



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS PAU DOS FERROS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO VICTOR DE FREITAS

ANÁLISE DE RESSOADORES EM ANTENAS DE MICROFITA

PAU DOS FERROS - RN
2018

JOÃO VICTOR DE FREITAS

ANÁLISE DE RESSOADORES EM ANTENAS DE MICROFITA

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Pau dos Ferros para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº. Dr. Otávio Paulino Lavor - UFERSA

PAU DOS FERROS - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F866a Freitas, João Victor de.
Análise de Ressonadores em Antenas de Microfita
/ João Victor de Freitas. - 2018.
41 f. : il.

Orientador: Otávio Paulino Lavor.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Antenas de Microfita. 2. Ressonadores. 3.
Patch Circular. 4. Perda de Retorno. 5. Diagrama
de Radiação. I. Lavor, Otávio Paulino, orient. II.
Título.

JOÃO VICTOR DE FREITAS

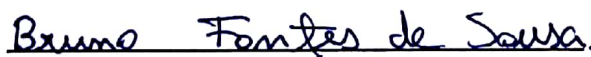
ANÁLISE DE RESSOADORES EM ANTENAS DE MICROFITA

Monografia apresentada no Campus Pau dos Ferros para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

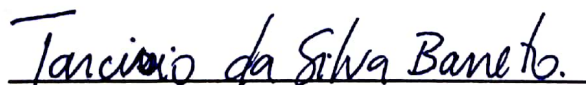
Aprovado em: 20 de Agosto de 2018:



Profº. Dr. Otávio Paulino Lavor - UFERSA
Orientador



Profº. Me. Bruno Fontes de Sousa - UFERSA
Membro da Banca



Profº. Me. Tarcísio da Silva Barreto - UFERSA
Membro da Banca

PAU DOS FERROS - RN
2018

*Todas as palavras aqui escritas eu dedico para todas as pessoas que são importantes para mim
e para as que me tem como importante em sua vida.*

AGRADECIMENTOS

Durante estes dois anos que passei na UFERSA campus Pau dos Ferros fiz muitas amizades que pretendo levar para a vida toda, sendo assim eu gostaria inicialmente agradecer a Todas as pessoas que a UFERSA me permitiu conhecer, desde alunos à docentes. São muitos para poder citar o nome, porém, irei citar o nome de algumas aqui. Inicialmente ao meu orientador, que também é um amigo e que além de ter me orientado neste trabalho, confiou em mim e me incentivou desde os meus primeiros dias na UFERSA campus Pau dos Ferros, sem ele não teria aprendido tudo que consegui aprender, tanto no meio acadêmico quanto no meio pessoal. A uma amiga muito especial para mim que a vida em Pau dos Ferros me presenteou Thalyta Monteiro, por todas as inúmeras conversas e pela companhia em diversos momentos, felizes e tristes. Analine, Heloisa e Denise, que já foram companheiras em noites de estudo, a meu amigo e colega "Paulin" pelas diversas conversas que tivemos. Aos meus companheiros de casa, da república dos estudantes de Iracema em Pau dos Ferros, André, Bruno José, Carlos Italo, Henrique, José Victor, Etienne, Chaguinha e os outros membros da casa. Os meus professores que tive na UFERSA, que além de professores se tornaram amigos, em especial Clecida, Diego, Clawsio, Mônica, Otávio, Hidalyn, Ernandes, Segundo Gurgel, Pedro, Cecílio, Bruno Fontes, Paulo Gustavo, Shirlene, Patrick, Glaydson, Josy, Tricia e Marco Diego. A Patrick e a Cibely, por me fornecerem o modelo em latex usado para escrever este trabalho e me ajudarem a implementar os códigos em latex e numéricos utilizados aqui. Aos professores, Pedro, Cecílio e Otávio, por terem aceitado ofertar as disciplinas eletivas fora da sua carga horária, que são necessárias para meu ingresso no segundo ciclo do curso. Ao professor Bruno Fontes, por todo o apoio desde o primeiro período como um dos meus primeiros professores na UFERSA e pela participação na banca. Ao professor Tarcísio da Silva Barreto, pela ajuda técnica na medição dos parâmetros da antena e pela participação na banca mesmo com a distância. O meu professor do ensino médio Douglas de Holanda Moraes, por ter me incentivado desde o ensino médio a estudar e fazer mais do que se espera. A uma amiga muito importante para mim que o ensino médio me permitiu conhecer, Yasmin, pelas conversas e conselhos sobre a vida. Os motoristas do ônibus da UFERSA, Celio, Tales, Odivaldo, Laninho e outros, a Rita, Bené, Dota, Carlos, Arimatea, ao restaurante popular, a padaria São Miguel e ao Madrugão lanches por me ajudarem fornecendo comida quando necessário. Aos motoristas do ônibus de Iracema que me trazem para Pau dos Ferros, Gonzaga, José Hamilton e Damião e ao prefeito José Juarez por pagar o aluguel da casa da república dos estudantes de Iracema em Pau dos Ferros. Por fim agradeço a minha família por todas as formas de apoio na carreira acadêmica e a mim mesmo por todo meu esforço e perseverança em seguir até o final. Por fim gostaria de agradecer a meus amigos Tamires, "Paulin", André e Carlos Italo, por terem me apoiado durante a defesa deste trabalho.

"A determinação herdada, o destino desta era e os sonhos das pessoas. Estas são as coisas que não serão impedidas. Enquanto as pessoas buscarem a liberdade, nada poderá parar essas coisas."

(Gol D. Roger - One Piece)

"Se eu tivesse que me importar com os vermes no meu caminho eu sequer conseguiria andar"
(Guts - Berserk)

"Deixe que seus amigos subestimem suas qualidades e que seus inimigos superestimem seus defeitos"
(Don Corleone - O poderoso Chefão)

"Não há causa perdida se restar único tolo lute ela"
(William Turner - Piratas do Caribe: No fim do mundo)

"Alguns homens não procuram nada lógico como dinheiro. Eles não são compráveis, ameaçáveis, razoáveis ou negociáveis. Alguns homens só querem ver o circo pegar fogo"
(Alfred - Batman: O cavaleiro das Trevas)

"Todos nós fazemos escolhas na vida, mas no final nossas escolhas nos fazem"
(BioShock)

"Qualquer dificuldade perto do que você quer ser se torna tão pequeno quanto um grão de areia"
(VgBeats)

"Se não pode mudar seu destino, mude suas atitudes."
(Roronoa Zoro)

"Os gênios vivem um caminho moldado pela loucura."
(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal deste trabalho é fazer um estudo sobre a influência de ressoadores em antenas de microfitas. Porém, antes disso fazemos um estudo introdutório sobre antenas, e mais especificamente antenas de microfita, passando desde sua origem e definição, até os métodos de análise e os parâmetros fundamentais para avaliação da eficiência de uma antena. Para o cálculo das dimensões das antenas utilizadas neste trabalho usamos o método de análise da linha de transmissão e uma aproximação feita para termos as dimensões de um *patch* circular, tendo em vista que o método da linha de transmissão é usado “somente” para calcular as dimensões de uma antena com o *patch* retangular, o cálculo foi feito numericamente com um código implementado no SciLab. Com as dimensões das antenas, as modelamos utilizando as dimensões que foram calculadas numericamente, uma espessura do substrato de 1.58 mm constituído de FR4, comumente conhecido como fibra de vidro, com camadas de cobre com 0.05 mm de espessura, para uma frequência de operação de 2.6GHz, que é uma frequência intermediária na faixa de frequências da tecnologia 4G no Brasil. Modelamos três tipos de antenas, uma com ressoador circular no *patch* e plano de terra cheio, onde este ressoador estava em cinco posições diferentes, outro modelo de antena semelhante ao anterior, porém, com o plano de terra truncado e por fim, um modelo com ressoador quadrado no plano de terra truncado, com dois ressoadores em duas posições diferentes. Com as antenas modeladas, realizamos simulações computacionais, onde obtivemos resultados para a perda de retorno e os diagramas de radiação, e com isso podemos obter as faixas de frequência das antenas simuladas e os valores para o ganho total de cada uma delas.

Palavras-chaves: Antenas de Microfita. Ressonadores. *Patch* Circular. Perda de Retorno. Diagrama de Radiação.

ABSTRACT

This work has the main objective of this work is to do a study on the influence of resonators in microstrip antennas. However, before that we do an introductory study on antennas, and more specifically microstrip antennas, from their origin and definition, to the methods of analysis and the fundamental parameters for evaluating the efficiency of an antenna. For the calculation of antenna dimensions used in this work we used the transmission line analysis method and an approximation made to terms the dimensions of a circular patch, since the transmission line method is used "only" to calculate the dimensions of an antenna with the rectangular patch, the calculation was done numerically with a code implemented in SciLab. With the dimensions of the antennas, we modeled them using the numerically calculated dimensions, a 1.58 mm substrate thickness consisting of FR4, commonly known as glass fiber, with 0.05 mm thick copper layers for an operating frequency of 2.6GHz, which is an intermediate frequency in the frequency band of 4G technology in Brazil. We modeled three types of antennas, one with circular resonator in the patch and full ground plane, where this resonator was in five different positions, another antenna model similar to the previous, but with the ground plane truncated and finally, a model with square resonator in the truncated earth plane, with two resonators in two different positions. With the antennas modeled, we performed computational simulations, where we obtained results for the loss of return and the radiation diagrams, and with that we can obtain the frequency bands of the simulated antennas and the values for the total gain of each of them.

Keywords: Antennas of Microstrip, Resonators, Circular Patch, Loss of Return, Radiation Diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Telégrafo	12
Figura 2 - Modelo exemplo de antena de microfita	13
Figura 3 - Tipos de geometria do <i>patch</i> para antenas de microfita	15
Figura 4 - Representação das dimensões da antena	18
Figura 5 - Modelo de antena <i>insert-fed</i>	20
Figura 6 - Dimensões das antenas calculadas com o SciLab	23
Figura 7 - Modelo de antena padrão utilizado	24
Figura 8 - Modelo de ressoador utilizado	25
Figura 9 - Antena com ressoador central	25
Figura 10 - Antena com ressoador na base	25
Figura 11 - Antena com ressoador no topo	26
Figura 12 - Antena com ressoador na direita	26
Figura 13 - Antena com ressoador na esquerda	26
Figura 14 - Perda de retorno para as antenas 7 - 13	27
Figura 15 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão	27
Figura 16 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 1	28
Figura 17 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 2	28
Figura 18 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 3	29
Figura 19 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 4	29
Figura 20 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 5	30
Figura 21 - Dimensões do plano truncado	30
Figura 22 - Perda de retorno para as antenas das Figuras 8 - 21	31
Figura 23 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão	31
Figura 24 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 1	32
Figura 25 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 2	32
Figura 26 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 3	33
Figura 27 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 4	33
Figura 28 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 5	33
Figura 29 - Antena padrão adaptada	34

Figura 30 - Plano de terra truncado com ressoador 1	35
Figura 31 - Plano de terra truncado com ressoador 2	35
Figura 32 - Plano de terra truncado com ressoador 3	35
Figura 33 - Perda de retorno para as antenas 29 - 32	36
Figura 34 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão	37
Figura 35 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 1	37
Figura 36 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 2	38
Figura 37 - Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 3	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	ANTENAS DE MICROFITA	15
2.1	PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS	16
2.1.1	Perda de retorno	16
2.1.2	Diagrama de radiação	17
2.1.3	Largura de Banda	17
3	PROJETO DAS ANTENAS	18
3.1	O MÉTODO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	18
3.2	O MÉTODO DA CAVIDADE	22
3.3	O CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA ANTENA	22
4	RESULTADOS E ANÁLISES	24
4.1	APRESENTAÇÃO DOS MODELOS SIMULADOS	24
4.1.1	Antenas com ressoador circular no <i>patch</i> e plano de terra cheio	24
4.1.2	Antenas com ressoador circular no <i>patch</i> e plano de terra truncado	30
4.1.3	Antenas com ressoador quadrado no plano terra truncado	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Ao procurarmos em algum dicionário o significado do termo “antena”, provavelmente iremos encontrar algo semelhante a “dispositivo metálico para irradiar ou receber ondas de rádio”, entretanto, a definição formal do termo antenna é dada pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE). Segundo IEEE... (2014), uma antenna é definida como sendo uma parte de um sistema de comunicação que é capaz de emitir e receber ondas eletromagnéticas. Geralmente qualquer material capaz de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas pode ser definido como antenna.

