



Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Engenharias - CE
Curso de Engenharia Elétrica

Análise dos parâmetros de reflexão de uma antena de microfita com variadas dimensões de substrato para aplicações em 5G

Marcelo Nunes Silva^[1], Isaac Barros Tavares da Silva^[2]

^[1]Universidade Federal Rural do Semi-Árido; marcelonunes.genoa@gmail.com

^[2]Universidade Federal Rural do Semi-Árido; isaac.barros@ufersa.edu.br

Resumo: O estudo de antenas de microfita evoluiu muito nos últimos anos, suas características de construção simples, baixo custo e versatilidade em termos de frequência de ressonância, polarização e impedância, fazem que sejam muito utilizadas em sistemas de comunicação. O projetista de uma antena de microfita precisa ter consciência do efeito causado na performance da antena ao utilizar diferentes dimensões de largura e comprimento do substrato, e como a mudança dessas variáveis afeta os parâmetros de desempenho. Dessa forma, neste trabalho é feito um estudo de comparação entre antenas de microfita na frequência de 3,5 GHz, com dielétrico de FR-4, ao variar o comprimento e largura de substratos retangulares além do raio em substratos cilíndricos, utilizando *patch* retangular e circular. Para simulação foi utilizado o software ANSYS HFSS®. Como resultados foram gerados os comportamentos do ganho, perda de retorno, VSWR, frequência de ressonância e eficiência de radiação, sendo notabilizados um aumento de 63,15% no ganho da situação de substrato cilíndrico e *patch* circular, e ainda diminuição de 61,78% na perda de retorno da situação com substrato e *patch* retangulares.

Palavras-chave: Antena de microfita; variação do substrato; aplicações 5g.

1. INTRODUÇÃO

Antenas de microfita têm recebido considerável atenção a partir da década de 1970, quando o interesse foi renovado após a primeira criação em 1953 por Deschamps. Com a necessidade crescente de dispositivos de tamanho reduzido e com bom desempenho, este tipo de antena recebe interesse progressivo na atualidade. São ideais para diversas aplicações, principalmente por serem moldáveis a superfícies planas e não-planas, construção simples e de baixo custo com a tecnologia de circuitos impressos, mecanicamente robustas quando montadas em superfícies rígidas e muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização e impedância [1]. São compostas basicamente pela fita metálica (*patch*), o material dielétrico (substrato) e o plano de terra.

O efeito da mudança do material dielétrico na performance da antena e miniaturização de dispositivos, mantendo a frequência de ressonância, é uma questão consolidada na literatura científica do tema, conforme visto em [2], [3] e [4], onde são referidas análises dos resultados experimentados ao variar a permissividade relativa. De maneira análoga, faz-se interessante realizar uma análise dos parâmetros das antenas de microfita ao variar outras características construtivas da mesma, como as dimensões de largura, comprimento e diâmetro do substrato.

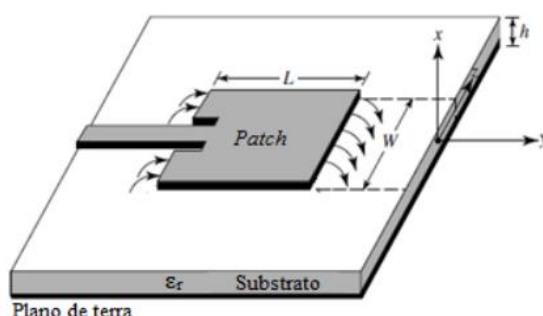
Dessa forma, neste trabalho é realizado um estudo comparativo dos parâmetros de desempenho de uma antena de microfita quando esta tem as dimensões do substrato variadas. Para acrescentar ao estudo, são empregadas as variações em antenas de *patch* retangular e circular, e com substratos retangular e cilíndrico, e dessa maneira estabelecer considerações sobre as mudanças.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Composição básica

As antenas de microfita são constituídas por uma fita metálica (*patch*) de espessura muito menor do que o comprimento de onda no espaço livre ($t \ll \lambda_0$), posicionada sobre uma camada de material dielétrico (substrato) de espessura h correspondente a uma pequena fração do comprimento de onda ($h \ll \lambda_0$), usualmente entre 0,003 e 0,005 vezes o comprimento de onda no espaço livre ($0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,005\lambda_0$), firmados sobre um plano de terra, como mostrado na Figura 1. O material dielétrico de espessura h , possui geralmente uma permissividade relativa $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, e tanto o material utilizado, quanto suas dimensões físicas influenciam no comportamento da antena [1].

Figura 1 – Antena de microfita.



Fonte: BALANIS, 2005.

O *patch* pode ter vários formatos, como quadrado, retangular, circular ou de qualquer outra forma. Os cálculos e considerações envolvidas na confecção da antena mudam de acordo com o formato de *patch* escolhido pelo projetista. Da mesma maneira, o substrato pode ter diferentes formatos geométricos.

2.2. Alimentação

Há diversos métodos de alimentação para uma antena de microfita, sendo os mais comuns: linha de microfita, sonda coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade. A linha de microfita é uma fita condutora com largura muito menor que a do *patch*, possui fácil fabricação, casamento e modelagem simples [1].

2.3. Parâmetros de desempenho de antenas

Um ponto importante a ser considerado para evitar reflexão do sinal transmitido, ou seja, de maneira que minimize perdas no sinal, é o casamento de impedância. Há diversas técnicas de casamento de impedância na literatura [6], dentre elas a técnica de *inset feed* pode ser destacada. No *inset feed* são inseridas fendas no *patch*, as quais introduzem uma capacitância de junção de maneira a diminuir a impedância de entrada para se aproximar dos 50Ω desejados [5].

A perda de retorno é um parâmetro que visa analisar a performance e características de uma antena, de acordo com Balanis (2005), a perda de retorno é a perda de potência do sinal resultante da reflexão causada em uma interrupção em uma linha de transmissão. Segundo Anderson (1967), a análise de quadripolo é eficiente em circuitos de radiofrequência (RF), e dessa maneira, a matriz de espalhamento está ligada diretamente com a operação das antenas. O parâmetro da matriz de espalhamento do qual é possível obter os valores da perda de retorno é o coeficiente de reflexão $S(1,1)$.

