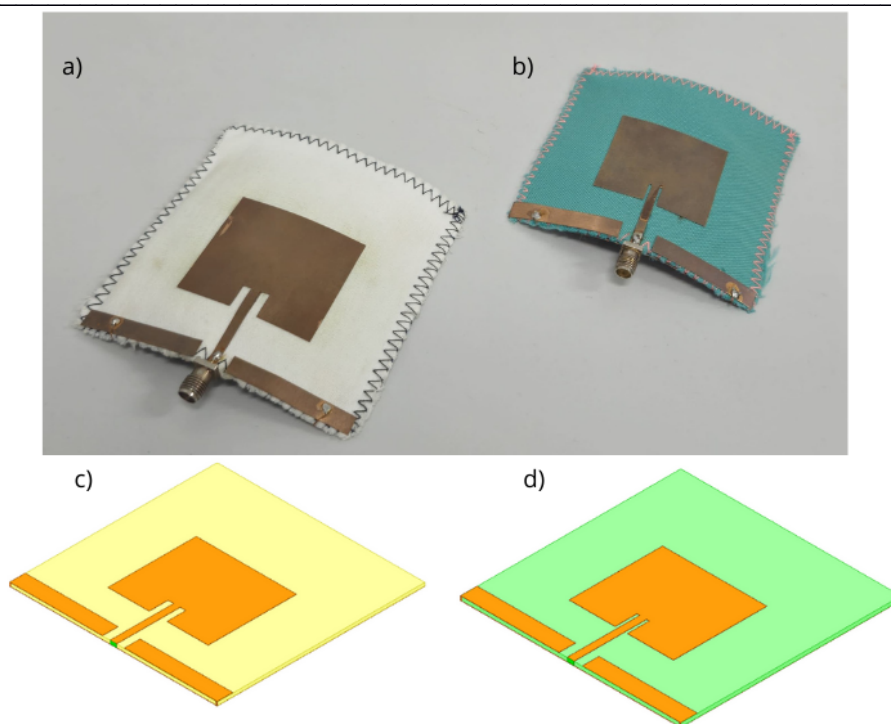


Figura 4. (a) Antena CO e (b) antena PES no ambiente real e (c) Antena CO e (d) Antena PES recriadas no Ansys HFSS. (Autoria própria)

Além das dimensões das antenas, é importante destacar parâmetros intrínsecos dos substratos implantados, sendo a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), que consiste em mensurar a capacidade do material de armazenar energia quando submetido a um campo elétrico, e a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$), que diz a respeito das perdas de energia quando exposta a um campo elétrico. Conforme [13], obtêm-se esses valores e os mesmos são destacados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados da média e desvio padrão da ϵ_r e $\tan \delta$. (Adaptação de [13])

Substrato	ϵ_r		$\tan \delta$	
	$\bar{X}$	σ	$\bar{X}$	σ
Algodão (CO)	1,5786	$\pm 0,0309$	0,0328	$\pm 0,0158$
Poliéster (PES)	1,4234	$\pm 0,0252$	0,0013	$\pm 0,0020$

Nota: $\bar{X}$ representa a média desses dados.
 σ representa o desvio padrão.

Outra ferramenta utilizada foi três canos PVC, com diâmetros de 75mm, 100mm e 150mm. Esses cilindros serão utilizados para curvar as antenas conforme a circunferência deles, para serem realizadas as medições. Para o ambiente simulado, estes objetos foram recriados com a mesma dimensão do diâmetro. Na Figura 5 é demonstrado os canos PVC no ambiente real e no simulado. Vale ressaltar que estes cilindros são apenas como auxiliares para o arqueamento da antena, logo que em pesquisas realizadas foi concluído que a composição do material não afeta o funcionamento dos aparelhos.

