



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ÍTALO GONÇALVES BARBOSA

**PROJETOS DE ANTENAS INSPIRADAS EM TOPOLOGIAS
METAMATERIAIS COM GRAFITE**

PALMAS - TO
2020

ÍTALO GONÇALVES BARBOSA

**PROJETOS DE ANTENAS INSPIRADAS EM TOPOLOGIAS
METAMATERIAIS COM GRAFITE**

Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo.

PALMAS - TO
2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

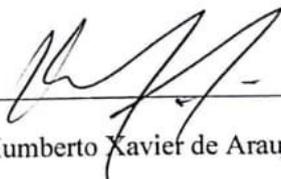
ÍTALO GONÇALVES BARBOSA

PROJETOS DE ANTENAS INSPIRADAS EM TOPOLOGIAS METAMATERIAIS COM GRAFITE

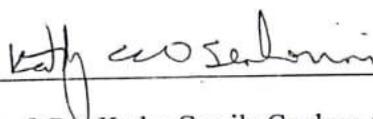
Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas. Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 29 / 02 / 20

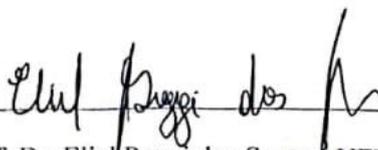
Banca Examinadora



Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo, UFT.



Prof. Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, UFT.



Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT.

Palmas, 2020

*Viver e não ter a vergonha de ser feliz,
Cantar e cantar e cantar,
A beleza de ser um eterno aprendiz!
Dedicado a memórias.*

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Ecicleide Leonila Oliveira Gonçalves, que sempre realizou o possível e o impossível para que essa graduação fosse consagrada. Por todos os ensinamentos que me foram passados, por toda a educação que me foi dada, por todo o amor e carinho que sempre transbordou em seu peito, sempre sendo a minha maior inspiração, companhia e exemplo de ser humano.

Ao meu pai José Boaventura Barbosa, que mesmo não estando presente neste mundo físico deixou ensinamentos e memórias inesquecíveis em minha mente, um homem incrível, um pai que será amado eternamente, tenho muito orgulho de ser seu filho!

A minha avó Maria Lídia, por ter sido tudo o que foi, apenas quem teve o privilégio de conviver com esse exemplo de mulher sabe o quão importante foi a sua existência.

A toda a minha família que sempre me apoiou para que as minhas conquistas fossem concretizadas, em todos os momentos difíceis, em todos os momentos de alegria e felicidade, sou muito feliz e agradecido por saber que tenho uma família maravilhosa. Um agradecimento em especial para Edivânia Boaventura Barbosa, por tudo que já foi feito por mim, sou extremamente grato e feliz por ter você em minha vida!

A todos os meus amigos, que ao longo da minha vida se tornaram parte da minha família, por todos os momentos vividos, por todas as dificuldades que passamos juntos, que com certeza nos fortaleceram.

RESUMO

A comunicação rápida e eficiente se tornou algo indispensável nos dias atuais, cada vez mais o ser humano sente a necessidade de se comunicar através de conexões sem fio onde quer que esteja. Visto isso, este presente trabalho visa aprimorar o desempenho da comunicação sem fio através de topologias metamateriais em antenas planares com uma frequência de ressonância de 2,4 GHz, bem como a aplicação de grafite em sua estrutura física. Para tal, simulações foram feitas através do *software* CST Studio, aplicando estruturas metamateriais em diferentes partes da antena, como o substrato, *patch* e plano terra. Os resultados obtidos após a conclusão deste trabalho demonstram que as aplicações são efetivas e otimizam o desempenho da antena em seus parâmetros básicos.

Palavras-chaves: Antena planar. Metamateriais. Grafite.

ABSTRACT

The fast and efficient communication has become something indispensable nowadays, more and more the human being feels the need to communicate through wireless connections wherever he is. Therefore, this work aims to improve the performance of wireless communication through metamaterial topologies in planar antennas with a resonance frequency of 2,4 GHz, as well as the application of graphite in its physical structure. To this end, simulations were performed using the CST Studio software, applying metamaterial structures to different parts of the antenna, such as the substrate, patch and ground plane. The results obtained after the completion of this work demonstrate that the applications are effective and optimize the performance of the antenna in its basic parameters.