O ganho é uma medida comparativa da capacidade de uma antena em direcionar energia de radiofrequência em uma direção específica. A medida é geralmente apresentada em dB [9].

Quando ocorre descasamento de impedâncias, a potência incidente não é totalmente absorvida pela carga, formando uma onda estacionária. A relação entre o máximo e mínimo valores de amplitude da onda estacionária é conhecida como coeficiente de onda estacionária de tensão (VSWR).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho comparativo é desenvolvido com quatro situações: antena de microfita com substrato e *patch* retangulares, antena de microfita com substrato retangular e *patch* circular, antena de microfita com substrato cilíndrico e *patch* retangular e por fim, antena de microfita com substrato cilíndrico e *patch* circular. Todas as situações foram simuladas utilizando o ANSYS HFSS®, e ainda auxílio do MATLAB para calcular algumas equações.

A frequência de projeto da antena é 3,5 GHz, a qual foi escolhida por ser a principal banda de frequência que a ANATEL irá implementar a tecnologia 5G no Brasil, além de ser preferida em muitos países da América latina e já em atuação na Europa [9].

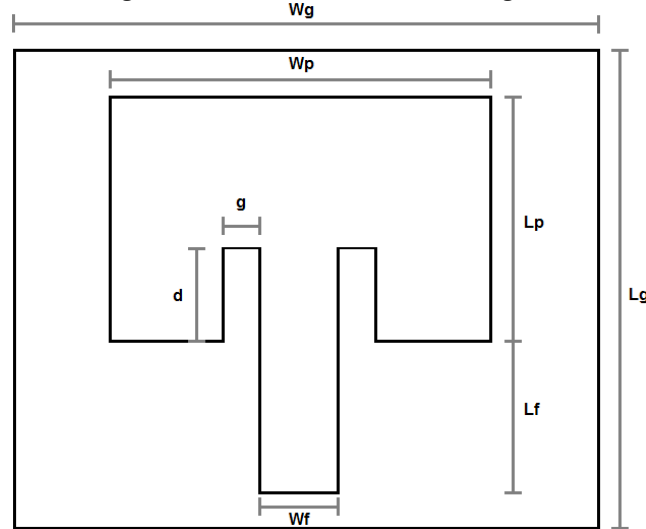
O material dielétrico do substrato é o FR-4, dielétrico composto por fibra de vidro e resina epóxi, conjunto térmico de plástico de alta pressão, ideal para a construção de placas de circuito impresso [2], cujos dados são $\epsilon_r = 4,4$, $\tan \delta = 0,02$ e $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$.

Após a confecção das antenas nas quatro situações, foi variado o valor de comprimento e largura nas situações de substrato retangular e nas antenas com substrato cilíndrico foi variado o raio.

3.1. Substrato e patch retangulares

A discriminação das dimensões da antena é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Dimensões da antena retangular.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para determinação da espessura do substrato foi utilizada a equação 1, presente em Matin A. [5].

$$h \geq 0,06 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Pelo equacionamento de Balanis [1]:

$$W_p = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-0,5} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W_p}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W_p}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

$$L_{ef} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (5)$$

$$L_p = L_{ef} - 2\Delta L \quad (6)$$

$$d = \left(\frac{L_p}{\pi}\right) \left(\cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z}{R_{in}}} \right) \right) \quad (7)$$

É seguido o equacionamento presente em [1] para a determinação da condutância G e susceptância B , considerando uma impedância de 50Ω e utilizando o MATLAB para calcular. Dessa forma, a largura W_f da linha de microfita é calculado segundo Liang J. [10].

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ (B - 1 - \ln(2B - 1)) + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \ln(B - 1) + \left(\frac{0,2379}{\epsilon_r} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

Já o comprimento do gap g é dado segundo Matin A. [5].

$$g = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ref}}} \frac{4,65 \times 10^{-8}}{f} \quad (9)$$

De Nakar P. [11] e Obot A. [12], temos os valores mínimos do substrato L_g e W_g , além do comprimento da linha de microfita L_f .

$$L_g min = 6h + L_p \quad (10)$$

$$W_g min = 6h + W_p \quad (11)$$

$$L_f = 3h \quad (12)$$

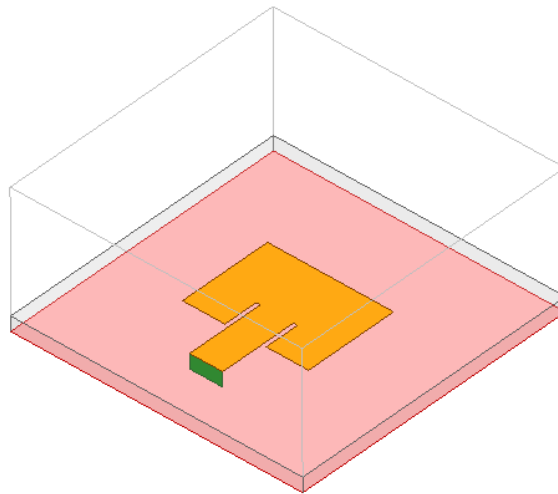
Os resultados das dimensões calculadas podem ser vistos na Tabela 1, onde o valor de h calculado é o valor mínimo, assim como os casos de $W_g min$ e $L_g min$.

TABELA 1. DIMENSÕES CALCULADAS E SIMULADAS PARA PATCH RETANGULAR.

Parâmetros	Calculado (mm)	Simulado (mm)
h	2,45	3,00
W_p	26,10	25,90
L_p	19,30	19,40
$W_g min$	44,10	60,00
$L_g min$	37,20	60,00
W_f	5,60	6,80
L_f	9,00	9,00
d	7,13	7,13
g	1,40	0,85

Como são utilizadas muitas aproximações nos cálculos, os resultados gráficos da antena não atingiram exatamente os valores de frequência, dessa forma os dados simulados sofrem alguns ajustes. A antena simulada pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Antena com substrato e *patch* retangulares.