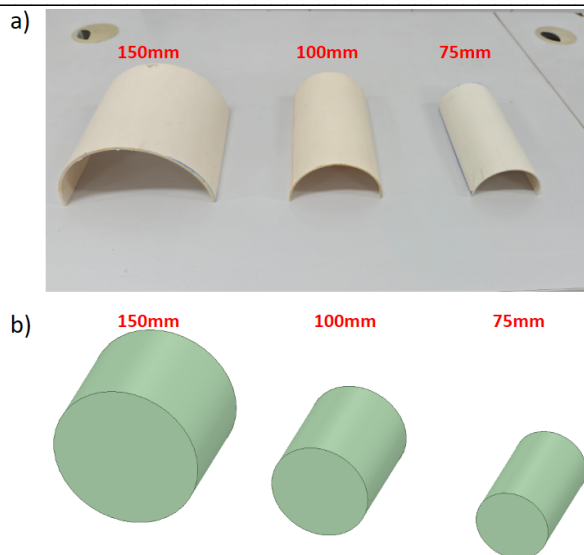


Figura 5. (a) Canos PVC no ambiente de medição.
(b) Canos PVC no ambiente simulado. (Autoria própria)

Os cilindros, cujos materiais são apresentados na Figura 5, foram utilizados para submeter quatro diferentes curvaturas às antenas, conforme no fluxograma da Figura 2. A Figura 6 ilustra os modelos simulados no software HFSS correspondentes a estas configurações. As mesmas geometrias foram, então, replicadas para a etapa de validação experimental.

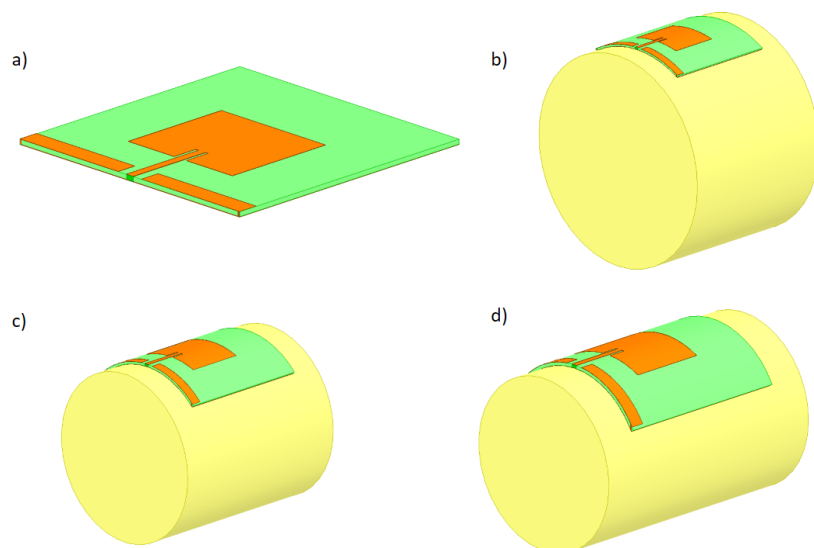


Figura 6. Antena PES no Ansys HFSS (a) em estado plano, (b) curvada sobre 150mm, (c) curvada sob 100mm e (d) curvada sob 75mm. (Autoria própria)

Para as medições, foi utilizado o dispositivo LiteVNA 64 para efetuar as medições, exibido na Figura 7.

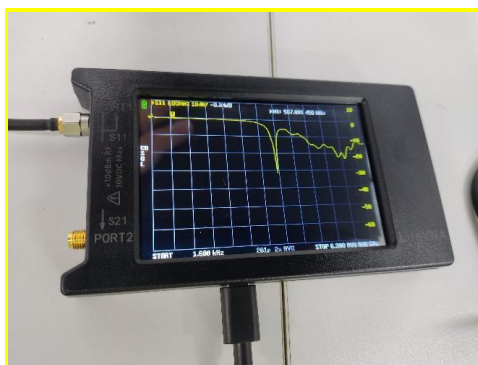


Figura 7. LiteVNA 64 utilizado para as medições das antenas. (Autoria própria)

As antenas na seção de medições foram submetidas às curvaturas dos cilindros mostrados na Figura 4. A cargo de exibição, na Figura 8 é apresentado a Antena PES aplicada a essa ação e conectada ao aparelho de medição.