A primeira antenna foi criada em 1906 pelo italiano Guglielmo Marconi, e devido aos seus trabalhos para o desenvolvimento de antenas que permitiu os avanços tecnológicos necessários para a criação do telégrafo sem fio. O telégrafo representado na Figura 1, foi um sistema de comunicação criado no século XVIII, foi praticamente o primeiro sistema de comunicação a distância.

As informações eram enviadas através de código Morse, esse código foi desenvolvido por Samuel Morse para transmitir o primeiro telegrama em 24 de maio de 1844. Entretanto, para transmitir as informações codificavam as mensagens em sinais elétricos que eram transmitidos através de um sistema de fiação. Com a invenção do telégrafo sem fio, Marconi conseguiu enviar os sinais elétricos gerados pelo telégrafo através de ondas de rádio, tudo isso só foi possível graças ao desenvolvimento das antenas.

Figura 1: Telégrafo



Fonte: <https://sites.google.com/site/ttnm1314m773731/il-telegrafo>

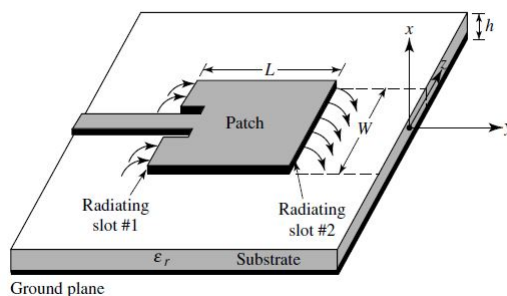
Com esse avanço na telegrafia, nos anos seguintes essa tecnologia foi aprimorada por outros cientistas e pesquisadores para que pudessem transmitir a voz. Atualmente o desempenho dos sistemas de comunicação e troca de informações depende quase que exclusivamente do desempenho das antenas projetadas.

Quanto as antenas, temos diversos tipos de antenas, nos mais variados formatos, alguns tipos de antenas são as antenas de abertura, as antenas de chifre, as antenas refletoras, as antenas de microfita e as antenas de microfita. Neste trabalho, tal como o título sugere, iremos trabalhar especificamente com as antenas de microfita.

Uma antenna de microfita é “[...], em sua forma mais simples, são compostas por um plano terra e um substrato dielétrico que sustenta uma fita condutora, a qual é chamada de *patch*.”

(LAVOR, 2015, p. 1). Na Figura 2 temos um exemplo de antena de microfita.

Figura 2: Modelo exemplo de antena de microfita



Fonte: Balanis (2005)

O número de aplicações das antenas de microfita é enorme, de acordo com Balanis (2005) elas podem ser aplicadas em aeronaves, espaçonaves, satélites e mísseis, por exemplo, necessitam de antenas em suas estruturas para que possam receber e enviar as informações necessárias, devido à natureza destes equipamentos, o custo, desempenho e aerodinâmica são de extrema importância, por isso o uso de uma antena tradicional seria inviável devido às restrições mencionadas acima, sendo assim o ideal seria uma antena que pudesse ser acoplada paralela ao plano da estrutura, ou seja, para isso o uso de uma antena de microfita é a solução mais viável, pois, é um tipo de antena plana, que não interfere na aerodinâmica do equipamento, um baixo custo para a produção e dependendo de alguns fatores, pode ter o desempenho necessário para a função que irá executar.

As vantagens das antenas de microfita são diversas, algumas delas são, o baixo custo, a compatibilidade com circuitos integrados, a possibilidade de ajuste em superfícies onduladas o que torna possível sua aplicação na fuselagem de aviões e veículos semelhantes como já foi tido anteriormente (OLIVEIRA et al., 2014 apud JAMES; HALL, 1989, p. 49), a possibilidade de polarização linear ou circular, entre outras vantagens (LAVOR, 2015).

Entretanto, mesmo com um número considerável de vantagens e aplicações, as antenas de microfita apresentam certas desvantagens, segundo Lavor (2015) algumas destas desvantagens são, uma banda de frequências pequena, pois, elas operam em uma certa frequência, definida pelo tamanho do *patch*, em alguns casos apresentam uma grande perda de retorno, as estruturas de alimentação são complexas em alguns casos podem gerar algum tipo de radiação indesejável.

Devido ao número de desvantagens desse tipo de antena, pesquisas sobre formas de melhorar o desempenho das mesmas são realizadas desde meados do século passado e mesmo assim grande parte das desvantagens continuam. Conforme Andrade (2013) o desempenho das antenas de microfita está diretamente relacionado a certos parâmetros, como, por exemplo a forma do *patch* (ou elemento irradiante), e também da permissividade elétrica e permeabilidade magnética do substrato da antena.

Este trabalho tem como objetivo, além de fazer um estudo introdutório das antenas de microfita, indo desde os métodos de análise para o cálculo de suas dimensões até o estudo

dos parâmetros importantes para a avaliação da eficiência deste tipo de antena, tais parâmetros também podem ser aplicados para outros tipos de antena, fazer também um estudo da influência dos ressoadores nas antenas de microfita, avaliando a perda de retorno, o ganho total e os diagramas de radiação. Para a obtenção de dados, neste trabalho realizamos diversas simulações computacionais utilizando software que utiliza o método das diferenças finitas.

No capítulo 1 deste trabalho apresentamos uma introdução sobre as antenas de microfita, além de apresentar os objetivos e forma como este trabalho está dividido. No capítulo 2, apresentamos um estudo mais profundo sobre as antenas de microfita, desde a sua origem, os elementos que as constituem, a forma de alimentação e também os parâmetros fundamentais para a avaliação de sua eficiência, tais parâmetros são, a perda de retorno, o diagrama de radiação e a largura de banda.

No capítulo 3 apresentamos o método de análise utilizado para o cálculo das dimensões das antenas utilizadas neste projeto, bem como o método utilizado para o cálculo destas dimensões a partir destes métodos, que foi através de um código implementado no SciLab para calcular estas dimensões numericamente. No capítulo 4 apresentamos os modelos de antena elaborados com os valores obtidos com o código implementado, assim como os gráficos representando a perda de retorno e os diagramas de radiação apresentando os valores do ganho total para cada modelo de antena.

Por fim no capítulo 5 apresentamos as conclusões qualitativas e quantitativas que puderam ser absorvidas neste trabalho.

2 ANTENAS DE MICROFITA

Os primeiros trabalhos sobre antenas de microfita foram publicados por Deschamps na década de 1950, mais especificamente no ano de 1953, no III Simpósio sobre antenas, realizado pela força aérea dos Estados Unidos (DESCHAMPS, 1953). A partir da década de 1970, os trabalhos sobre antenas de microfita começaram a se intensificar, isso devido a grande demanda que surgiu para a área de comunicações sem fio e no setor aeroespacial (SANTOS, 2016 apud CARVER; MINK, 1981, p. 14).

Segundo Morais (2011), algumas das vantagens que as antenas de microfita que podemos listar são:

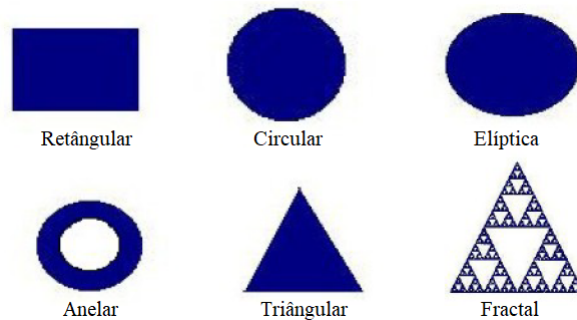
1. Perfil Baixo;
2. Peso reduzido;
3. Facilidade de fabricação;
4. Baixo custo.

Como afirmou Morais (2011), a depender da situação em que desejamos aplicar uma antena de microfita, ela pode apresentar certas desvantagens, como, por exemplo:

1. Largura de banda estreita;
2. Eficiência baixa;
3. Ganho baixo.

Porém, mesmo com essas desvantagens, existem meios de minimiza-los, como, por exemplo, o truncamento do plano de terra para aumentar a largura de banda da antena. Um dos parâmetros de extrema importância para a eficiência de uma antena de microfita é a geometria do elemento radiante ou *patch* da antena. Sua geometria pode ser das mais variadas formas, como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Tipos de geometria do *patch* para antenas de microfita



Fonte: Imagem adaptada de Silveira (2016)

Na literatura, as antenas de microfita mais comuns são as com *patch* circular e retangular.

Outro fator que influencia na eficiência das antenas de microfita é o material que compõem o substrato dielétrico da antena. Para melhoria do desempenho da antena, os melhores substratos são aqueles em que a constante dielétrica é mais baixa, pois, permite um melhor ganho e uma maior largura de banda (MORAIS, 2011). Segundo Moraes (2011) substratos com constantes dielétricas com valores maiores são úteis para circuitos de microondas, pois, minimizam as irradiações e acoplamentos indesejáveis, eles permitem a redução do *patch*, porém, aumentam as perdas e reduzem a largura de banda da antena.

Tão importante quanto os elementos que irão constituir a antena, a técnica de alimentação que será aplicada na antena. A escolha do tipo de alimentação da antena varia segundo o projeto da antena, a escolha da técnica de alimentação da antena depende de fatores como tamanho, largura de banda e casamento de impedância (SANTOS, 2016).

Algumas das técnicas de alimentação que podem ser citadas são, a alimentação por linha de microfita, por cabo coaxial, por guia de onda coplanar, acoplamento por proximidade e acoplamento por abertura (SANTOS, 2016). Neste trabalho será usado a técnica de alimentação por linha de microfita, segundo Balanis (2005) este método consiste em junto ao *patch* adicionar uma linha de cobre de largura dada pelas equações 1 e 2.

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), \frac{w}{h} < 1 \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1}{\left[\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,4444 \right) \right]}, \frac{w}{h} \geq 1 \quad (2)$$

O termo ϵ_{eff} é dado pelas equações 6 e 7, o termo Z_0 é a impedância característica de entrada, neste trabalho, normalizada para 50 Ω . Uma das limitações deste método é a geração de radiação indesejada (BAHL; BHARTIA, 1982).

2.1 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS

Existem alguns parâmetros fundamentais para analisarmos o desempenho de uma antena de microfita, aqui iremos apresentar dois destes parâmetros, que serão abordados neste trabalho, estes são, a perda de retorno, o diagrama de radiação e a largura de banda.