Fonte: Autoria própria, 2020.

3.2. Substrato retangular e *patch* circular

Os cálculos para as dimensões da linha de microfita, do *gap* e do *inset feed* utilizados para o caso anterior valem para o caso de *patch* circular, é necessário somente determinar o raio da circunferência. De acordo com Hasan Z. [13] e Kwaha B. [14], o raio a do *patch* pode ser calculado pela Equação 13,

$$a = \frac{F}{\sqrt{\left\{1 + \frac{2h}{\pi F \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}}} \quad (13)$$

onde $F = \frac{8,791 \times 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}}$.

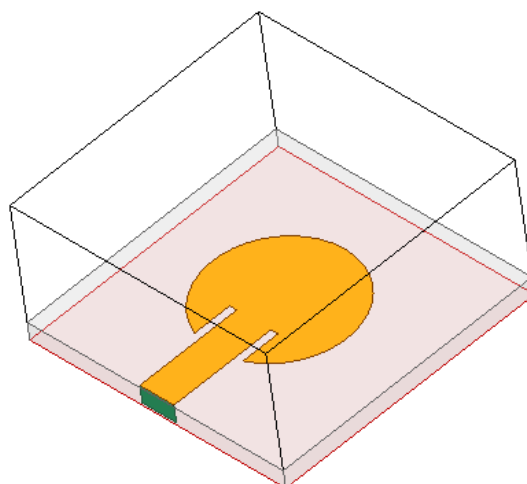
As dimensões mínimas da largura W_g e comprimento L_g do substrato são calculadas a partir de [13]. A Tabela 2 mostra os resultados dos cálculos, enquanto a Figura 4 mostra a antena utilizada na simulação.

$$W_g \min = L_g \min = 4a \quad (14)$$

TABELA 2. DIMENSÕES CALCULADAS E SIMULADAS PARA PATCH CIRCULAR.

Parâmetros	Calculado (mm)	Simulado (mm)
h	2,45	3,00
a	11,26	11,80
$W_g \min$	45,00	45,00
$L_g \min$	45,00	45,00
W_f	5,60	6,00
L_f	9,00	10,40
d	7,13	7,13
g	1,40	1,20

Figura 4 – Antena com substrato retangular e *patch* circular.

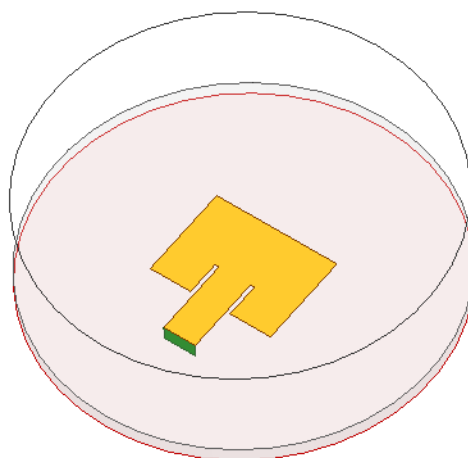


Fonte: Autoria própria, 2020.

3.3. Substrato cilíndrico e *patch* retangular

A antena de *patch* retangular calculada na primeira situação foi simulado neste caso com um substrato cilíndrico. O raio do cilindro será chamado de r . A Figura 5 mostra a antena simulada.

Figura 5 – Antena com substrato cilíndrico e *patch* retangular.

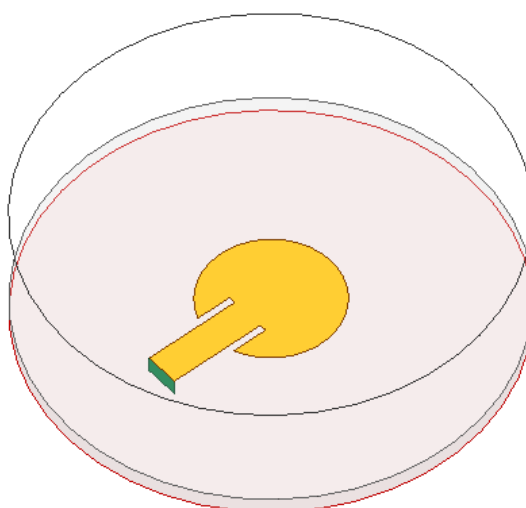


Fonte: Autoria própria, 2020.

3.4. Substrato cilíndrico e *patch* circular

A antena de *patch* circular calculada na segunda situação foi simulada neste caso com um substrato cilíndrico. O raio do cilindro é r . A Figura 6 mostra a antena simulada.

Figura 6 – Antena com substrato retangular e *patch* circular.



Fonte: Autoria própria, 2020.