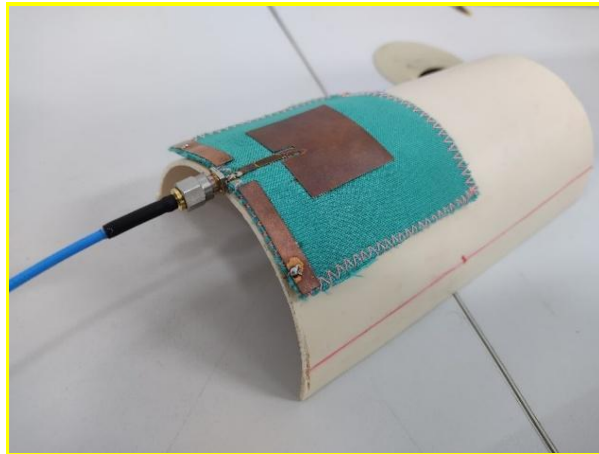


Figura 8. Antena PES no ambiente de medição. (Autoria própria)

Para concluir a explanação acerca da etapa de medições, ressalta-se, por fim, a instalação do aplicativo NanoVNA, o qual é conectado com o LiteVNA, para que os resultados sejam apresentados no *display* do aplicativo implantado. O *setup* geral desta segunda parte é demonstrado na Figura 9.

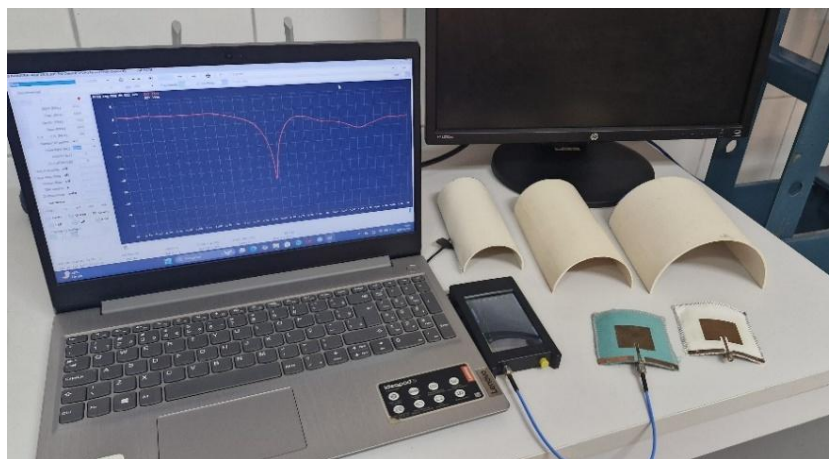


Figura 9. Setup de medições. (Autoria própria)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizadas as simulações e medições das respectivas antenas, seus dados do coeficiente de reflexão $S(1,1)$ foram extraídos e plotados num aplicativo de análise de dados e criação de gráficos científicos, a fim de sobrepor resultados num mesmo gráfico para uma melhor visualização e comparação desses comportamentos.

As Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos $S(1,1)$ das antenas PES simuladas e medidas, respectivamente. Como também, as Tabelas 2 e 3 disponibilizam os valores numéricos presentes nestas plotagens. Destaca-se que, o gráfico $S(1,1)$ demonstra a curva da resposta do coeficiente de reflexão das antenas — medido em decibéis (dB) — ao longo da faixa de frequência de ressonância. $[f_r]$, medido em *Hertz* (Hz). Além disso, analisando as respostas é possível obter a *largura de banda* (BW) de cada item estudado.

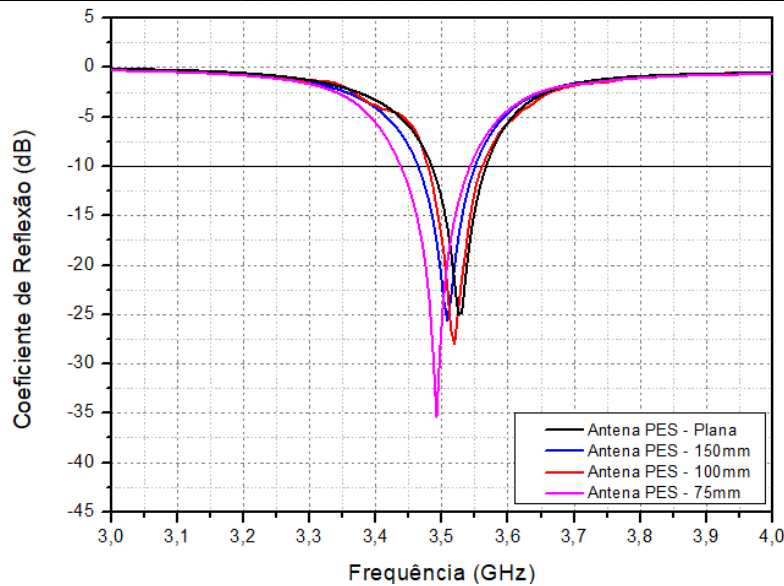


Figura 10. Gráfico do coeficiente de reflexão $[S_{1,1}]$ das antenas PES simuladas. (Autoria própria)