Key-words: Planar antenna. Metamaterials. Graphite..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura - 1: Antena planar retangular de microfita	21
Figura - 2 Linhas de campo na <i>microstrip</i>	22
Figura - 3 Permissividade elétrica efetiva	22
Figura - 4 <i>Design</i> do <i>Patch</i>	23
Figura - 5: <i>Inset feed</i> e <i>microstrip</i> acoplada	25
Figura - 6: Arranjo de condutores paralelos	27
Figura - 7: Ressonador SRR em formato circular	27
Figura - 8: Células Metamateriais	28
Figura - 9: Camadas de Grafeno.....	29
Figura - 10: Dimensões da Antena Base.	30
Figura - 11: Perda por retorno da Antena Base.	31
Figura - 12: Diretividade da Antena Base.	32
Figura - 13: Ganho da Antena Base.....	32
Figura - 14: Modelo com aplicação na <i>microstrip</i>	33
Figura - 15: Perda por retorno da Antena Base com grafite.....	33
Figura - 16: Diretividade da Antena Base com grafite.....	34
Figura - 17: Ganho da Antena Base com grafite.	34
Figura - 18: Modelo com aplicação no <i>patch</i>	35
Figura - 19: Perda por retorno da Antena Base com grafite no <i>patch</i>	35
Figura - 20: Diretividade da Antena Base com grafite no <i>patch</i>	36
Figura - 21: Ganho da Antena Base com grafite no <i>patch</i>	36
Figura - 22: Modelo com aplicação no substrato.	37
Figura - 23: Perda por retorno da Antena Base com grafite no substrato.	37
Figura - 24: Diretividade da Antena Base com grafite no substrato.	38
Figura - 25: Ganho da Antena Base com grafite no substrato.....	38
Figura - 26: Estrutura CLL (<i>Capacitively Load Loop</i>).....	39
Figura - 27: Aplicação da estrutura CLL na Antena Base.....	40
Figura - 28: Perda por retorno da Antena Base com estrutura CLL.....	40
Figura - 29: Diretividade da Antena Base com estrutura CLL.....	41
Figura - 30: Ganho da Antena Base com estrutura CLL.	41
Figura - 31: Estrutura metamaterial ELC	42
Figura - 32: Aplicação da estrutura ELC na Antena Base.....	43

Figura - 33: Perda por retorno da Antena Base com estrutura ELC.....	43
Figura - 34: Diretividade da Antena Base com estrutura ELC.....	44
Figura - 35: Ganho da Antena Base com estrutura ELC.	44
Figura - 36: <i>Compact SRR (Split Ring Resonator)</i>	45
Figura - 37: Aplicação da estrutura <i>Compact SRR</i> na Antena Base.	46
Figura - 38: Perda por retorno da Antena Base com estrutura <i>Compact SRR</i>	46
Figura - 39: Diretividade da Antena Base com estrutura <i>Compact SRR</i>	47
Figura - 40: Ganho da Antena Base com estrutura <i>Compact SRR</i>	47
Figura - 41: Estruturas <i>Mushroom EBG</i>	48
Figura - 42: Aplicação da estrutura EBG <i>Mushroom</i> na Antena Base.....	49
Figura - 43: Perda por retorno da Antena Base com estrutura EBG <i>Mushroom</i>	49
Figura - 44: Diretividade da Antena Base com estrutura EBG <i>Mushroom</i>	50
Figura - 45: Ganho da Antena Base com estrutura EBG <i>Mushroom</i>	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Análise da perda por retorno.	51
Gráfico 2: Análise da diretividade.	51
Gráfico 3: Análise do ganho.	52
Gráfico 4: Análise da eficiência.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela - 1: Comparativo entre os resultados de radiação.	53
Tabela - 2: Comparativo entre a largura de banda de cada antena.	53
Tabela - 3: Comparativo entre as simulações com CLL.	54
Tabela - 4: Comparativo entre as simulações com SRR.	54
Tabela - 5: Comparativo entre as simulações com ELC.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLL	<i>Capacitively Load Loop</i>
EBG	<i>Electromagnetic Bandgap</i>
ELC	<i>Electric-Field-Coupled</i>
SRR	<i>Split Ring Resonator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade magnética
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
ε	Permissividade elétrica
ε_r	Permissividade elétrica relativa
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
f_r	Frequência de ressonância
k_0	Número de onda de corte
η_{rad}	Eficiência de radiação
Γ	Coefficiente de reflexão
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Metodologia	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Parâmetros Básicos.....	18
2.1.1	Diretividade	18
2.1.2	Ganho.....	19
2.1.3	Perda por Retorno	20
2.2	Antena Planar	20
2.2.1	Antena planar retangular.....	21
2.3	Metamateriais	26
2.4	Grafite.....	28
3	ESTRUTURAS BASE	30
3.1	Antena Planar	30
3.2	Antena Planar com aplicações de grafite	32
3.3	Estruturas Metamateriais.....	39
3.3.1	CLL (Capacitively Load Loop).....	39
3.3.2	ELC (<i>Electric-Field-Coupled</i>).....	41
3.3.3	<i>Compact SRR (Split Ring Resonator)</i>	44
3.3.4	EBG (<i>Electromagnetic Bandgap</i>)	47
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