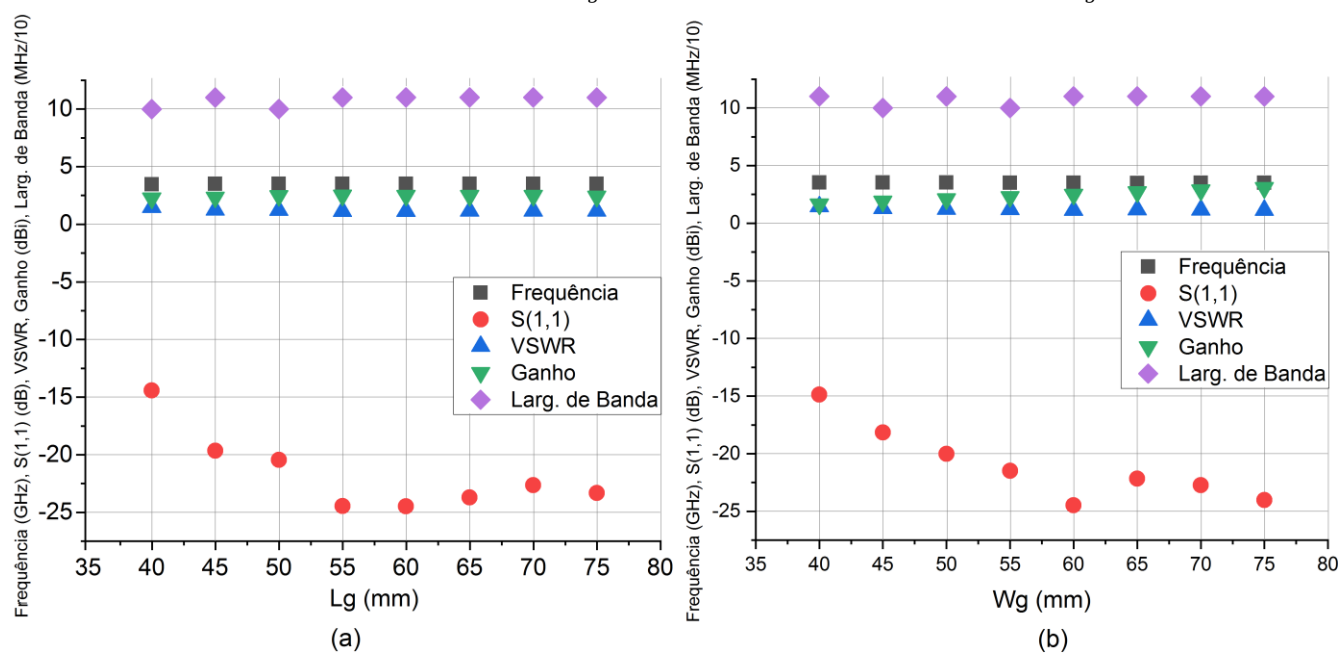
4. RESULTADOS

4.1. Situação 1: substrato e patch retangulares

Para variar as dimensões do substrato em todas as situações descritas neste trabalho, manteve-se fixo o valor de $h = 3 \text{ mm}$ uma vez que foi variável de entrada utilizada para o dimensionamento das antenas em todos os casos, sendo o mínimo calculado de 2,45 mm.

A Figura 7 (a) e (b) demonstra graficamente o comportamento dos parâmetros de largura de banda, frequência de ressonância, VSWR, ganho e $S(1,1)$ para a variação de comprimento e largura do substrato, estes dados podem ainda ser verificados nas Tabelas 3 e 4.

Figura 7 – (a) Parâmetros pelo comprimento L_g na situação 1. (b) Parâmetros pela largura W_g na situação 1.



Fonte: Autoria própria, 2020.

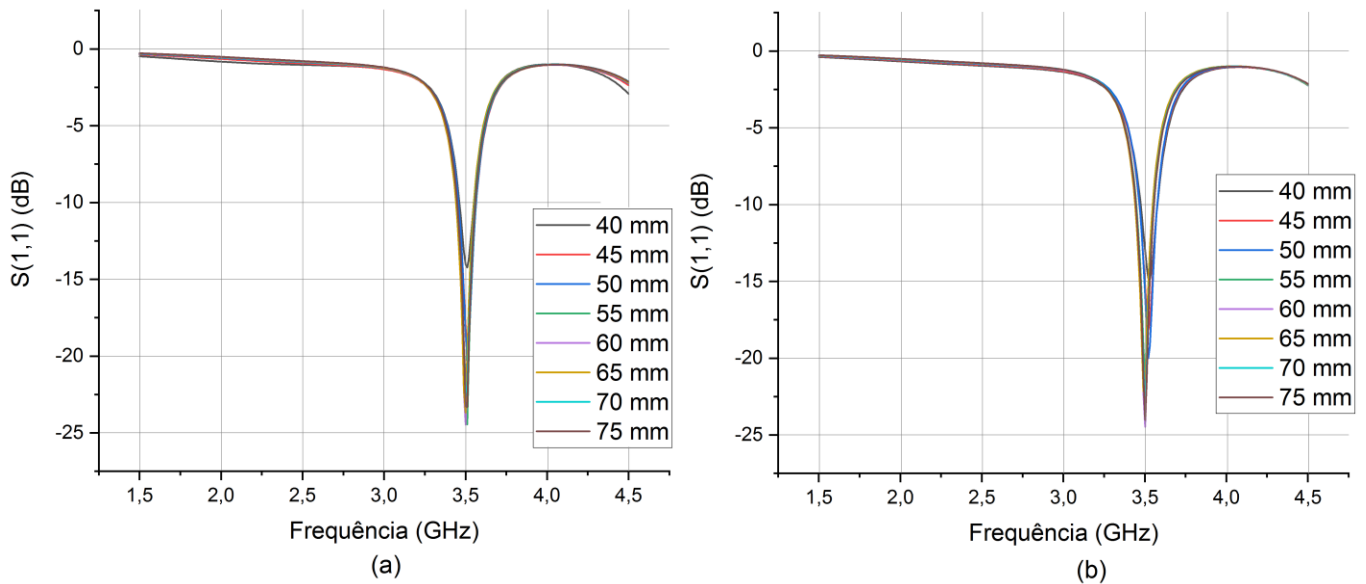
TABELA 3. PARÂMETROS DA ANTENA COM SUBSTRATO E PATCH RETANGULARES AO VARIAR L_g .

L_g (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
40	3,47	-14,4084	1,4702	2,249	100	67,64
45	3,51	-19,6519	1,2324	2,3323	110	62,88
50	3,51	-20,4436	1,21	2,472	100	62,04
55	3,51	-24,4512	1,1274	2,5039	110	61,23
60	3,5	-24,472	1,1271	2,4956	110	60,30
65	3,5	-23,6965	1,1398	2,4787	110	60,00
70	3,5	-22,627	1,1596	2,478	110	60,00
75	3,51	-23,31	1,1465	2,4169	110	59,76

TABELA 4. PARÂMETROS DA ANTENA COM SUBSTRATO E PATCH RETANGULARES AO VARIAR W_g .