Tabela 2. Parâmetros simulados das antenas PES. (Autoria própria)

	Antena PES Plana	Antena PES 150mm	Antena PES 100mm	Antena PES 75mm
f_r [GHz]	3,524	3,508	3,519	3,492
$S(1, 1)$ [dB]	-25,01	-25,60	-27,99	-35,44
BW [MHz]	81,0	70,0	82,0	105,0

As curvas características indicam a frequência de operação do dispositivo, que corresponde ao ponto de maior atenuação do sinal (o vale na curva). O coeficiente de reflexão, por sua vez, mede a quantidade de energia que é transmitida da alimentação até o *patch* e o quanto dessa energia é refletida de volta para a fonte.

Como também, é importante destacar que a linha horizontal fixada em -10 dB é para representar que as atenuações abaixo desse valor significam que 90% ou mais da energia que é enviada no ponto de alimentação, chega até o irradiador, sendo esse valor um adequado [14].

Ao analisar as curvas apresentadas na Figura 10, observa-se uma proximidade entre elas mesmo com as curvaturas sendo aplicadas. Analisando a Tabela 2, especificamente a linha da frequência de ressonância, nota-se a redução da frequência de operação da antena quando ela é submetida a esse estresse mecânico, entretanto, com valores consideravelmente baixos, sendo 0,9% a máxima variação ocorrida, quando comparado a antena plana. Por outro lado, suas atenuações se mantêm constante, com exceção da curvatura de 75 mm, onde há uma redução expressiva, sendo de 30% comparando com a do estado plano. Em suma, analisando tais simulações, pode-se prever que estas variações pouco impactam a antena de microfita composta de poliéster. Para a frequência de ressonância, a máxima variação foi de 0,9% e na atenuação foi de 41%, que apesar de ser um valor alto, impulsionou de -25 dB (estado plano) para -35,44 dB (curvatura 75 mm), ou seja, uma melhoria para o equipamento. Já sobre as BW, a alteração máxima obtida foi de 27%, porém, assim como ocorreu no coeficiente de reflexão para as duas antenas comparadas, foi um aumento de 81 MHz para 105 MHz, isto é, um aumento desta largura.

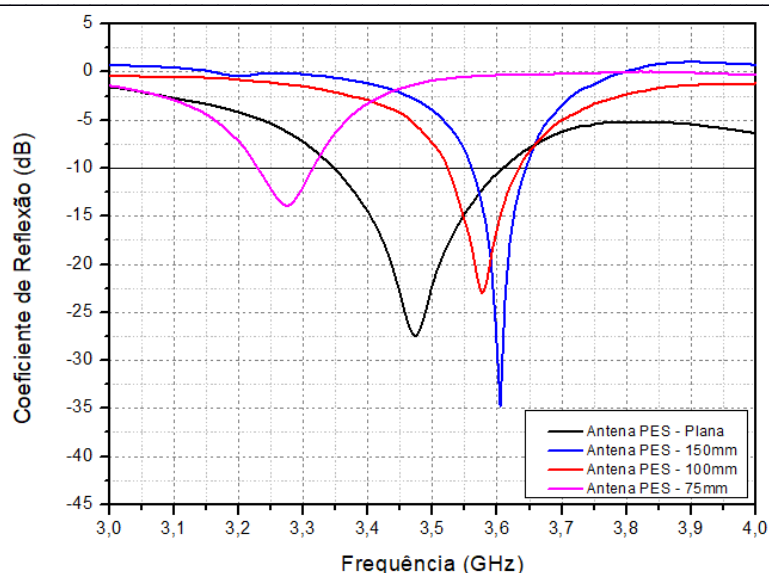


Figura 11. Gráfico do coeficiente de reflexão $[S_{1,1}]$ das antenas PES medidas. (Autoria própria)