3 INTRODUÇÃO

A comunicação rápida e eficiente se tornou algo indispensável nos dias atuais, cada vez mais o ser humano sente a necessidade de trocar grandes quantidades de informações onde quer que esteja. Visto isso, para atender esta demanda, pode-se observar uma constante evolução na transmissão e recepção de sinais via conexões sem fio ou *wireless*. Antes deste tipo de comunicação sem fio, as redes de computadores e telecomunicações se restringiam à ambientes confinados e fixos, impossibilitando a flexibilidade e mobilidade do usuário. Através da rede *wireless*, a exemplo da comunicação via telefone móvel, é possível proporcionar ao usuário um certo conforto e liberdade bastante diferentes do que era convencional, representando uma mudança significativa não só nos ambientes de trabalho, mas também em seus lares (CAPOVILLA, 2004).

Através dessa evolução, os aparelhos eletrônicos responsáveis pela troca de dados se tornaram cada vez menores, mais leves e eficientes, proporcionando ao usuário uma maior mobilidade e autonomia. As antenas planares são comumente utilizadas neste tipo de aparelho, por apresentarem características compatíveis com essa necessidade, com tamanho reduzido e perfil fino, além de possuírem baixo custo de fabricação (GUELBER, 2014).

Contudo, como qualquer elemento não ideal, algumas características indesejadas nesta aplicação podem ser observadas, como a baixa eficiência e potência, baixa pureza de polarização, baixo desempenho de varredura, falsa radiação de alimentação e uma banda de frequência bastante estreita (MISRA; ARGAWAL; ARGAWAL, 2015).

Visando aprimorar as limitações apresentadas ou alterar características de acordo com a necessidade da aplicação das antenas planares, alguns métodos podem ser aplicados. Através de modificações na estrutura da antena planar, como modificar a geometria do radiador, fazer cavidades na superfície do radiador ou no plano terra ou até mesmo introduzir novos materiais no substrato, é possível obter como resultado uma otimização de parâmetros como largura de banda e o ganho (GUELBER, 2014). O problema da baixa eficiência pode também estar relacionado com o descasamento de impedância, que pode ser solucionado, no caso de antenas planares de microfita, através de técnicas como a linha de recesso (*Inset feed*), transformador de um quarto de onda e o

método da linha deslocada (MAMEDES *et al.*, 2017). A utilização de substratos com alta permissividade, por exemplo, faz com que a frequência de operação de uma antena *patch* sofra um deslocamento, permitindo que ela opere em frequências menores (ARAÚJO, 2009).

A inserção de metamateriais também pode trazer benefícios para os parâmetros de uma antena planar, visando aprimorar aquele que seja mais necessário para a aplicação desejada, seja o aumento do ganho, a sintonização em uma frequência desejada, ou até mesmo a criação de uma faixa de rejeição (GUELBER, 2014).

Dentro deste contexto, neste trabalho serão utilizadas estruturas metamateriais e grafite, aplicando-os no plano terra, na superfície condutora e no substrato de uma antena planar de microfita, para otimizar os seus principais parâmetros.

1.1 Justificativa

Em aplicações onde o tamanho, peso, custo de fabricação, desempenho, facilidade de instalação e formato aerodinâmico são restrições, como rádio móvel, comunicação sem fio e até mesmo em satélites e espaçonaves, as antenas de baixo perfil podem ser utilizadas (BALANIS, 2005).