W_g (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
40	3,53	-14,8813	1,4398	1,6419	110	64,29
45	3,52	-18,162	1,282	1,8931	100	61,99
50	3,52	-20,0139	1,2218	2,1004	110	60,20
55	3,5	-21,4904	1,184	2,2895	100	59,64
60	3,5	-24,472	1,1271	2,4952	110	60,30
65	3,49	-22,1653	1,169	2,7055	110	60,78
70	3,5	-22,7223	1,1577	2,8653	110	61,30
75	3,5	-24,025	1,1343	3,0694	110	62,08

Para analisar o comportamento da perda de retorno, são mostrados na Figura 8 as curvas de $S(1,1)$ para as dimensões variadas.

Figura 8 – (a) $S(1,1)$ variando o comprimento L_g na situação 1. (b) $S(1,1)$ variando a largura W_g .

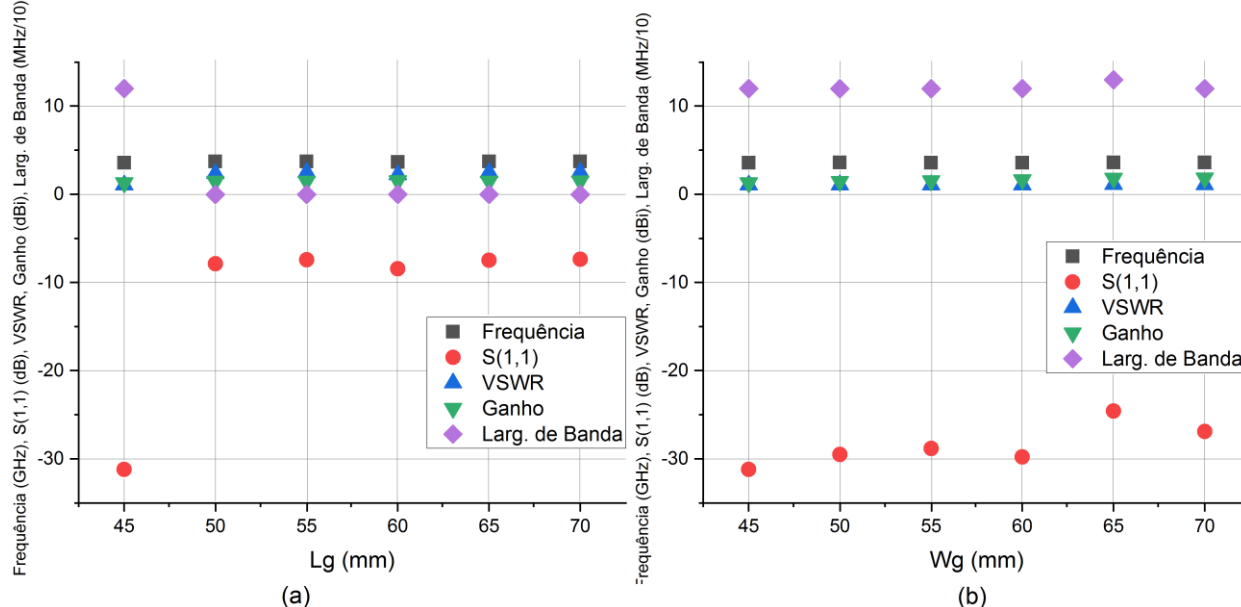
Fonte: Autoria própria, 2020.

A análise é feita variando L_g mantendo $W_g = 60$ mm, e variando W_g mantendo $L_g = 60$ mm, ambos devido ao cálculo da antena em 3.1. Nota-se que a frequência de ressonância tem uma variação pequena (abaixo de 1,50%) conforme se aumenta as dimensões laterais, o mesmo acontece com a largura de banda. Já a perda de retorno possui 61,78% de diminuição no caso da variação de L_g e 61,45% na variação de W_g . O ganho tem aumento de 7,46% na variação de L_g e 86,92% na variação de W_g . A eficiência de radiação cai em pontos percentuais em ambos os casos, sendo menos 7,88 para L_g e 2,21 em W_g .

4.2. Situação 2: substrato retangular e patch circular

Neste caso, o comportamento dos parâmetros obtidos estão na Figura 9 (a) e (b), na qual se demonstra graficamente os parâmetros de largura de banda, frequência de ressonância, VSWR, ganho e S(1,1) para a variação de comprimento e largura do substrato, estes dados podem ainda ser verificados nas Tabelas 5 e 6. Já a Figura 10 mostra as curvas de S(1,1) nesta configuração.

Figura 9 – (a) Parâmetros pelo comprimento L_g na situação 2. (b) Parâmetros pela largura W_g na situação 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

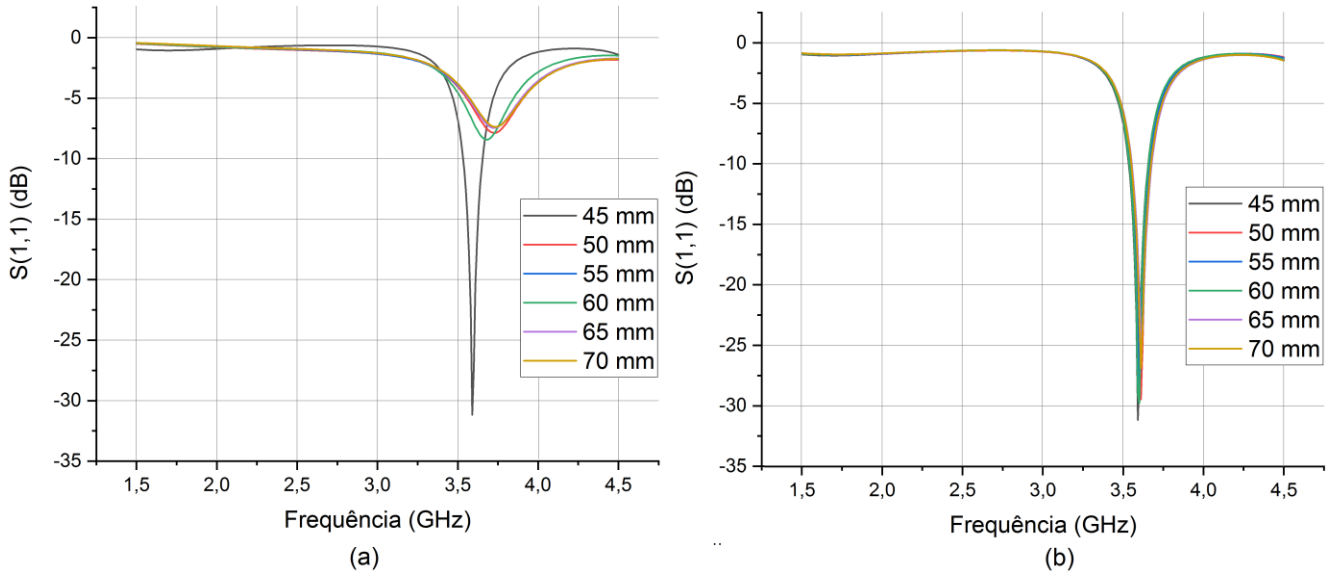
TABELA 5. PARÂMETROS DA ANTENA COM SUBSTRATO RETANGULAR E PATCH CIRCULAR AO VARIAR L_g .