2.1.1 Perda de retorno

Segundo Pozar (2011) a perda de retorno é causada devido às reflexões que ocorrem na fronteira da linha de transmissão, quando uma onda incide na antena, parte dela é refletida para o meio exterior, como a região que contém a onda incidente é a mesma região que contém a onda refletida essas duas ondas sofrem superposição e essa superposição forma ondas estacionárias. A razão da onda estacionária de tensão (*Voltage Stationary Wave Ratio - VSWR*), desta linha de transmissão é dada pela razão entre os máximos e mínimos da amplitude da onda estacionária

dada pela equação 3.

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (3)$$

Onde o termo Γ definido pela equação 4, é o chamado coeficiente de reflexão.

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (4)$$

Aqui os termos Z_c e Z_0 são respectivamente a impedância da linha e a impedância característica.

Geralmente para valores muito grandes ou muito pequenos para a perda de retorno utilizamos a representação da perda de retorno (Return Loss - RL) em dB , neste caso a perda de retorno conforme Pozar (2011) é dada pela equação 5.

$$RL(dB) = -20 \log \Gamma \quad (5)$$

2.1.2 Diagrama de radiação

Os campos elétrico $\vec{E}$ e magnético $\vec{H}$, são os campos onde o diagrama de radiação é definido, ele é definido na direção onde os campos elétricos e magnéticos apresentam a maior irradiação. O projeto de uma antena de microfita é feito de tal modo que o seu diagrama de radiação apresente seu máximo na direção perpendicular ao *patch* da antena de microfita, isso consequentemente faz com que ele seja normal ao plano de terra da antena (ANDRADE, 2013).

2.1.3 Largura de Banda

Segundo Balanis (2005) largura de banda é o intervalo de frequências a esquerda e a direita em relação a uma frequência central em que a perda de retorno tem valores aceitáveis. Neste trabalho o limite aceitável para a perda de retorno serão valores menores ou iguais a $-10dB$.

3 PROJETO DAS ANTENAS

Antes de apresentar os detalhes sobre a construção do modelo da antena que será utilizada é necessário que fique claro qual será a sua aplicação. Todos os modelos de antenas que serão apresentados aqui foram desenvolvidas para trabalhar na faixa de frequência da tecnologia 4G, no Brasil a faixa de frequências da tecnologia 4G é de 2.5GHz à 2.69 GHz, sendo assim neste trabalho projetamos as antenas para uma frequência intermediária, ou seja, para uma frequência de 2.6 GHz.

Para que uma antena opere na frequência desejada, sua geometria deve ser adaptada para tal frequência, por isso que existem os métodos de análise. Os métodos de análise mais comuns são, o método da linha de transmissão desenvolvido para antenas com o *patch* retangular e o método da cavidade, para antenas com o *patch* circular (BALANIS, 2005). Outros métodos de análise são o método da imitância, o método dos potenciais vetoriais de Hertz e o método dos elementos finitos (LAVOR, 2015).

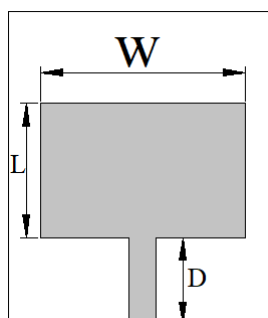
No caso deste trabalho o método de análise utilizado será o método da linha de transmissão (LT). O método da linha de transmissão é definido por (LAVOR, 2015 apud BALANIS, 2005, p. 11) como sendo:

A análise para antenas de microfitas com *patches* circulares e retangulares é feita pelo método da Linha de Transmissão, no qual o *patch* e a linha de alimentação são modelados por seções de LT, bem como pelo método da cavidade, no qual a antena é tratada como sendo uma cavidade com paredes ressonantes. No caso de uma antena com *patch* circular, a análise é feita pelo método da cavidade, no qual os modos suportados pela antena podem ser determinados tratando o *patch*, o plano de terra e o material entre eles como uma cavidade circular.

3.1 O MÉTODO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

O método da Linha de Transmissão apresenta um conjunto de equações usadas para calcular as dimensões do *patch* da antena, de forma que ela possa operar na frequência desejada. As dimensões são apresentadas na Figura 4.

Figura 4: Representação das dimensões da antena



Fonte: O autor.

Tendo as dimensões do substrato, as dimensões do *patch* são adaptadas para funcionar que a antena opere na frequência desejada.

As equações para o calculo das dimensões mostradas na Figura 4 segundo Balanis (2005) e Santos (2016) são as equações 6 até 12 e representam as dimensões W e L do *patch* da antena.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}, \frac{W}{h} < 1 \quad (6)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} + 0.041 \left(1 - \frac{W}{h} \right) \right], \frac{W}{h} \geq 1 \quad (7)$$

$$F_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

$$W = \frac{c}{2F_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (9)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (10)$$

$$D = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} + 2\Delta L \quad (12)$$

Nestas equações, os termos e o que eles representam estão representados na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de termos e significados

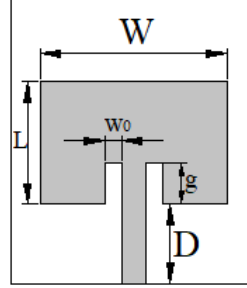
Termo	Sgnificado
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa do substrato
ϵ_{eff}	Permissividade elétrica efetiva do substrato
F_r	Frequência de ressonancia
h	Espessura do substrato
c	Velocidade da luz
W	Largura do <i>patch</i>
L	Comprimento do <i>patch</i>
f	Frequência de operação
D	Comprimento da linha de alimentação

Fonte: O autor

Entretanto, apenas com estes dados, é necessário a introdução de um outro elemento no *patch* da antena, para que seja feito o casamento de impedância. O casamento de impedância é de extrema importância, pois, o *patch* e a fonte de alimentação da antena apresentam impedâncias distintas entre si, dessa forma é preciso que algum elemento faça a união entre essas duas

impedâncias, este elemento é chamado de *GAP*, este elemento irá fazer o casamento entre o elemento irradiante e a linha de alimentação. Com a introdução deste elemento na antena teremos uma antena de microfita do tipo *insert-fed*, dessa forma, a antena ficará como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Modelo de antena *insert-fed*



Fonte: O autor

Conforme afirma Balanis (2005), para calcular as dimensões dos *gaps* antes é necessário que sejam determinados as condutâncias G_1 e G_{12} , as equações que expressam estes termos são as equações 13 - 15.

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (13)$$

Onde I_1 é dado pela equação 14.

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (14)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W \cos\theta}{2}\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(Lk_0 \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (15)$$

Nestas equações dois termos ainda não foram apresentados, estes são os termos k_0 e o termo J_0 . O termo k_0 é o número de onda no espaço livre, segundo Brinhole (2005), ele é dado pela equação 16.

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (16)$$

Já o termo J_0 é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero. Segundo Boyce e DiPrima (2009), a função de Bessel é a solução da equação diferencial representada pela equação 17.

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 + v^2)y = 0 \quad (17)$$

Onde v é um número real e representa a ordem da equação, no caso da equação 17 temos

uma equação de Bessel de ordem v , logo para a equação de Bessel ser considerada de ordem zero o termo v deve ser nulo, ou seja, a equação 17 deve ser escrita da forma.

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + x^2 y = 0 \quad (18)$$

Segundo Boyce e DiPrima (2009), para resolvermos a equação 18 utilizamos o método de Frobenius, que consiste em supor que solução desta EDO é um polinômio, como mostrado na equação 19.

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n x^{r+n} \quad (19)$$

Calculando as derivadas de primeira e segunda ordem da equação 19 e substituindo na equação 18 e fazendo as devidas simplificações iremos encontrar que a solução desta equação é dada pela equação 20.

$$y(x) = A_0 \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \right] \quad (20)$$

Neste caso a função entre colchetes é definida como sendo a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero, ou seja.

$$J_0 = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \quad (21)$$

Tendo definido os termos k_0 e J_0 , agora é possível calcular a resistência na entrada, que segundo Balanis (2005) é dada pela equação 22.

$$R_{in}(g) = \frac{\cos^2\left(\frac{\pi g}{L}\right)}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (22)$$

Para encontrar g agora, basta isolar g na equação 22, e assim obteremos.

$$g = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{2(G_1 \pm G_{12}) R_{in}(g)} \right) \quad (23)$$

Neste trabalho a resistência de entrada $R_{in}(g)$ é de 50Ω . Agora é importante ressaltar que as integrais presentes nas equações 14 e 15 só podem ser calculadas numericamente, pois, as funções dentro dos integrandos não possuem primitivas, sendo assim elas foram calculadas utilizando a aproximação pelo método do, um terço de Simpson.

Por fim o termo w_0 , mostrado na figura 5 pode ser calculado segundo (LAVOR, 2015 apud ITOH; MENZEL, 1981, p. 13), pela equação 24.

$$w_0 = c \left(\frac{4.65 \times 10^{-12}}{F_r \sqrt{2\epsilon_{ref}}} \right) \quad (24)$$

3.2 O MÉTODO DA CAVIDADE

Na seção anterior foi apresentado o método da linha de transmissão, porém, este método é utilizado para calcular as dimensões para uma antena de *patch* retangular. Para antenas de *patch* circular utilizamos o método da cavidade. Segundo (ZAIDI et al., 2016 apud RAY; KUMAR, 2003, p. 2), podemos calcular o raio de um *patch* circular para uma antena de microfita pelas equações 25 – 28.

$$f_r = \frac{1.8412c}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (25)$$

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (26)$$

$$F = \frac{8.791}{f_r\sqrt{\epsilon_r}} 10^9 \quad (27)$$

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r a} \left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (28)$$

Pode-se notar aqui uma diferença entre os métodos da cavidade e da linha de transmissão. Porém, neste trabalho usaremos uma aproximação dada pela equação 29, segundo Lavor (2015), essa aproximação é validada através de simulações computacionais.

$$a = \frac{W + L}{4} \quad (29)$$

Com esta equação, podemos calcular as dimensões de uma antena com *patch* retangular, e usando a aproximação dada pela equação 29 podemos obter uma resposta semelhante a que poderia ser obtida em uma antena com *patch* circular, cujas dimensões foram calculadas pelo método da cavidade.

3.3 O CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA ANTENA

As equações do método da linha de transmissão apresentada na seção 3.1 apresentam integrais onde a função no integrando não apresenta primitiva, bem como equações transcendentais, logo não pode ser resolvida analiticamente, sendo assim a única maneira de calcular as dimensões a partir destas equações só pode ser feito numericamente, com métodos iterativos.

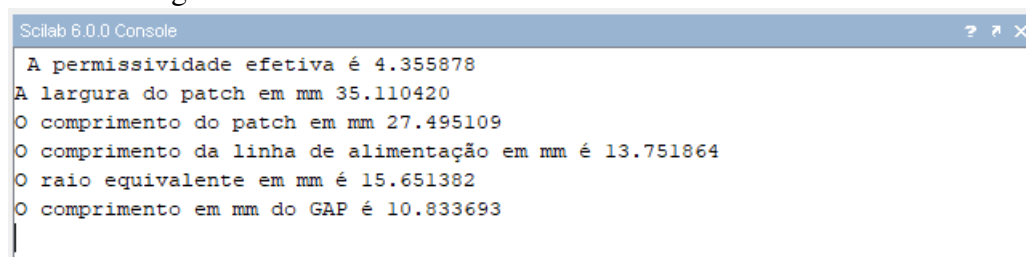
Realizar um grande número de iterações manualmente para calcular as dimensões de uma antena se torna muito inviável, e devido ao fator humano podem ocorrer erros que prejudiquem o cálculo durante as iterações. Sendo assim implementamos um código utilizando o SciLab, onde aplicamos métodos numéricos para o cálculo das dimensões destas antenas. O código implementado está apresentado abaixo. O uso do SciLab para a implementação do código se deve ao fato de que é um software livre e que pode ser utilizado por qualquer tipo de computador,

ou pessoa.