Além de possuir restrições físicas em certas aplicações, as antenas planares também possuem restrições com relação ao seu desempenho, como ganho e diretividade elevados para um funcionamento apropriado em comunicação aérea (SILVA, 2018). A fim de aprimorar o desempenho deste tipo de antena, a tecnologia metamaterial pode ser aplicada. Pesquisas relacionadas a aplicação de metamateriais em telecomunicações, incluindo linhas de transmissão e antenas vêm ganhando força nos últimos 20 anos (ARAÚJO; BARBIN; KRETLY, 2012).

Assim, as antenas de microfita devem ser projetadas para atender estas restrições, mantendo suas características básicas de perfil baixo e em uma constante busca por otimização de desempenho, para melhor suprir as necessidades de suas aplicações, o que justifica a realização deste trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Otimizar os principais parâmetros de uma antena planar de microfita, tais como ganho, diretividade e principalmente perda por retorno, através da aplicação de grafite em sua fabricação e em topologias metamateriais, bem como analisar os impactos deste material na construção da antena.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento de uma antena planar quando aplicadas estruturas metamateriais;
- Analisar o comportamento de uma antena planar quando aplicado grafite em sua composição;
- Realizar comparações entre diferentes topologias metamateriais quando aplicadas em uma antena planar;
- Realizar comparações entre diferentes compostos metamateriais com mesma topologia.

1.3 Metodologia

A primeira parte deste trabalho consiste em um levantamento bibliográfico, iniciando pelos métodos matemáticos para o projeto de uma antena planar, e a observação do seu comportamento com relação a radiação de ondas eletromagnéticas, em seguida, estudos relacionados com diferentes topologias metamateriais, analisando sua composição geométrica e modelagem, para, por fim, propor uma revisão contendo as principais características do grafite e sua aplicação em telecomunicações.

Após a conclusão da parte bibliográfica é dado início ao projeto da antena planar e das estruturas metamateriais a serem aplicadas, através de cálculos e modelagem computacional. Em seguida, foram feitas simulações com o que foi projetado, analisando os parâmetros e benefícios de cada topologia.

Através dos resultados das simulações foi escolhida uma antena para ser fabricada e analisada, comparando os dados experimentais com os simulados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Parâmetros Básicos

O desempenho de uma antena planar é analisado através dos seus parâmetros básicos, que podem influenciar com um impacto bastante significativo na eficiência de todo o sistema, e por consequência, influenciar em outros aspectos como custo e fabricação.

O principal objetivo do processo de modelagem de antenas é garantir que o produto modelado obtenha os melhores resultados com base nos parâmetros essenciais desejados para a sua utilização. Tais parâmetros além de aferidos através de instrumentos de medição podem ser interpretados e modelados por métodos analíticos e matemáticos, apesar de apresentarem certa complexidade no geral.

4.1.1 Diretividade

O conceito de diretividade pode ser definido como a densidade de potência irradiada em uma determinada direção, a uma distância fixa, com relação a quantidade de potência irradiada por uma antena isotrópica, ou seja, uma antena que irradia a mesma densidade de potência em todas as direções considerando uma distância fixa entre a antena e o ponto de referência (STUTZMAN, 1998). Lembrando que uma antena isotrópica é apenas um conceito hipotético, utilizado com a finalidade de servir como referência para certos parâmetros.

A definição matemática para a diretividade pode ser representada por uma relação entre a potência radiada e a intensidade de radiação, obtida inicialmente através do Vetor de Poynting da densidade de potência (POZAR, 2012).

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

Em que D é o valor da diretividade, U é intensidade de radiação e P_{rad} é a potência irradiada pela antena. Vale ressaltar que este conceito também é válido para antenas receptoras, utilizando uma interpretação análoga à antenas transmissoras.

4.1.2 Ganho

As antenas são constituídas por materiais condutores, portanto apresentam um valor de resistência, o que ocasiona em perdas por condução. Tais perdas resultam em uma diferença entre a potência recebida pela antena e a potência irradiada, mesmo que pequena em alguns casos. Sendo assim, é possível definir uma eficiência de radiação através desta relação entre potências (POZAR, 2012).

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \quad (2)$$

Onde P_{rad} é a potência radiada pela antena, P_{in} é a potência fornecida para a antena e P_{loss} é potência dissipada.