L_g (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
45	3,59	-31,1816	1,0568	1,3182	120	61,43
50	3,73	-7,8671	2,3571	1,48	-	61,22
55	3,73	-7,397	2,489	1,495	-	59,54
60	3,68	-8,43	2,22	1,54	-	59,72
65	3,73	-7,456	2,471	1,4922	-	58,72
70	3,74	-7,366	2,498	1,517	-	59,21

TABELA 6. PARÂMETROS DA ANTENA COM SUBSTRATO RETANGULAR E PATCH CIRCULAR AO VARIAR W_g .

W_g (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
45	3,59	-31,1816	1,0568	1,3182	120	61,43
50	3,61	-29,4852	1,0694	1,4661	120	61,31
55	3,6	-28,8147	1,0752	1,548	120	60,57
60	3,6	-29,7809	1,067	1,6721	120	60,61
65	3,61	-24,5744	1,1255	1,8200	130	61,70
70	3,61	-26,8825	1,095	1,853	120	60,74

Figura 10 – (a) $S(1,1)$ variando o comprimento L_g na situação 2. (b) $S(1,1)$ variando a largura W_g .



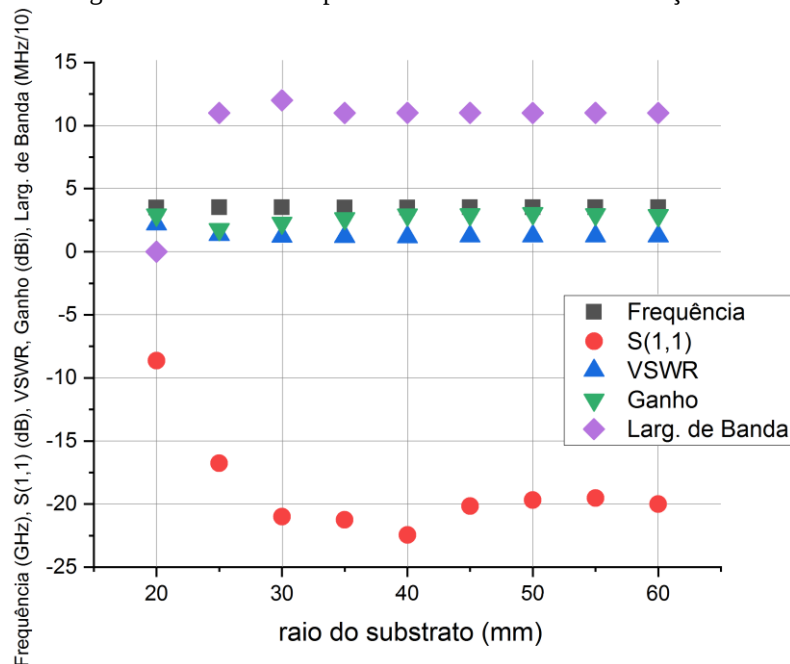
Fonte: Autoria própria, 2020.

Neste caso, 45 mm foi a dimensão mínima calculada para o substrato. Variando L_g ao manter $W_g = 45 \text{ mm}$ constante devido ao cálculo do tópico 3.2, notamos que a antena ressoa somente para o mínimo comprimento simulado, de modo que a eficiência de radiação diminui com o aumento de L_g . Ao alterar o valor de W_g mantendo $L_g = 45 \text{ mm}$, percebemos pouca variação na frequência de ressonância e as curvas $S(1,1)$ são sobrepostas na frequência. O ganho, no caso da variação de W_g , sofre uma considerável variação crescente de 40,57%.

4.3. Situação 3: substrato cilíndrico e patch retangular

Nesta situação, o raio r do substrato cilíndrico foi variado, na Figura 11 demonstra-se graficamente o comportamento dos parâmetros de largura de banda, frequência de ressonância, VSWR, ganho e $S(1,1)$ para a variação do raio, estes dados podem ainda ser verificados na Tabela 7. As curvas de $S(1,1)$ para os variados comprimentos de raio simulados são mostradas na Figura 12.