Tabela 3. Parâmetros medidos das antenas PES. (Autoria própria)

	Antena PES Plana	Antena PES 150mm	Antena PES 100mm	Antena PES 75mm
f_r [GHz]	3,474	3,605	3,575	3,275
$S(1,1)$ [dB]	-27,45	-34,75	-22,94	-13,95
BW [MHz]	261,0	83,5	107,0	88,0

Já no ambiente real, analisando a Figura 11 e Tabela 3, percebe-se uma variação mais abrupta conforme varia-se o estado do dispositivo. Observando a frequência, o valor de maior variação, quando se compara com a antena plana, foi de 5,7% para a curvatura de 75 mm. Assim como a irradiação delas, que apesar de haver uma atenuação maior na curvatura de 150 mm comparado com a de 100 mm e a Plana, ambas estão dentro de uma região aceitável para o bom desempenho do equipamento. Todavia, quando o estado da antena chega nos 75 mm, há uma perda considerável no coeficiente de reflexão, havendo um aumento de aproximadamente 50% em comparação com a antena plana. Como também, há uma modificação na frequência, que se desloca de 3,474 GHz, no estado original, para 3,275 GHz. Apesar deste resultado para essa curvatura, a irradiação ainda está dentro dos 90% recomendado, mas o deslocamento da frequência pode resultar em algumas divergências. Sobre a BW, a antena PES plana apresenta valores superiores quando comparada as curvaturas, logo que a menor redução deste parâmetro é de 59% (curvatura de 100 mm) e máxima de 68% (curvatura de 150 mm). Vale ressaltar que maiores larguras de banda podem contribuir para a transmissão de informação do aparelho, porém, valores acima do planejado podem gerar problemas de interferências a depender da margem de erro tolerável.

Agora, analisando o comportamento da antena de microfita com substrato sintético, pode-se concluir que a tensão mecânica gerada pelas curvaturas de 150 mm e 100 mm apresentam impactos com taxas de erros baixas no que tange o desempenho do aparelho, entretanto, quando esse estresse é mais crítico, como ocorre no arqueamento de 75 mm, os parâmetros apresentam variações maiores, com a frequência se distanciando dos 3,5 GHz e a atenuação diminuindo. Portanto, pode-se presumir que a antena possui uma tolerância a esta ação de curvatura, com perdas de maior porcentagem de erro para o dobramento de 75 mm.

Diante os dados apresentados do ambiente virtual para o real, destaca-se que, por meio de análises feitas, essas diferenças apresentadas para as duas etapas ocorre devido a fatores que influenciam no ambiente de medição, diferente do ambiente ideal das simulações. Quando há o arqueamento da estrutura real sucede o alongamento do tecido, ocasionando na alteração da superfície porosa do material, que devido a isso, ocorre a modificação da permissividade do mesmo. Adicionalmente, essa deformação concentra-se na região central do objeto, causando uma redução na espessura do substrato nessa área central em relação às bordas. Essa alteração estrutural provoca uma distribuição não uniforme dos campos elétricos na superfície do modelo. Consequentemente, presume-se que a variação da permissividade durante o alongamento cause discrepâncias entre os resultados simulados - que não consideram este efeito - e os dados obtidos experimentalmente.

Agora para a análise da antena de matéria natural, as Figuras 12 e 13 apresentam uma mesma dinâmica de gráficos, sendo simulado e medido, respectivamente. Assim como as Tabelas 4 e 5, indicando os valores numéricos das variáveis estudadas.