A diretividade de uma antena é uma função apenas da forma do padrão de radiação, não leva em consideração as perdas na própria antena, portanto, a definição de ganho é dada pelo valor da diretividade em produto com a eficiência de radiação (POZAR, 2012).

$$G = \eta_{rad} \times D \quad (3)$$

Assim o ganho sempre será menor que a diretividade, ou igual nos casos em que não houver perdas consideráveis. Vale ressaltar, segundo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*, que o valor do ganho não engloba perdas exteriores à antena, como perdas por descasamento de impedância e de polarização (BASTIDAS, 2016).

4.1.3 Perda por Retorno

Supondo uma linha de transmissão excitada por uma onda incidente do tipo $V_0^+ e^{-j\beta z}$ que é gerada por uma fonte quando $z < 0$, a impedância característica da linha é Z_0 e a carga associada no final da linha possui impedância Z_L (POZAR, 2012).

Analisando o conceito de função de transferência, que pode ser definido como a razão entre o sinal de saída e o sinal de entrada, é possível afirmar que a potência entregue pela linha de transmissão será máxima quando $Z_0 = Z_L$. Quando esta condição não for respeitada, verifica-se que a tensão e a corrente na linha consistem em uma superposição de onda incidente e uma onda refletida, que é chamada de onda estacionária (POZAR, 2012).

O coeficiente de reflexão de tensão pode ser calculado e dado pela seguinte equação (POZAR, 2012):

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4)$$

Portanto a perda por retorno pode ser definida como a energia disponível do gerador que não é entregue à carga, sendo refletida devido ao descasamento de impedância entre a linha de transmissão e a carga acoplada, podendo ser representada matematicamente pela seguinte expressão (POZAR, 2012):

$$RL = -20 \text{Log}|\Gamma| \text{ dB} \quad (5)$$

4.2 Antena Planar

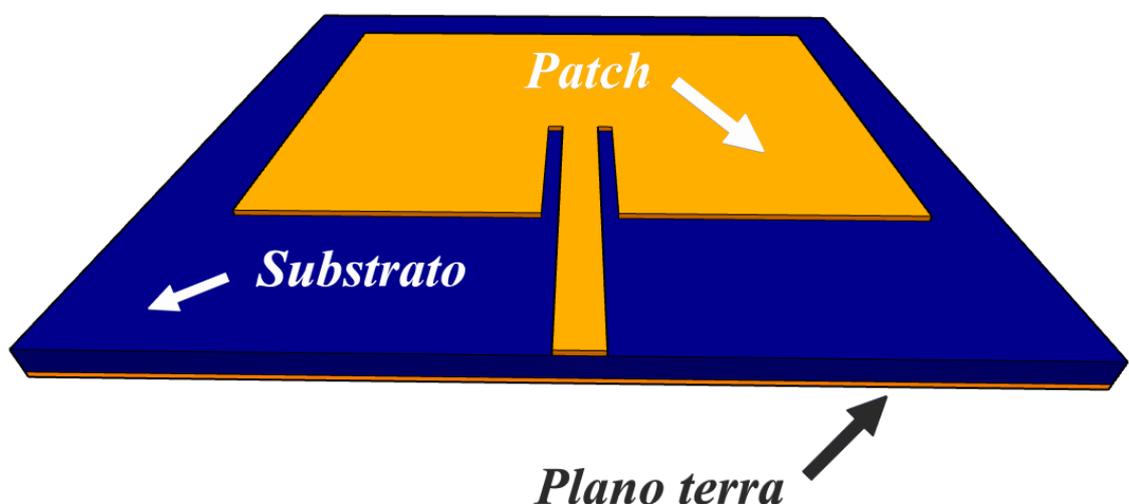
Desde o primeiro trabalho relacionado com transmissão de sinais via antena planar que foi posposto por Deschamps em 1953 nos Estados Unidos da América, vários estudos foram realizados com relação à esta ferramenta, ao longo do tempo, recebendo atenção considerável a partir dos anos 70 (BALANIS, 2005).

Em sua configuração mais básica, a antena planar consiste em um *patch* radiante em um dos lados do substrato dielétrico, enquanto no outro lado existe um plano de terra (CAPOVILLA, 2004), geralmente alimentado por uma linha de microfita.

Este tipo de antena pode apresentar formatos variados para o *patch*, parte condutora radiante da antena, como exemplo a forma retangular, que será abordada neste trabalho, a circular ou até mesmo ser formada por um agrupamento fractal. A Fig. 1 exemplifica um modelo de antena planar com *patch* em formato retangular.