Para implementação deste código basta definir as equações desejadas, e aplicar laços de repetição nas equações que devem ser resolvidas de numericamente.

Ao executarmos o código no SciLab inserimos os dados iniciais, que seriam a espessura do substrato que neste caso é de 0.158 cm , a permissividade elétrica relativa que para o FR4 (fibra de vidro) que é de 4.4 e a frequência de operação, que neste caso é de 2.6 GHz como já foi dito anteriormente. Com isso obtivemos as medidas mostradas na Figura 6.

Figura 6: Dimenssões das antenas calculadas com o SciLab

A screenshot of the SciLab 6.0.0 Console window. The window has a title bar that says "SciLab 6.0.0 Console" and standard window controls (minimize, maximize, close) on the right. The console area contains the following text:

```
A permissividade efetiva é 4.355878  
A largura do patch em mm 35.110420  
O comprimento do patch em mm 27.495109  
O comprimento da linha de alimentação em mm é 13.751864  
O raio equivalente em mm é 15.651382  
O comprimento em mm do GAP é 10.833693
```

Fonte: O autor

Esses valores foram aproximados para a construção das antenas que serão apresentadas no capítulo seguinte.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo iremos apresentas os modelos de antenas construídos, e após a apresentação destes modelos apresentaremos os diagramas de radiação e os gráficos para a perda de retorno de cada modelo de antena.

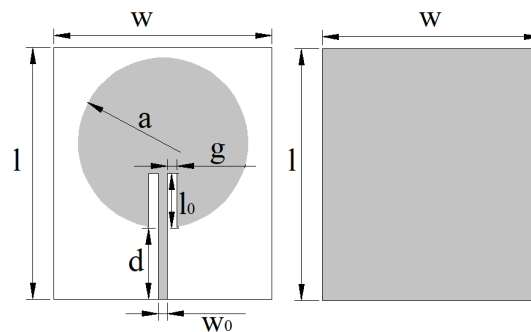
4.1 APRESENTAÇÃO DOS MODELOS SIMULADOS

As antenas aqui apresentadas foram projetadas para funcionar em uma frequência de 2.6 GHz, pois, esta é uma frequência média na faixa de frequências em que a tecnologia 4G funciona no Brasil, a tecnologia 4G no Brasil, funciona na faixa de frequência de 2.5 até 2.69 GHz. O material utilizado para compor o elemento radiante, o plano terra e o substrato das antenas apresentadas aqui foram respectivamente o cobre e o FR4, este ultimo conhecido como fibra de vidro, a espessura da camada de FR4 e de cobre nestas antenas são de 1.58 mm e 0.05 mm respectivamente.

4.1.1 Antenas com ressoador circular no *patch* e plano de terra cheio

As dimensões calculadas pelo código apresentado na seção anterior, a antena obtida apresentou as dimensões mostradas na Figura 7, do lado esquerdo temos a face do *patch* e o lado direito temos o plano terra. As dimensões representadas na Figura 7 estão mostradas na Tabela 2.

Figura 7: Modelo de antena padrão utilizado



Fonte: O autor

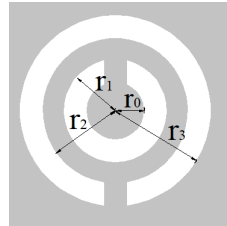
Tabela 2: Medidas das dimensões representadas na Figura 7

Medidas em Milímetros	
w	40
l	46
d	13
l_0	10
g	1.82
a	15.65
w_0	1.58

Fonte: O autor

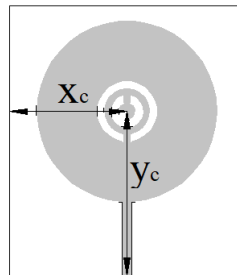
Para os outros modelos de antena, as dimensões mostradas na Figura 7 foram mantidas, e um ressoador circular foi adicionado no *patch* da antena, o modelo do ressoador está representado na Figura 8. Os raios r_0 , r_1 , r_2 , r_3 , são respectivamente, 1.6, 2.8, 4 e 5.2 milímetros. Este ressoador foi colocado em cinco (5) posições diferentes, gerando assim, mais cinco modelos de antena, a geometria destes modelos estão representadas nas Figuras 9 até 13.

Figura 8: Modelo de ressoador utilizado



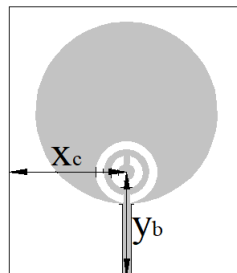
Fonte: O autor

Figura 9: Antena com ressoador central



Fonte: O autor

Figura 10: Antena com ressoador na base



Fonte: O autor

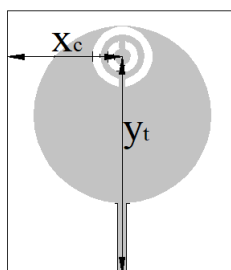
As posições mostradas nas Figuras 9 até 13 estão todas representadas na Tabela 3.

Tabela 3: Posições do ressoador no *patch*

Posições em milímetros					
x_c	20	x_d	30	x_e	10
y_c	27.95	y_b	17.9	y_t	38

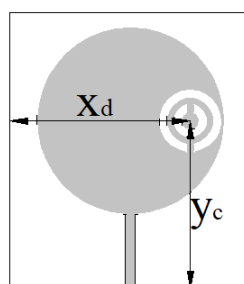
Fonte: O autor

Figura 11: Antena com ressoador no topo



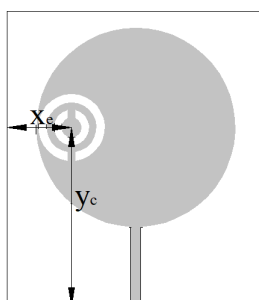
Fonte: O autor

Figura 12: Antena com ressoador na direita



Fonte: O autor

Figura 13: Antena com ressoador na esquerda



Fonte: O autor

Para essas antenas o gráfico para a perda de retorno que está representado na Figura 14. Neste gráfico a antena padrão é a representada pela Figura 7, a posição 1 é a antena representada pela Figura 9, a posição 2 é a antena representada pela Figura 10, a posição 3 é a antena representada pela Figura 11, a posição 4 é a antena representada pela Figura 12, a posição 5 é a antena representada pela Figura 13.

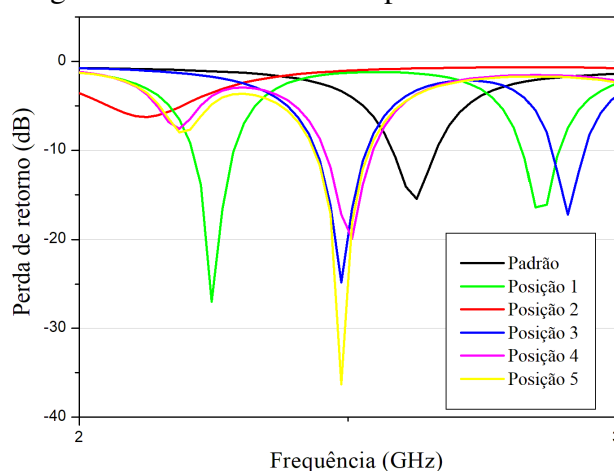
Pela Figura 14, podemos notar que as antenas que melhor se ajustaram a frequência de operação da tecnologia 4G, foram as antenas na posição 3, 4, 5 e a antena padrão. A antena na posição 2, não apresentou nenhuma resposta satisfatória para a faixa de frequências da tecnologia 4G. As faixas de frequência das antenas apresentadas são:

- A faixa de frequência da antena padrão está no intervalo de [2.58 GHz - 2.66 GHz];
- A faixa de frequência da antena na posição 1 está no intervalo de [2.21 GHz - 2.29 GHz] e

outra faixa no intervalo de [2.82 GHz - 2.89 GHz];

- A antena na posição 2 não apresenta faixa de frequência aceitável;
- A faixa de frequência da antena na posição 3 está no intervalo de [2.44 GHz - 2.54 GHz] e outra faixa no intervalo de [2.88 GHz - 2.94 GHz];
- A faixa de frequência da antena na posição 4 está no intervalo de [2.46 GHz - 2.56 GHz];
- A faixa de frequência da antena na posição 5 está no intervalo de [2.44 GHz - 2.54 GHz].

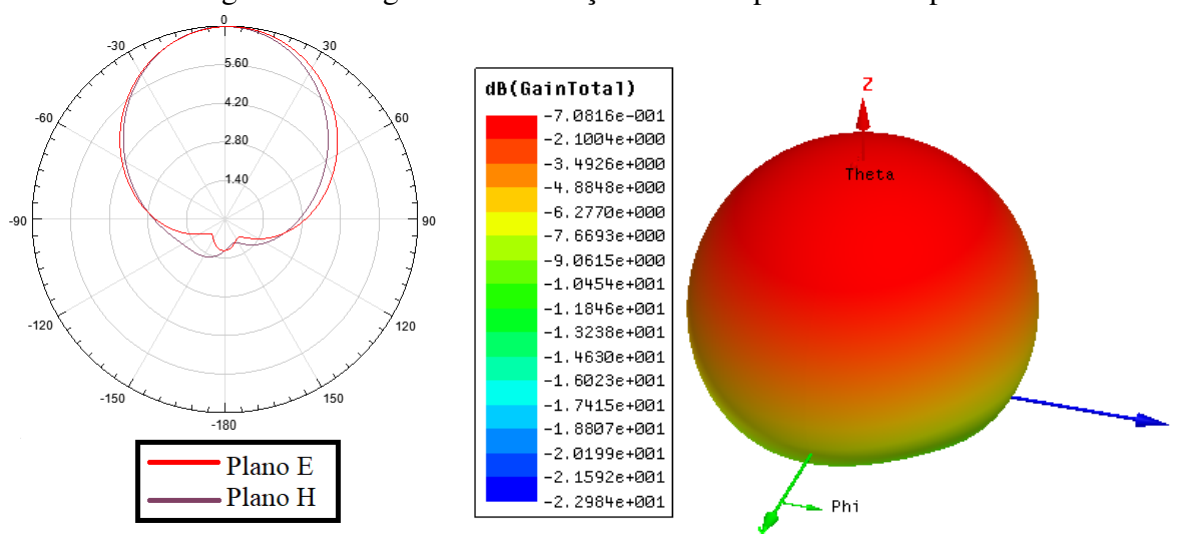
Figura 14: Perda de retorno para as antenas 7 - 13