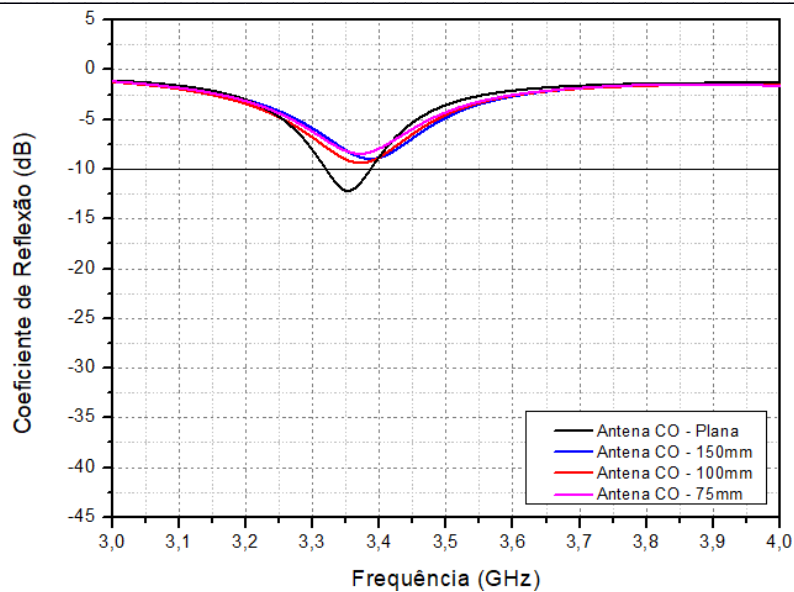


Figura 12. Gráfico do coeficiente de reflexão [S1,1] das antenas CO simuladas. (Autoria própria)

Tabela 4. Parâmetros simulados das antenas CO. (Autoria própria)

	Antena CO Plana	Antena CO 150mm	Antena CO 100mm	Antena CO 75mm
f_r [GHz]	3,35	3,39	3,37	3,37
$S(1,1)$ [dB]	-12,18	-8,97	-9,37	-9,37
BW [MHz]	53,0	Indefinido	Indefinido	Indefinido

A análise da antena em ambiente simulado revela que, sob a aplicação de curvaturas, a determinação da largura de banda torna-se inviável. Conforme ilustrado pela curva do coeficiente de reflexão na Figura 12 e pelos dados na Tabela 4, o parâmetro $S(1,1)$ não atinge o limiar de -10 dB, condição necessária para esta medida. No estado plano, o coeficiente de reflexão está dentro dos 90% exigidos. Como também, a frequência de ressonância se aproxima dos 3,5 GHz planejados, apresentando uma margem de erro inferior a 5%. Apesar da antena neste período está operando normalmente, qualquer curvatura realizada sobre sua estrutura ocasiona em curvaturas que não são possíveis extrair todos os parâmetros desejados, logo que o coeficiente de reflexão dos três arqueamentos encontra-se superior aos -10 dB mínimo, isto é, uma boa parte da energia é refletida de volta para o gerador.

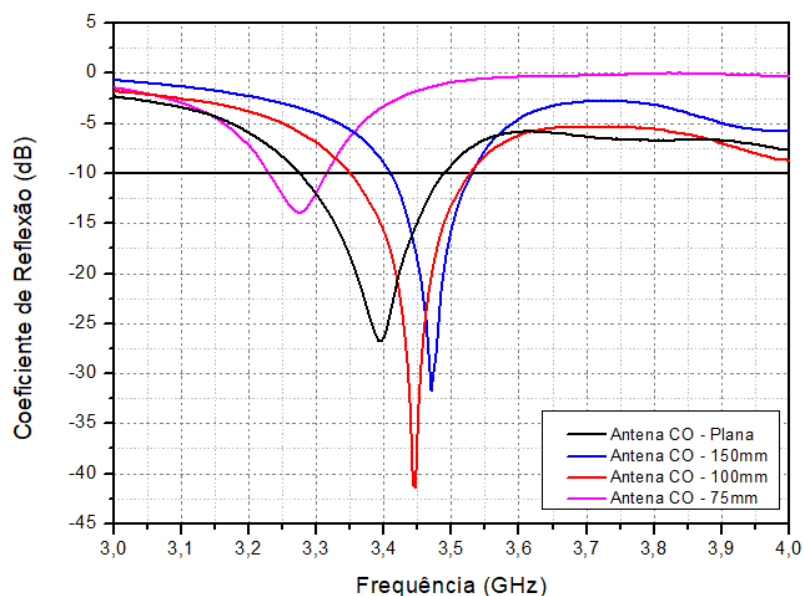


Figura 13. Gráfico do coeficiente de reflexão [S1,1] das antenas CO medidas. (Autoria própria)

Tabela 5. Parâmetros medidos das antenas CO. (Autoria própria)