4.2.1 Antena planar retangular

Figura - 1: Antena planar retangular de microfita

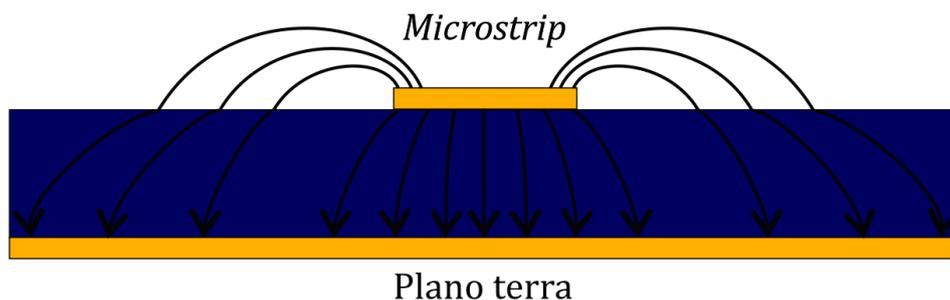


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como existem variadas formas de antenas planares, existem diversos métodos de análises para determinar seus principais parâmetros de resposta a aplicação de sinais, bem como seus parâmetros físicos.

Segundo Balanis (2005) o modelo de análise de linha de transmissão é bastante utilizado em meio acadêmico devido a sua simplicidade em relação a outros métodos, demonstrando as componentes físicas, contudo, apresentando certa dificuldade no acoplamento e imprecisão de resultados.

Neste modelo, a antena planar é observada como uma *microstrip*, em que o comprimento e a largura do *patch* assumem dimensões finitas, sendo assim os campos nas bordas da superfície condutora passam por franjas, cuja quantidade está relacionada com as dimensões do *patch* e a altura do substrato (BALANIS, 2005). A Fig. 2 exemplifica as linhas de campo em um modelo *microstrip*, exibindo claramente o efeito de borda.

Figura - 2 Linhas de campo na *microstrip*.

Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

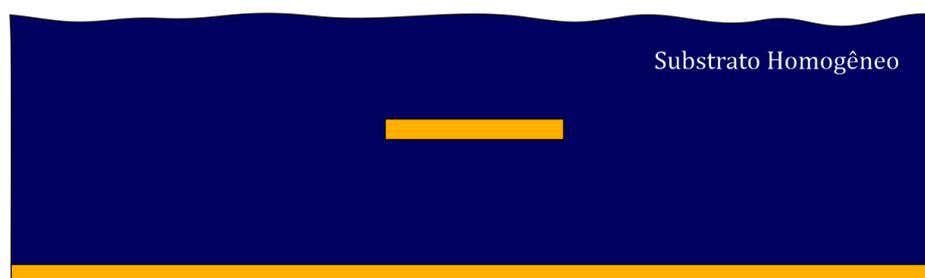
Através da análise na Fig. 2, é possível afirmar que as linhas de campo elétrico parecem mais largas eletricamente do que fisicamente, devido as franjas de borda, sendo a sua maior concentração no substrato (BALANIS, 2005).

Devido ao efeito de borda, as linhas de campo percorrem dois meios de permissividade elétrica distintos, se comportando de forma singular em cada meio, por esta razão a *microstrip* não suporta uma onda TEM pura, os campos exatos desta linha constituem uma onda híbrida TE-TM e exigem algumas técnicas de análise mais avançadas (POZAR, 2012), sendo assim, ao realizar a análise do comportamento elétrico do centro condutor, é necessário calcular uma permissividade efetiva entre os dois meios.

Vale ressaltar que essa constante dielétrica efetiva é função da frequência ressonante no sistema, conforme a frequência aumenta, as linhas de campo elétrico tendem a se concentrar no substrato (BALANIS, 2005).

Sendo assim, a linha de condução *microstrip* se comporta como se estivesse submersa em um substrato homogêneo de permissividade elétrica “ ϵ_{ref} ”, de modo que as linhas de campo fluam apenas por este material. A Fig. 3 exemplifica o modelo *microstrip* submerso em um meio homogêneo.