Fonte: O autor

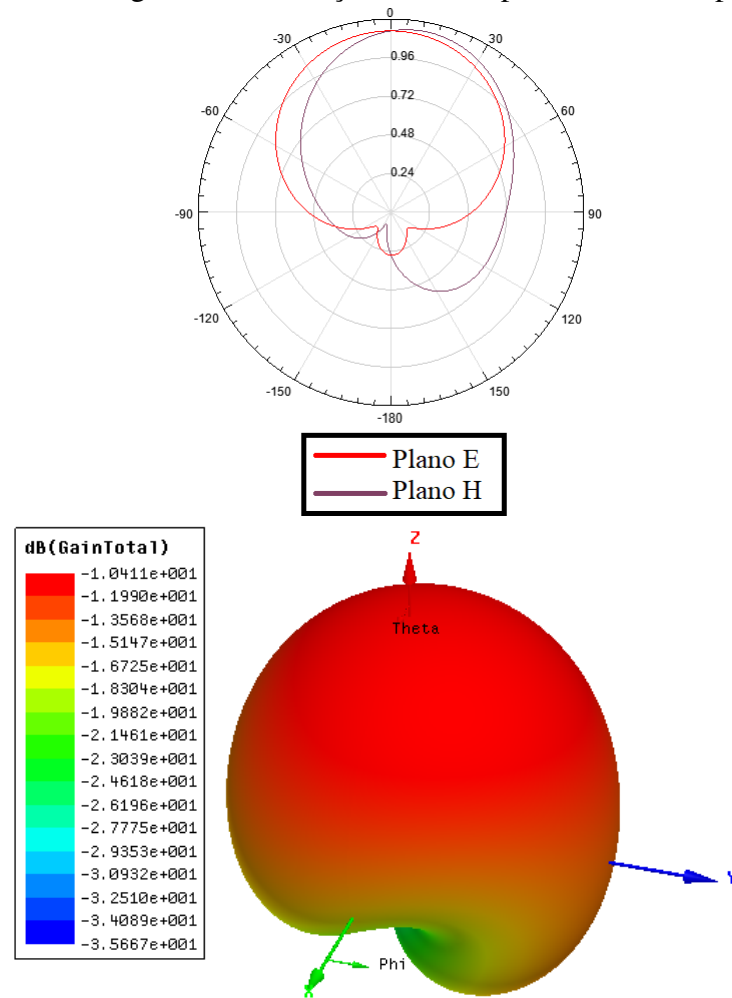
Os diagramas de radiação para as antenas apresentadas nesta seção são apresentados pelas Figuras 15 – 20.

Figura 15: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão



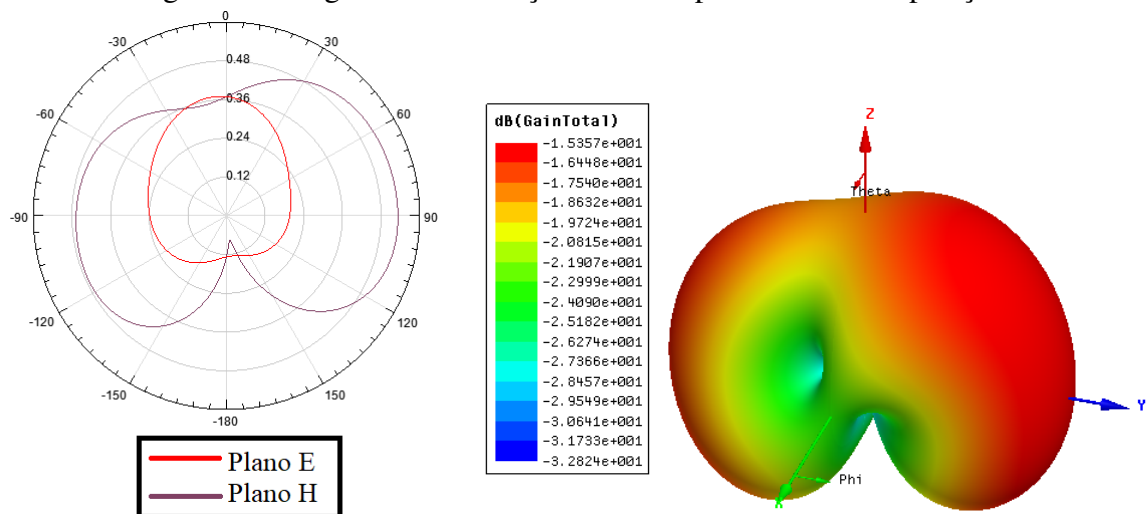
Fonte: O autor

Figura 16: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 1



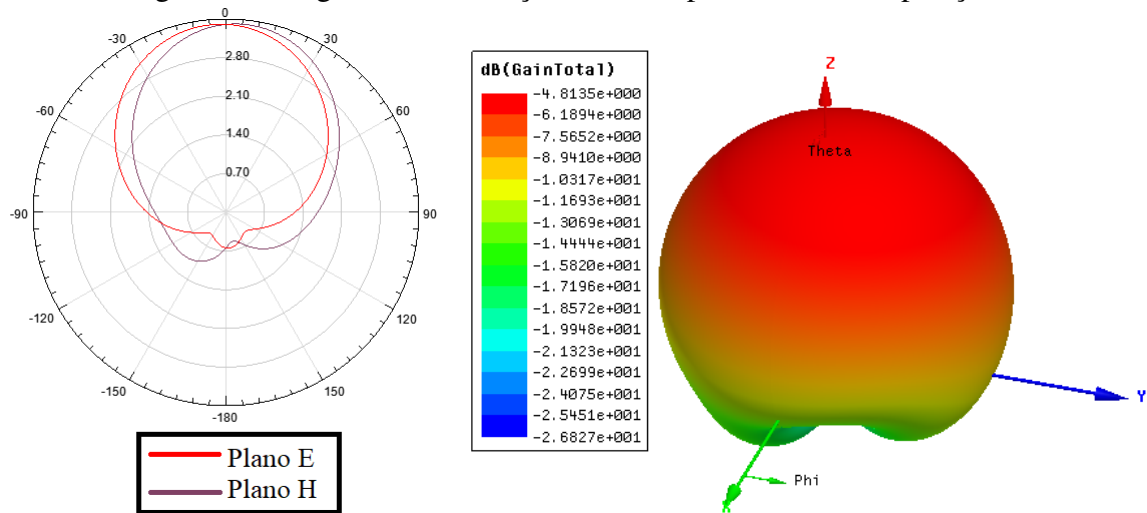
Fonte: O autor

Figura 17: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 2



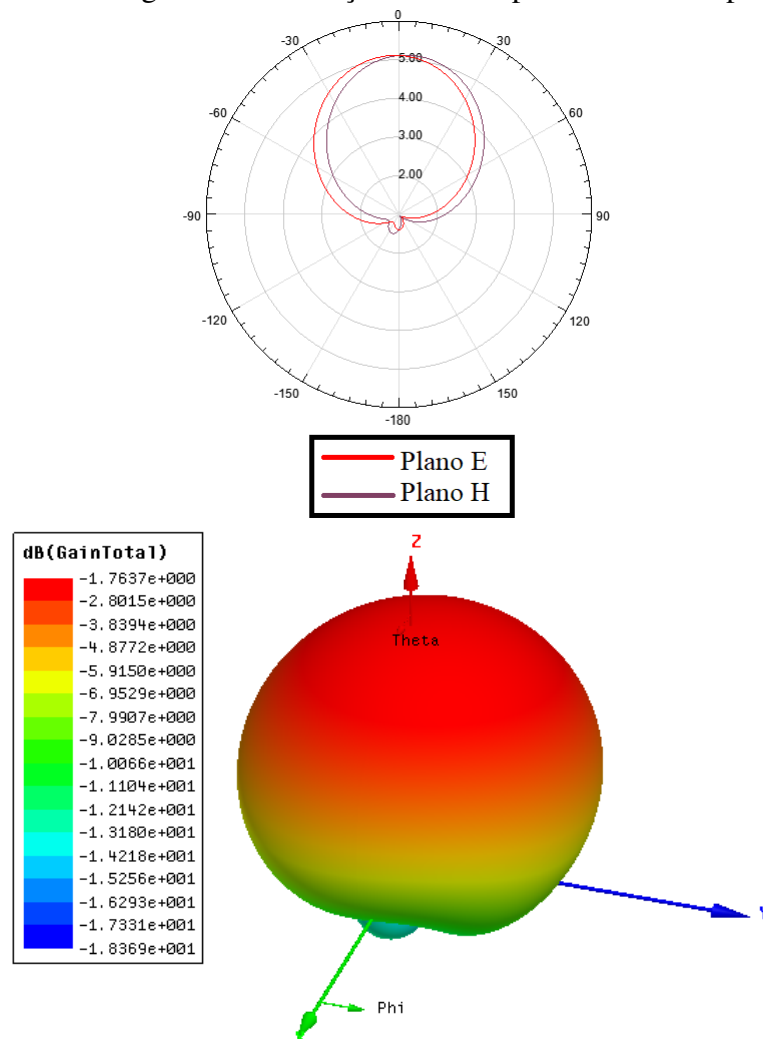
Fonte: O autor

Figura 18: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 3



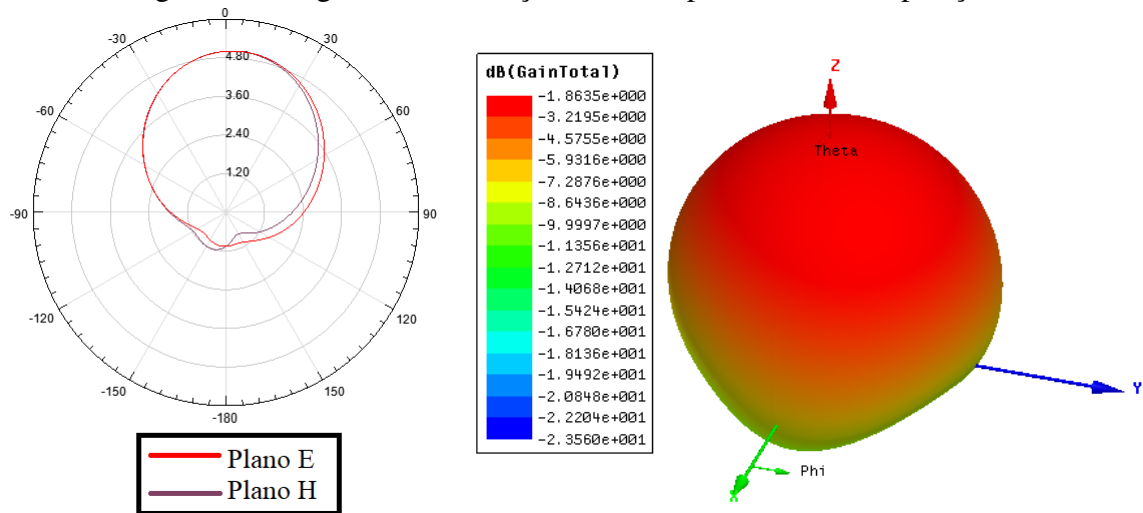
Fonte: O autor

Figura 19: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 4



Fonte: O autor

Figura 20: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 5



Fonte: O autor

Os valores para o ganho total destas antenas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Ganhos das antenas com ressoador circular e plano cheio

Antena	Ganho total (dB)	Antena	Ganho total (dB)
Antena padrão	-0,7081	Posição 3	-15,3570
Posição 1	-0,1041	Posição 4	-1,7637
Posição 2	-4,8135	Posição 5	-1,8635

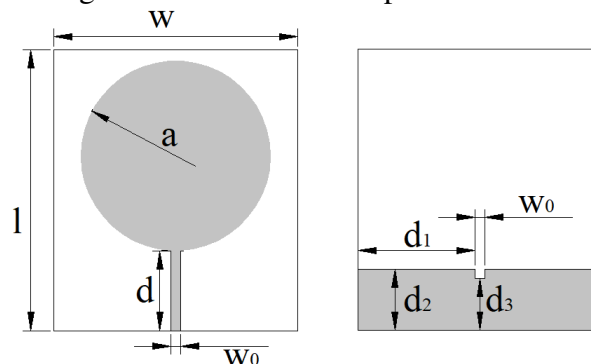
Fonte: O autor

Aqui podemos ver que a antena que apresentou o melhor ganho foi a antena com o ressoador na posição 1.