	Antena CO Plana	Antena CO 150mm	Antena CO 100mm	Antena CO 75mm
f_r [GHz]	3,39	3,47	3,44	3,27
$S(1,1)$ [dB]	-26,73	-31,73	-41,38	-13,94
BW [MHz]	215,0	120	230,0	89,0

Já examinando a antena CO no ambiente real, conforme a Figura 13 e Tabela 5, há uma diferença quando se compara com o ambiente virtual, visto que, no HFSS, os resultados das curvaturas demonstraram que a antena se tornava inadequada quando submetida a esse estresse físico. Todavia, nas medições feitas, observa-se uma melhora da frequência de ressonância – comparando com o 3,5 GHz ideal – e na transmissão de energia por parte da antena, tendo uma melhoria de 54,8% do estado padrão para o de melhor resposta, sendo a de 100 mm. Além disso, a BW variou conforme as diferentes curvaturas, apresentando uma alteração mínima de 7% para a curvatura de 100 mm e máxima de 58% para a de 75 mm, quando comparadas ao estado plano. Contudo, quando a curvatura se torna muito brusca, no caso da 75 mm, há uma perda nestes mesmos parâmetros. Para fins comparativos, ao investigar essa curvatura com base nos parâmetros da de 100 mm, tem-se: deslocamento da frequência com erro de 4,7%; aumento do coeficiente de radiação em 66,3%; e BW reduzida em 61%. Portanto, conclui-se que a curvatura pode gerar benefícios para a operação do equipamento, entretanto, assim como nas medições da antena PES, há um limiar de estresse mecânico da antena o qual não pode ser ultrapassado. Adicionalmente, conforme mencionado para a antena PES, o alongamento do tecido provoca uma alteração em sua permissividade dielétrica, impactando diretamente nos resultados apresentados para as etapas do ambiente real que possuem as curvaturas. Todavia, ao analisar o comportamento de cada curva no gráfico $S(1,1)$, observou-se uma similaridade nas respostas.

Por fim, analisando as medições reais das antenas PES e antenas CO, evidenciadas nas Figuras 11 e 13, assim como nas Tabelas 3 e 5, respectivamente, constata-se um comportamento semelhante nas curvas de desempenho. Numa análise dos arqueamentos de 150 mm, 100 mm e 75 mm, com base no estado padrão para ambas as antenas, observam-se as seguintes variações, demonstradas na Tabela 6.

Tabela 6. Variações em porcentagens das aplicações de curvatura com base no estado plano para as antenas PES e CO. (Autoria própria)

	Parâmetros	Estado plano	Curvatura 150 mm (%)	Curvatura 100 mm (%)	Curvatura 75 mm (%)
Antena PES	f_r	Referência	3,7	2,9	5,7
	$S(1,1)$	Referência	26,6	16,4	49,2
	BW	Referência	68,0	59,0	66,3
Antena CO	f_r	Referência	2,3	1,47	3,5
	$S(1,1)$	Referência	18,7	54,8	47,8
	BW	Referência	44,2	58,6	47,8

Ao examinar os valores numéricos da Tabela 6, nota-se uma constância nessas variações, com uma ligeira vantagem para a antena CO nos estados de 150 mm e 75 mm. Nesses casos, ela exibe alterações menores em relação à referência quando comparada à antena PES.

Ressalta-se que as margens de erro apresentadas na Tabela 6 podem ser atribuídas às limitações do equipamento de medição utilizado. Por se tratar de um instrumento de baixo custo, o mesmo apresentou instabilidade e foi suscetível a interferências durante a coleta de dados, o que pode ter influenciado a precisão dos resultados.

3. CONCLUSÕES

Ao fim, com base em toda essa pesquisa realizada, foi possível analisar a teoria acerca das antenas de microfita, se adentrando nas implementações têxteis e flexíveis. Como também, foi concebível observar o comportamento destes aparelhos no ambiente simulado e no real, assim como examiná-los quando são submetidos a esforços mecânicos. A propósito, foi possível observar a instabilidade nos parâmetros quando aplicado essa deformação estrutural, gerando variações suaves ou mais abruptas, a depender do material utilizado e do grau de envergadura posto ao equipamento. Tais respostas podem gerar problemáticas quando saem da zona de bom desempenho da antena, que foi o caso da antena CO no espaço simulado, onde sua atenuação ficou superior aos – 10 dB exigidos, tornando-a inadequada. Por outro lado, comparando as duas