Figura - 3 Permissividade elétrica efetiva



Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

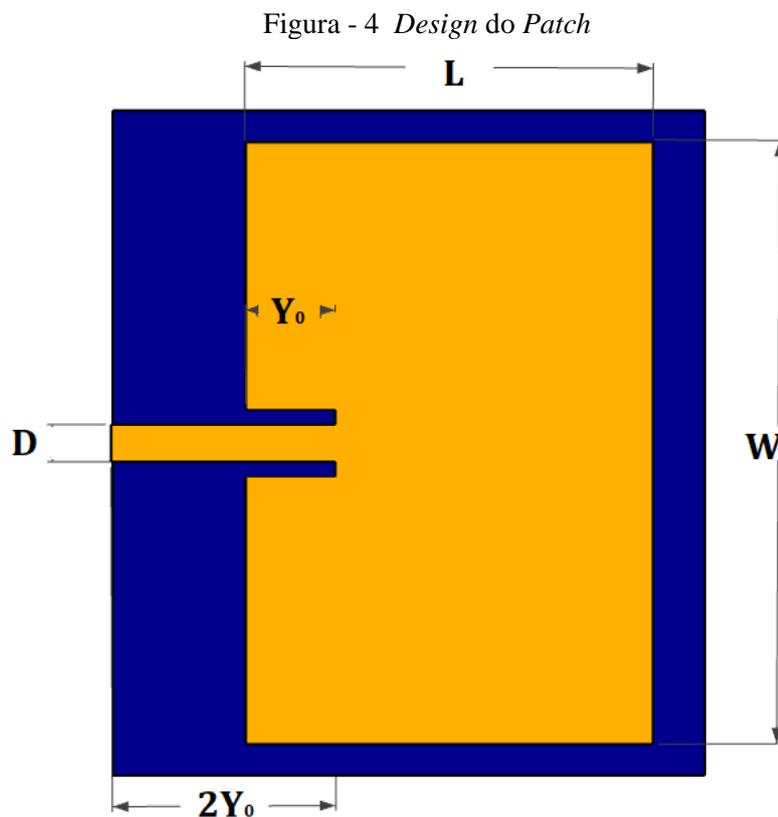
Através desta análise, onde a linha *microstrip* está completamente envolta pelo substrato homogêneo, os valores aproximados iniciais da constante dielétrica efetiva em baixas frequências pode ser dado pela equação, considerando h como a espessura do substrato e W como a largura da antena, observada como *microstrip*:

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

Respeitando a seguinte condição:

$$\frac{W}{h} > 1 \quad (7)$$

Baseado neste princípio algumas formulações aproximadas para projeto do *patch* de antenas planares de microfita em formato retangular podem ser descritas, conforme demonstradas a seguir (BALANIS, 2005). A Fig. 4 exemplifica tal antena, detalhando suas dimensões físicas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A largura do *patch* é representada por W e pode ser definida por:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (8)$$

O parâmetro ΔL é uma relação entre W e h , tendo seu valor a partir de:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (9)$$

Através de ΔL podemos encontrar o valor de L , que é o comprimento do *patch*:

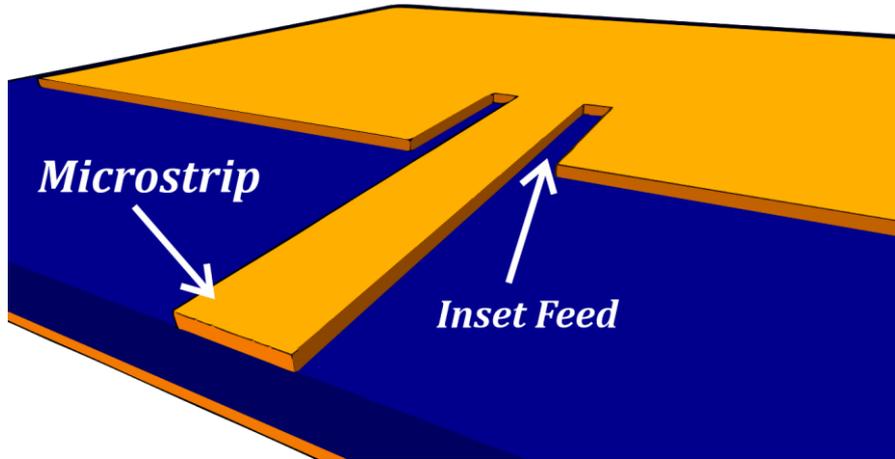
$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (10)$$

Para alimentar o *patch* radiante pode ser utilizada uma linha de microfita (*microstrip line*) com um condutor de mesma espessura. A ideia é utilizar uma alimentação que possua a mesma impedância da parte radiante, assim é possível obter uma maior eficiência na transmissão de potência e, por isso, suas dimensões devem ser calculadas para tal fim (POZAR, 2012).