4.1.2 Antenas com ressoador circular no *patch* e plano de terra truncado

Para este modelo de antena utilizado aqui foi feito uma pequena modificação no plano de terra de cada antena, este tipo de plano de terra é chamado de plano de terra truncado. O modelo de antena padrão com o plano de terra truncado está representada na Figura 21.

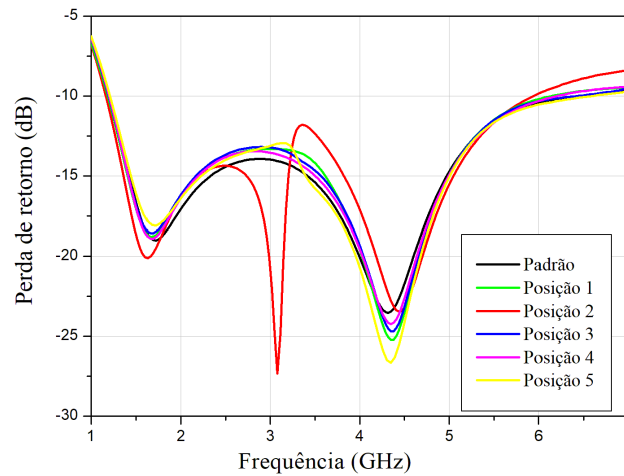
Figura 21: Dimensões do plano truncado



Fonte: O autor

As dimensões da antena padrão neste caso são, w , l , a , d , w_0 são as mesmas representadas na Tabela 2, já as dimensões d_1 , d_2 , d_3 , valem respectivamente 19.21 mm, 10 mm, 8.42 mm. Para demais modelos de antena, utilizamos o plano de terra truncado nas antenas com o ressoador, em todas as posições mostradas nas Figuras 9 à 13. A perda de retorno está representada na Figura 22. Pode-se notar que para todas as antenas exceto uma, os resultados para a perda de retorno foram praticamente os mesmos. Para todas as antenas a faixa de frequência compreende um intervalo aproximado de [1.2 GHz - 6 GHz].

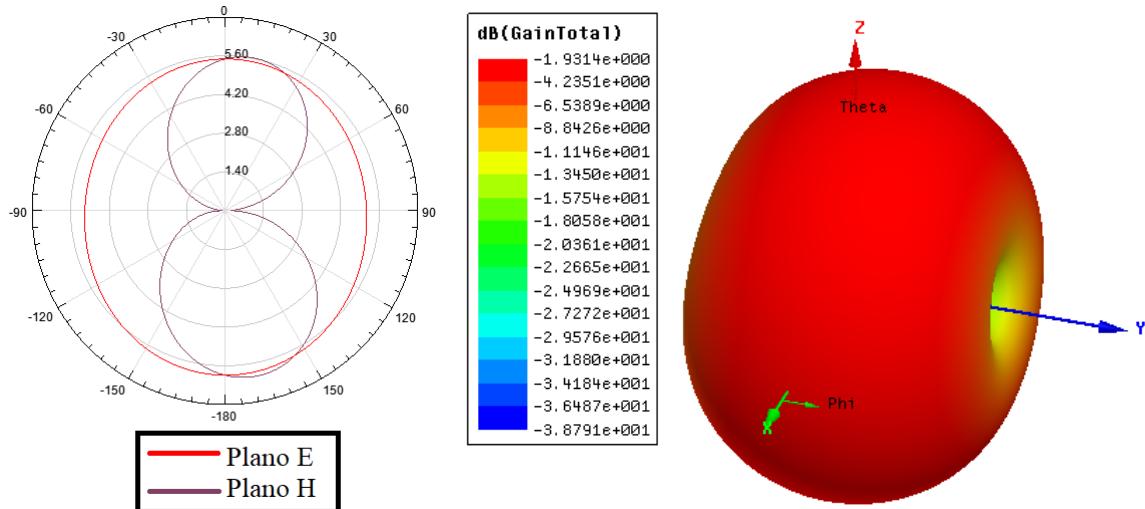
Figura 22: Perda de retorno para as antenas das Figuras 8 - 21



Fonte: O autor

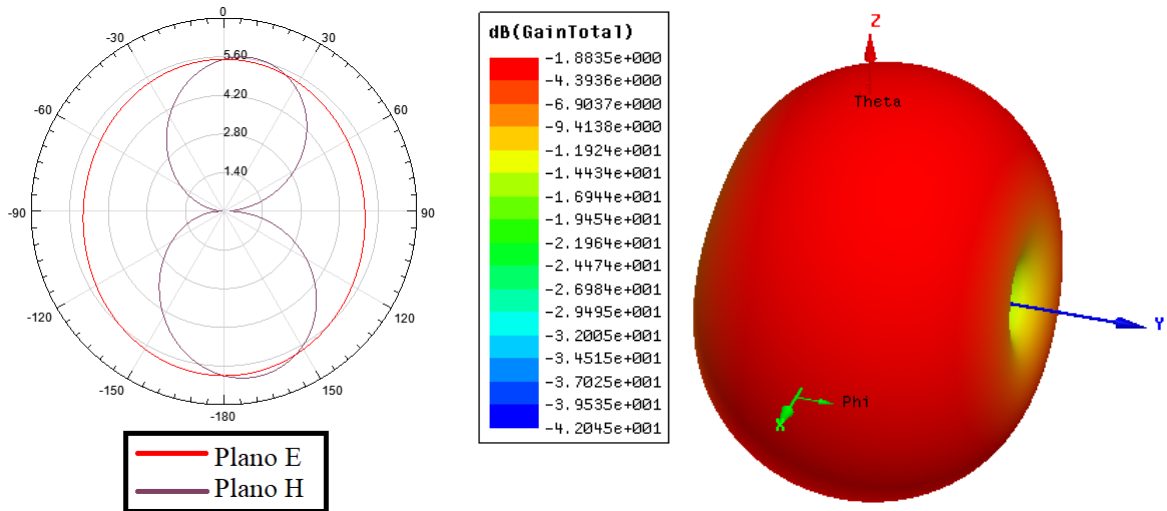
Os diagramas de radiação estão representados entre as Figuras 23 – 34.