antenas no espaço de medição, evidenciado na Tabela 6, nota-se uma variação mais suave da antena CO quando comparada à antena PES. De forma geral, a antena CO evidenciou um desempenho superior tanto sob o menor estresse físico aplicado (curvatura de 150 mm) quanto sob o maior (curvatura de 75 mm), mantendo-se mais estável nos três parâmetros estudados. Na curvatura de 100 mm ainda há uma vantagem da antena CO sobre a PES em relação à frequência, porém, a variação do coeficiente de reflexão apresentou-se mais constante na antena PES. Por fim, é concluído que apesar do desempenho melhor da antena de material natural, ambas ainda exibem um bom comportamento quando exigidas a curvaturas em suas estruturas. Como perspectiva futura, planeja-se investigar a variação da permissividade dielétrica dos materiais sob deformação por tração. O objetivo é analisar e quantificar essa alteração, para que esse fator possa ser reproduzido no ambiente computacional. Para isso, também é planejado o uso de um equipamento de medição mais preciso, que possibilite obter os dados reais com menores taxas de erros devido a instabilidades do sistema. Todavia, os resultados obtidos abrem caminho para futuras aplicações destes equipamentos em superfícies não planas, que exijam o envergamento das antenas, o qual é muito requerido, por exemplo, no setor médico, em sistemas WBAN (*Wireless Body Area Network*), que se torna uma ferramenta inovadora para a comunicação entre o paciente e o médico.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JAMES, J. R.; HALL, P. S.; WOOD, C. Front Matter. Institution of Engineering and Technology eBooks, 1 jan. 1981.
- [2] POZAR, D. M. Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 1, p. 79–91, 1992.
- [3] J. Howell, "Microstrip antennas," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 1, pp. 90–93, January 1975, doi: 10.1109/TAP.1975.1141009.
- [4] KIRTANIA, S. G. et al. Flexible Antennas: A Review. *Micromachines*, v. 11, n. 9, p. 847, 11 set. 2020.
- [5] SILVA, J. V. M. DE O.; HOLANDA, S. M.; ANDRADE, H. D. et al. Estudo de antenas com substratos flexíveis biodegradáveis para aplicações em 5G. Disponível em: <<https://biblioteca.sbrrt.org.br/articles/4576>>.
- [6] SILVA, J. V. M de O.; HOLANDA, S. M.; SILVA, I. B. T. et al. et al. Impactos nos parâmetros de uma antena de microfita flexível e têxtil quando submetida a diferentes curvaturas em sua estrutura. *Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar ECOP/UFERSA* (ISSN 2526-7574), v. 1, n. 7, 2023.
- [7] Anais do 21º Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.sbmo.org.br/sbmo/imagens_sistema/be2a503d7c1338a7eb3b0ec164586982.pdf>. Pág. 433-434.
- [8] Anais do 21º Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.sbmo.org.br/sbmo/imagens_sistema/be2a503d7c1338a7eb3b0ec164586982.pdf>. Pág. 440 – 441.
- [9] SALONEN, P. et al. Effect of textile materials on wearable antenna performance: a case study of GPS antennas. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 20 jun. 2004.
- [10] ŽAN KELBIČ. Tridens. Disponível em: <<https://tridenstechnology.com/pt/geracoes-de-redes-moveis/>>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- [11] EZZULDDIN, S. K.; HASAN, S. O.; AMEEN, M. M. Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 116, p. 102497, abr. 2022.
- [12] KAEIB, A. F.; SHEBANI, N. M.; ZAREK, A. R. Design and Analysis of a Slotted Microstrip Antenna for 5G Communication Networks at 28 GHz. 24 mar. 2019.
- [13] HOLANDA, Samanta Mesquita de. Estudo de metamaterial têxtil para aplicação em substrato de antenas planares para tecnologia WBAN. 2021. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.
- [14] ALA-LAURINATO J. et al. Reflection coefficient method for antenna radiation pattern measurements. 2015 European Radar Conference (EuRAD), Paris, France, 2015, pp. 285-288, doi: 10.1109/EuRAD.2015.7346293.