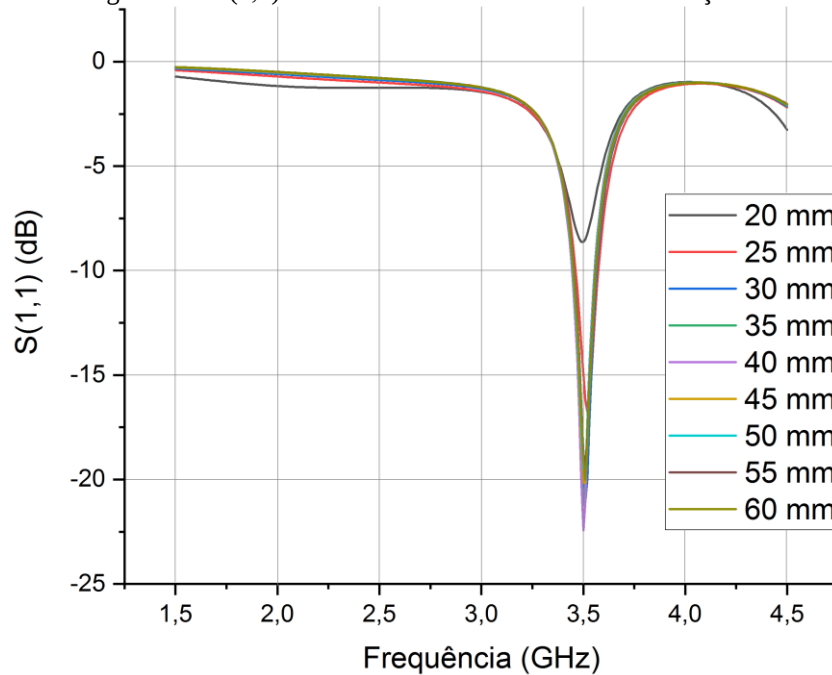
Figura 11 – Parâmetros pelo raio do substrato r na situação 3.



Fonte: Autoria própria, 2020.

TABELA 7. PARÂMETROS COM SUBSTRATO CILÍNDRICO E PATCH RETANGULAR AO VARIAR O RAIOS r .

r (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
20	3,5	-8,626	2,177	2,919	0	61,83
25	3,52	-16,759	1,34	1,7754	110	63,29
30	3,51	-20,991	1,196	2,271	120	61,10
35	3,5	-21,252	1,19	2,637	110	60,60
40	3,5	-22,4448	1,1633	2,9191	110	61,83
45	3,51	-20,167	1,2175	2,959	110	61,44
50	3,51	-19,686	1,2314	3,035	110	62,74
55	3,51	-19,5154	1,2365	2,9496	110	62,66
60	3,51	-20,011	1,222	2,879	110	62,56

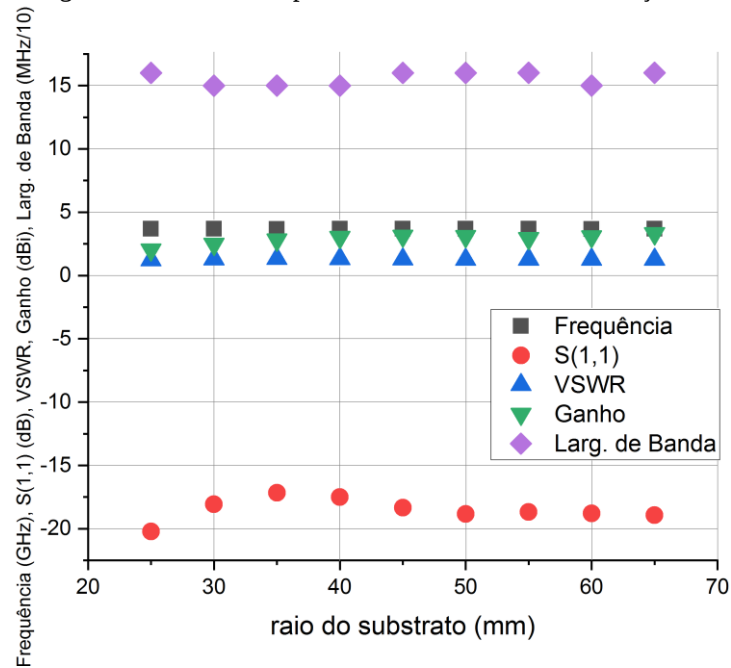
Figura 12 – $S(1,1)$ variando o raio do substrato r na situação 3.

Fonte: Autoria própria, 2020.

O comportamento de $S(1,1)$ neste caso é semelhante à situação 1 com patch retangular, tem seu valor decrescente com diminuição de 19,40% conforme aumenta-se o raio do substrato. Da mesma maneira que o primeiro caso, a frequência de ressonância permanece praticamente constante (variação abaixo de 1,00%), assim como a largura de banda. No ganho, em relação ao primeiro comprimento o qual ocorre ressonância, percebe-se aumento de 62,16%.

4.4. Situação 4: substrato cilíndrico e patch circular

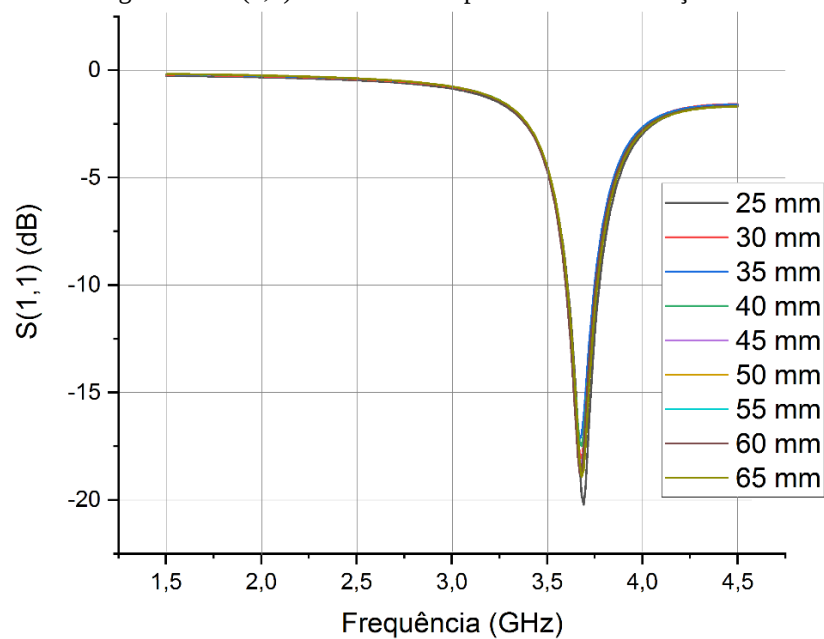
Nesta situação, o raio r do substrato cilíndrico foi variado, na Figura 13 demonstra-se graficamente o comportamento dos parâmetros de largura de banda, frequência de ressonância, VSWR, ganho e $S(1,1)$ para a variação do raio, estes dados podem ainda ser verificados na Tabela 8. As curvas de $S(1,1)$ para os variados comprimentos de raio simulados são mostradas na Figura 14.