Figura 23: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão



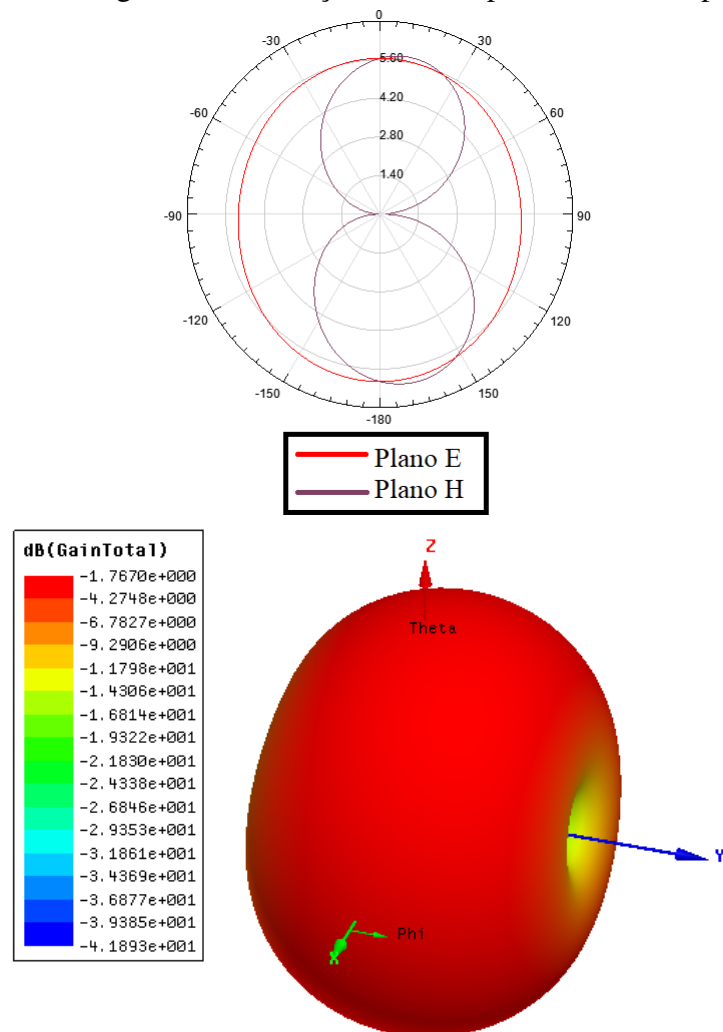
Fonte: O autor

Figura 24: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 1



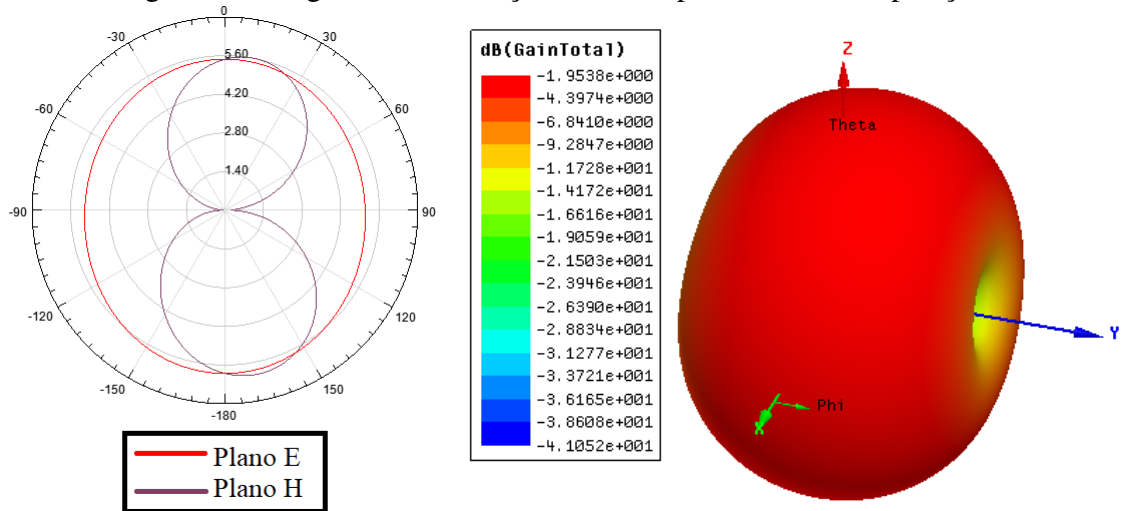
Fonte: O autor

Figura 25: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 2



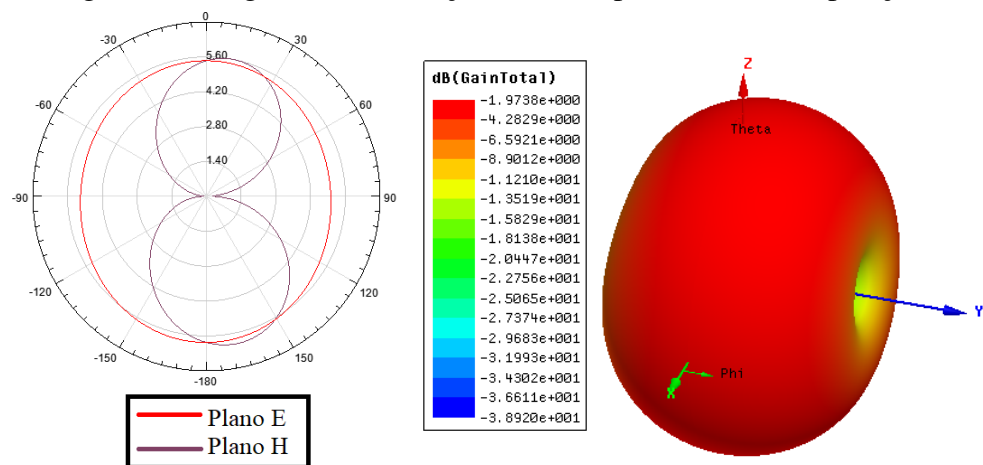
Fonte: O autor

Figura 26: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 3



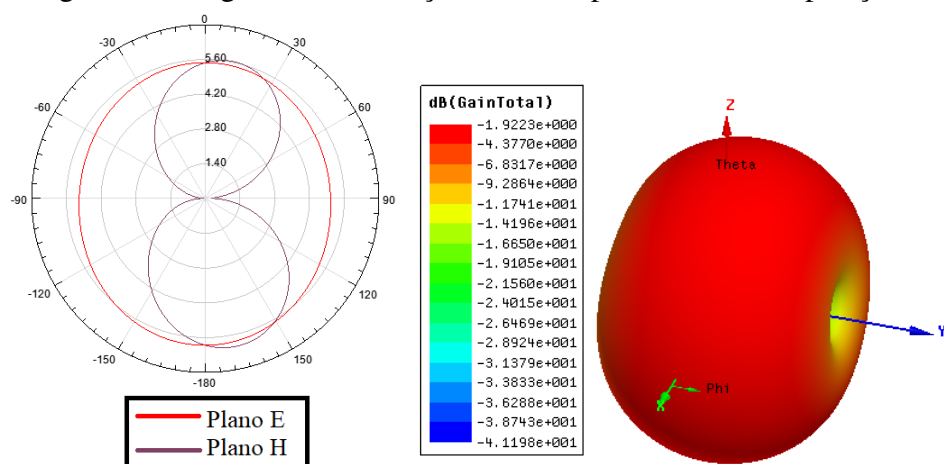
Fonte: O autor

Figura 27: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 4



Fonte: O autor

Figura 28: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena na posição 5



Fonte: O autor

Os valores para o ganho total apresentado nos diagramas de radiação de cada uma destas antenas estão representados na Tabela 5. Com esta tabela podemos notar que a antena com o maior ganho é a antena na posição 3, porém, todas as outras tiveram resultados muito próximos.

Tabela 5: Ganhos das antenas com ressonador circular e plano truncado

Antena	Ganho total (dB)	Antena	Ganho total (dB)
Antena padrão	-1,9324	Posição 3	-1,7670
Posição 1	-1,8835	Posição 4	-1,9738
Posição 2	-1,9538	Posição 5	-1,9223

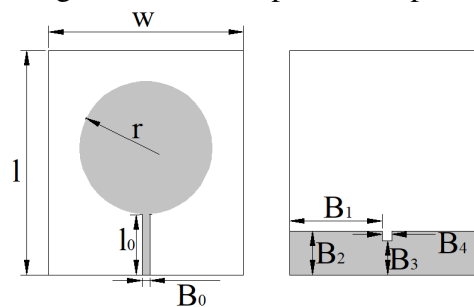
Fonte: O autor

4.1.3 Antenas com ressonador quadrado no plano terra truncado

Os modelos de antena utilizados nessa seção foram modelos de antenas adaptados de uma antena feita para a frequência de 2.6 GHz, porém, com o material que compõe o substrato é o Rogers RO3006TM e a sua espessura é de 1.52 mm, e as camadas de cobre tem espessura de 0.0175 mm. Para as antenas aqui utilizadas, foram mantidas as dimensões do *patch*, porém, aumentamos a espessura do substrato e das camadas de cobre e modificamos o substrato de Rogers RO3006TM para FR4.

As dimensões da antena padrão para este caso estão mostradas na Figura 29 e seus valores estão na Tabela 6.

Figura 29: Antena padrão adaptada



Fonte: O Autor

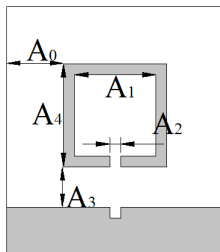
Tabela 6: Dimensões da antena da Figura 29

Representação na figura	Dimensão (mm)
l_0	12.3
r	13.8
B_0	1.58
B_1	19
B_2	9
B_3	7
B_4	2

Fonte: O autor

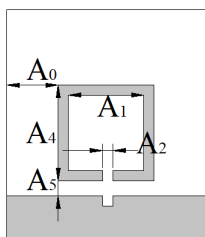
As posições e dimensões dos ressoadores quadrados utilizados nestes modelos de antena estão representadas nas Figuras 30 - 32.

Figura 30: Plano de terra truncado com ressoador 1



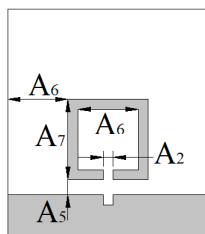
Fonte: O Autor

Figura 31: Plano de terra truncado com ressoador 2



Fonte: O Autor

Figura 32: Plano de terra truncado com ressoador 3



Fonte: O Autor

As dimensões representadas nas Figuras 30 - 32, são as mostradas na Tabela 7.

Tabela 7: Dimensões das figuras 30 - 32

Representação nas figuras	Dimensão (mm)	Representação nas figuras	Dimensão (mm)
A_0	10.5	A_4	19
A_1	15	A_5	3
A_2	2	A_6	12
A_3	7.5	A_7	16

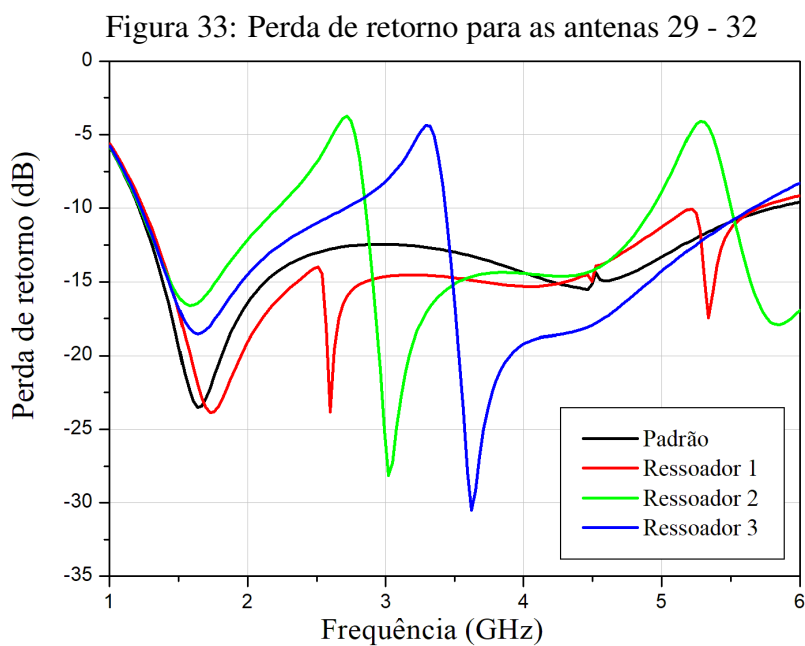
Fonte: O autor

Para as antenas estas antenas o gráfico para representação da perda de retorno está representado na Figura 33. Assim como está na legenda, a antena padrão é a antena da Figura

29, a antena com ressoador 1 está representada na Figura 30, a antena com ressoador 2 está representada na Figura 31 e a antena com ressoador 3 está representada na Figura 32.

As faixas de frequência destas antenas são:

- Para a antena padrão a faixa de frequência é o intervalo de [1.2 GHz - 5.81 GHz];
- Para a antena com ressoador 1 a faixa de frequência é o intervalo de [1.24 GHz - 5.73 GHz];
- Para a antena com ressoador 2 a primeira faixa de frequência é o intervalo [1.24 GHz - 2.21 GHz] e a segunda faixa de frequências é o intervalo [2.85 GHz - 4.92 GHz].
- Para a antena com ressoador 3 a primeira faixa de frequência é o intervalo [1.24 GHz - 2.72 GHz] e a segunda faixa de frequências é o intervalo [3.44 GHz - 5.64 GHz].



Fonte: O autor

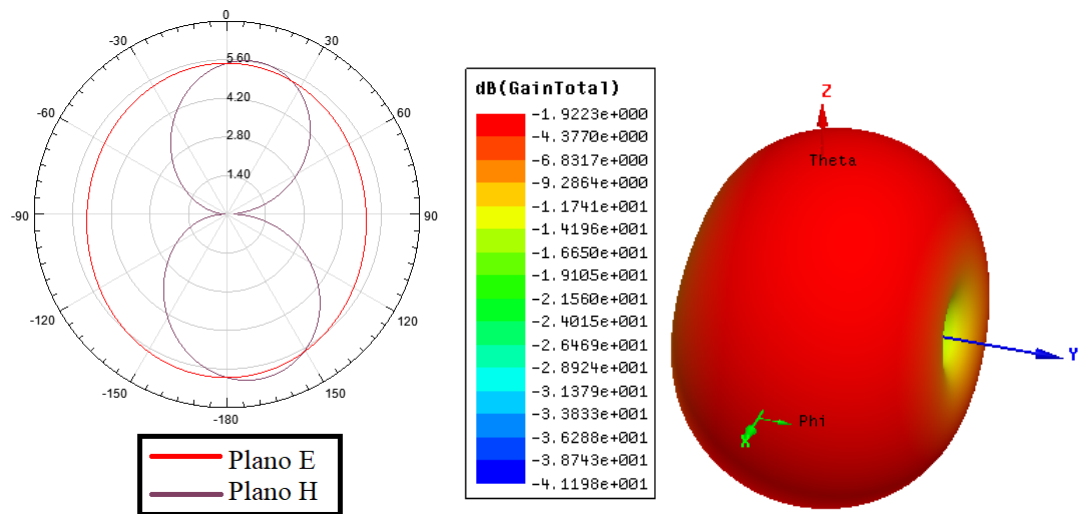
Os diagramas de radiação para este modelo de antena estão representados nas Figuras 34 – 37. Os valores para o ganho total destas antenas estão representados na Tabela 8.

Tabela 8: Ganho das antenas com ressoador quadrado

Antena	Ganho total (dB)
Padrão	-2,2232
Ressorador 1	-2,0234
Ressorador 2	-2,3554
Ressorador 3	-2,0237

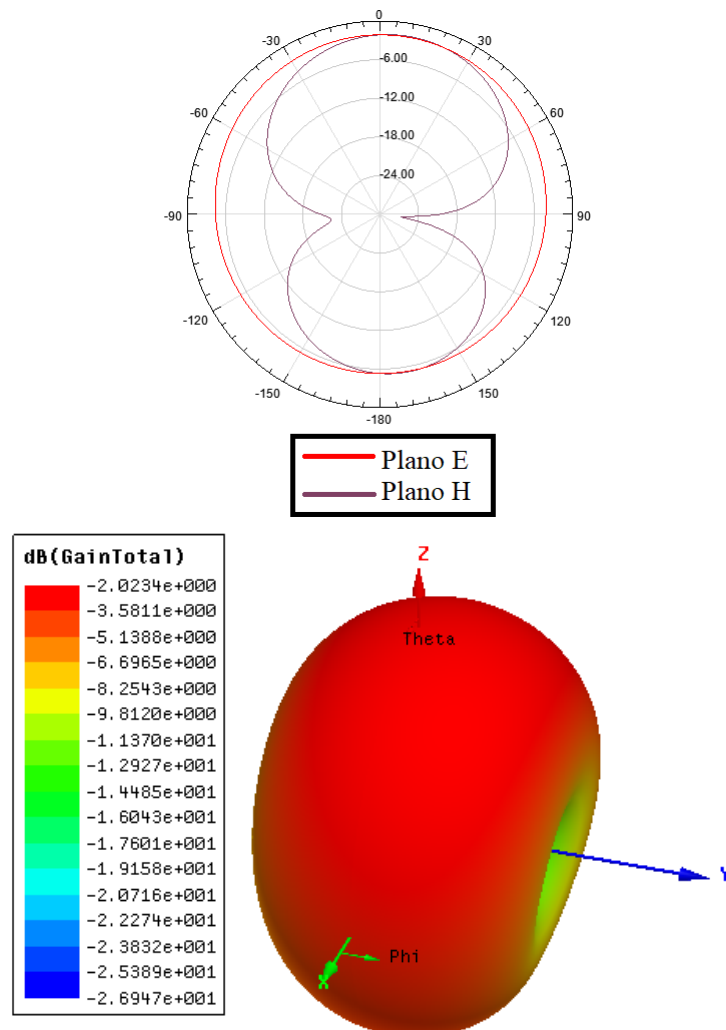
Fonte: O autor

Figura 34: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena padrão



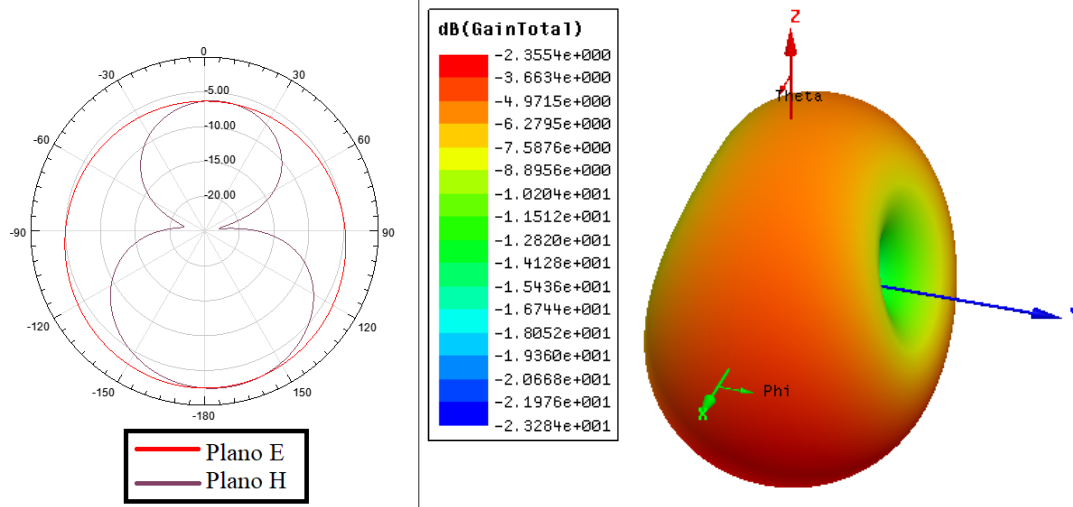
Fonte: O autor

Figura 35: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 1



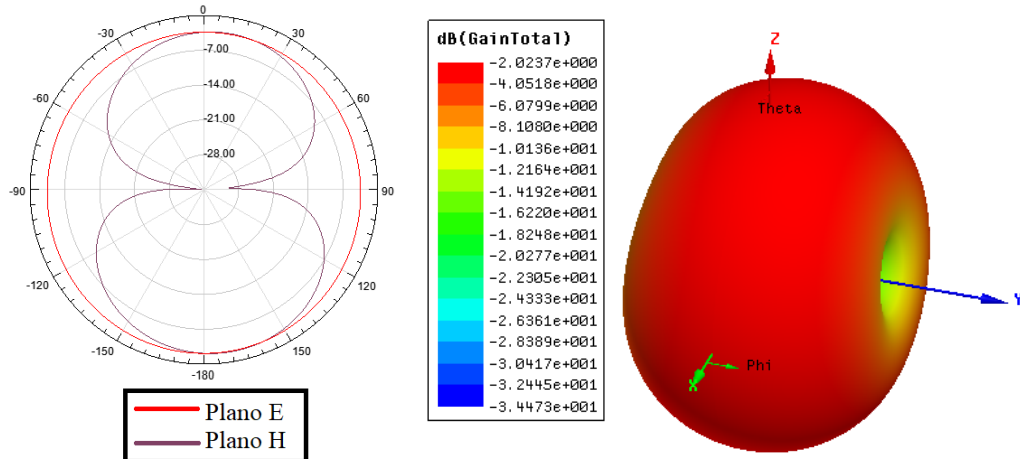
Fonte: O autor

Figura 36: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 2



Fonte: O autor

Figura 37: Diagramas de radiação 2D e 3D para a antena com ressoador 3



Fonte: O autor

Com estes ultimos dados podemos perceber que as antenas com ressoador 1 e 3 apresentam valores para o ganho muito semelhantes, sendo distintos apenas na quarta casa decimal, uma diferença praticamente desprezível, entretanto, a antena com ressoador 1 apresenta o melhor ganho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho tivemos resultados quantitativos no que se refere aos dados para a perda de retorno, o ganho total e o diagrama de radiação obtidos através das simulações para cada um dos modelos de antena os resultados quantitativos, são as larguras de banda para cada um dos modelos de antena, que podem ser vistos nos gráficos representados pelas Figuras 14, 22 e 33, com estes gráficos podemos encontrar os valores da perda de retorno em decibéis (dB) da antena para cada frequência e com isso podemos notar as faixas de frequência em que cada modelo de antena opera, também podemos avaliar qual antena apresentou o melhor casamento de impedância a partir dos resultados obtidos.

Com os diagramas de radiação individuais para as antenas, podemos obter o ganho total em decibéis (dB) para cada antena, além de avaliarmos a forma como a radiação está sendo emitida pelas antenas está se propagando. Pelo gráfico representado na Figura 14 e pela Tabela 4, que apresentam o gráfico para a perda de retorno e os ganhos para as antenas com ressonador circular no *patch* com o plano de terra cheio, podemos notar que as antenas que melhor se ajustaram a frequência de operação da tecnologia 4G, foram as antenas na posição 3, 4, 5 e a antena padrão, já a antena na posição 2, não apresentou nenhuma resposta satisfatória para a faixa de frequências da tecnologia 4G, entre as antenas que melhor se ajustaram a faixa de frequências do 4G, a que apresentou melhor ganho foi a antena padrão, porém, em uma visão geral a antena que apresentou o melhor ganho foi a antena com ressonador na posição 1, entretanto, ela não se ajustou a frequência do 4G, talvez ela possa ser útil para outro tipo de sistema de comunicação.

Para as antenas com ressonador circular no *patch* e plano de terra truncado a Figura 22 e a Tabela 5, mostram que estas antenas apresentaram praticamente a mesma faixa de frequência, que é o intervalo entre 1.2 GHz e 6 GHz, com este resultado podemos notar que o truncamento do plano de terra de uma antena de microfitas é uma técnica muito eficiente para aumentar a faixa de frequência de uma antena de microfitas, além de melhorar a faixa de frequência, o truncamento do plano de terra aumentou significativamente o ganho das antenas 2 e 3, em uma visão geral, a antena com maior ganho neste caso foi a antena com ressonador na posição 3, porém, todas as antenas deste modelo tiveram valores de ganho muito próximos.

Por fim a antena com ressonador quadrado no plano de terra truncado tem seus resultados para a perda de retorno e ganho total apresentado na Figura 33 e na Tabela 8 respectivamente, a partir da Figura 33 podemos notar que devido à presença do ressonador, as antenas funcionam em mais de uma faixa de frequências, podemos notar que o tamanho e a posição dos ressonadores influenciou bastante no tamanho e nas posições das faixas de frequência, pela Tabela 8 notamos que a antena que apresentou o melhor ganho foi a antena com ressonador 1.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, H. D. de. *Desenvolvimento de um Ressonador Retangular de Fenda com Múltiplas Camadas de Substrato e com Utilização de Material PBG para Sistema de Comunicação Sem Fio*. Tese (Doutorado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.
- BAHL, I. J.; BHARTIA, P. *Microstrip Antennas*. 2^a. ed. [S.l.]: Artech House Publishers, 1982.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc, 2005.
- BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 9. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons. Inc, 2009.
- BRINHOLE, E. R. *Determinação da frequência de ressonância de antenas tipo microfita triangular e retangular utilizando redes neurais artificiais*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista, 2005.
- CARVER, K. R.; MINK, J. W. Microstrip antenna technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 29, n. 1, p. 2–24., 1981.
- DESCHAMPS, A. G. Microstrip microwave antennas. 3^a *USAF Symposium on Antennas*, 1953.
- IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, p. 1–50, Março 2014.
- ITOH, T.; MENZEL, W. A full-wave analysis for open microstrip structures. In: *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. [S.l.: s.n.], 1981. p. 63–68.
- JAMES, J. R.; HALL, P. S. *Handbook of Microstrip Antennas*. [S.l.]: London: Peter Peregrinus Ltd, 1989.
- LAVOR, O. P. *Bi Anisotropia em Antenas de Microfita Retangular e Estruturas Circulares Modificadas*. Tese (Doutorado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2015.
- MORAIS, J. H. C. de. *Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga Para Aplicação em Dispositivos móveis e portáteis*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.
- OLIVEIRA, M. A. et al. Análise paramétrica em uma antena de patch retangular de microfita com fendas. *Revista INNOVER*, v. 1, n. 4, p. 48–60, 2014.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. 2011, 2011.
- RAY, K. P.; KUMAR, G. *Broadband Microstrip Antennas*. Boston, London: Artech House, 2003.

SANTOS, H. W. dos. *Desenvolvimento de Antenas de Microfita Miniaturizadas com Polarização Circular Para um Sistema de Comunicações Sem Fio*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2016.

SILVEIRA, R. V. L. da. Um estudo teórico sobre o uso das antenas de microfita. v. 1, 2016. ISSN 2358-8829.

ZAIDI, A. et al. Design and optimization of an inset fed circular microstrip patch antenna using dgs structure for applications in the millimeter wave band. In: *2016 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 99–103.