Figura 13 – Parâmetros pelo raio do substrato r na situação 4.

Fonte: Autoria própria, 2020.

TABELA 8. PARÂMETROS COM SUBSTRATO CILÍNDRICO E PATCH CIRCULAR AO VARIAR O RAIO r .

r (mm)	f_r (GHz)	Perda de retorno (dB)	VSWR	Ganho (dBi)	Largura de banda (MHz)	Eficiência de radiação (%)
25	3,69	-20,2201	1,2161	2,0288	160	65,40
30	3,68	-18,0698	1,2854	2,4781	150	63,53
35	3,67	-17,1526	1,3223	2,815	150	63,66
40	3,68	-17,5066	1,3075	3,0205	150	64,35
45	3,68	-18,3462	1,2752	3,1214	160	66,24
50	3,68	-18,8433	1,258	3,0865	160	66,82
55	3,68	-18,67	1,2638	2,9326	160	66,35
60	3,67	-18,781	1,26	3,08	150	66,63
65	3,68	-18,929	1,2551	3,31	160	66,73

Figura 14 – $S(1,1)$ variando o comprimento r na situação 4.

Fonte: Autoria própria, 2020.

A simulação é feita com um valor mínimo de 25 mm pois é o menor raio o qual a antena não passa do substrato. De maneira semelhante à situação 2 com patch circular, o ganho da antena tem considerável aumento à medida que se acresce as dimensões do substrato, crescimento de 63,15% na relação entre o primeiro e último raio simulado. Ainda em consonância com a situação 2 na variação de W_g , a perda de retorno deste caso manteve-se com consistência em valores abaixo de -10 dB ao se aumentar o valor do raio r . A frequência de ressonância, VSWR e largura de banda não possuem mudanças significantes. A eficiência de radiação diminuiu em 1,33 pontos percentuais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram consideradas diferentes situações em que são empregados formatos de *patch* e substrato comuns no design de antenas de microfita. Os principais parâmetros afetados são ganho, perda de retorno e eficiência de radiação. É possível notar algumas semelhanças no comportamento dos parâmetros de antenas com *patches* iguais: no caso de *patch* retangular, o $S(1,1)$ possui valor determinado com substrato de menor dimensão e conforme se aumenta o substrato, a perda de retorno diminui e alcança certa estabilidade até comprimentos simulados, como visto na situação 1 uma diminuição de 61,78% e de 19,40% na situação 3. No caso de *patch* circular, o acréscimo nas dimensões laterais do substrato produz aumento significativo no ganho da antena, 40,57% na situação 2 e 63,15% na situação 4. O parâmetro de $S(1,1)$, nos casos de *patch* circular com exceção da dimensão onde cresce a linha de microfita na situação 2, possui valor abaixo de -10 dB sem grandes variações. Nos casos de substrato retangular, a eficiência de radiação diminui com o aumento das dimensões (7,88 e 2,21 pontos percentuais a menos na situação 1 e 0,69 na situação 2), já em casos de substrato cilíndrico a eficiência de radiação tem leve aumento (0,73 na situação 3 e 1,33 na situação 4). Em todos os casos, não houve alterações significativas na frequência de ressonância e na largura de banda, excetuando as situações em que a antena deixa de ressoar.

REFERÊNCIAS

- [1] Balanis, C. A.; *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Khan, A.; Nema, R. Analysis of Five Different Dielectric Substrates on Microstrip Patch Antenna. *Internet Journal of Computer Applications* 2012, Volume-55, p-8.
- [3] Jain, K.; Gupta, K. Different Substrates Use in Microstrip Patch Antenna-A Survey. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 2014, Volume 3, p-2.
- [4] Mane, P.; Patil, S. A.; Dhanawade, P. C. Comparative Study of Microstrip Antenna for Different Substrate Material at Different Frequencies. *IJEERT* 2014, Volume 2, p-7.
- [5] Matin, M. A.; Sayeed, A. I. A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna. *WSEAS Transactions on Communications* 2010, Volume 9, p-10.
- [6] D. M. Pozar, and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas, the Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*. IEEE Press, New York, 1995.
- [7] ANDERSON, D. L. S-Parameter Theory and Applications. *Hewlett-Packard Journal*. 1967.
- [8] Misra, G.; Agarwal, A.; Agarwal, K. Design and Performance Evaluation of Microstrip Antenna for Ultra-Wideband Applications Using Microstrip Feed. *AJEE* 2015, Volume 3, p-6.
- [9] Tudo Celular. Disponível em: <https://www.tudocelular.com/planos/noticias/n164331/5g-faixa-3-5-ghz-fundamental-america-latina.html> (acesso em 27/11/2020).
- [10] J. Liang, C. C.; Chiau, X. C.; Parini C. G.. Printed Circular Disc Monopole Antenna for Ultra Wideband Applications. *Electronics Letters* 2004, Volume 40, pp. 1246 – 1247.
- [11] Nakar, P. S. Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for Use in Wireless/Cellular Devices. Dissertação de mestrado, Florida State University, Tallahassee, 2004.
- [12] Obot, A.; Igwe, G.; Udofia, K. Design and Simulation of Rectangular Microstrip Antenna Arrays for Improved Gain Performance. *International Journal of Network and Communications* 2019, Volume 9, p. 73-81.
- [13] Hasan, Z.; Zaman, A.; Ahmed, A. Design and Fabrication of a Circular Microstrip Patch Antenna for GPS Application. *International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT)* 2017, Volume 8, p-4.
- [14] Kwaha, B. J.; Inyang, O. N.; Amalu, P. The Circular Microstrip Patch Antenna – Design and Implementation. *International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS)* 2011, Volume 8, p-10.