A impedância característica da *microstrip line* pode ser calculada, sendo D a largura da linha conforme a Fig. 4 e h a espessura do substrato (Adaptado de POZAR, 2012):

$$Z_0 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left(\frac{8h}{D} + \frac{D}{4h} \right) \quad \text{for } \frac{D}{h} \leq 1; \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{D}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{D}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad \text{for } \frac{D}{h} \geq 1. \end{array} \right\} \quad (11)$$

A resistência de entrada do *patch* pode ser alterada através de um *inset feed*, um recorte na superfície condutora exibido pela Fig. 5, sendo uma técnica efetivamente usada para acoplá-lo a uma linha *microstrip* (BALANIS, 2005), realizando o casamento de impedância a fim de obter a melhor transferência de potência possível.

Figura - 5: *Inset feed* e *microstrip* acoplada

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 5 exibe a *microstrip* acoplada no *patch* radiante, bem como seus recortes para casamento de impedância. O seu comprimento da linha pode ser considerado como o dobro do parâmetro Y_0 , enquanto que o tamanho do *inset feed* é apenas Y_0 , seu valor pode ser obtido através da equação sugerida por Balanis (Adaptado, 2005), que utiliza a resistência de entrada do *patch*:

$$R_{in}(Y = Y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} Y_0\right) \quad (12)$$

Em que G_1 corresponde a condutância da *microstrip* em termos físicos, não levando em consideração a franjas ocasionadas pelo efeito de borda e G_{12} está relacionada a condutância mútua, tendo seus valores através das equações (8) e (9) (BALANIS, 2005):

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

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta \, d\theta \quad (14)$$

Quando I_1 :

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta \, d\theta \quad (15)$$

Sendo k_0 o número de onda de corte.

4.3 Metamateriais

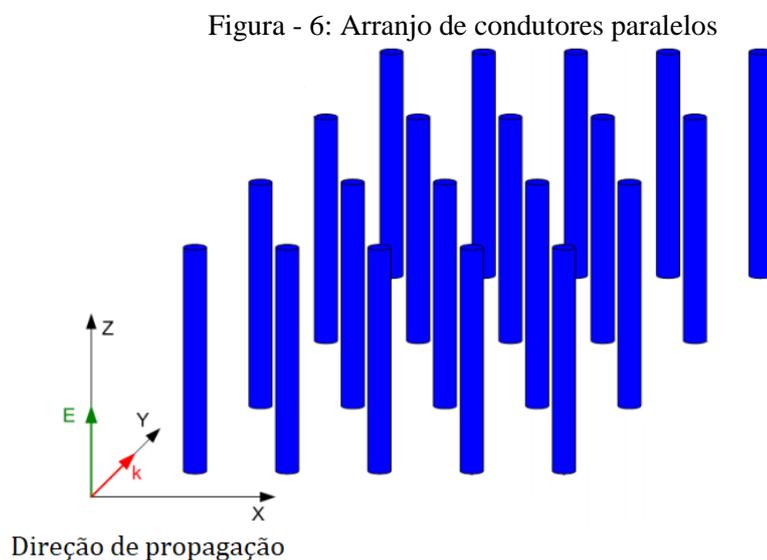
O conceito de metamateriais é bastante discutido no meio acadêmico e, apesar de vários cientistas concordarem com algumas características relacionadas ao tema, sua definição exata ainda é algo delicado de ser afirmado. Segundo Filippo Capolino (2009) a palavra metamaterial é mencionada no projeto de arranjos de antenas, elementos de antena, linhas de transmissão e outros componentes de micro-ondas sem um fundo sólido pra este termo, sendo até mesmo frequentemente utilizado para designar um *design* incomum de um componente.

Contudo, algumas características comuns podem ser encontradas em diferentes linhas de pesquisas, comportamentos incomuns que não são encontrados em materiais provenientes da natureza, definidas pelos parâmetros constitutivos permeabilidade magnética (μ) e permissividade elétrica (ϵ), ambas apresentando valores negativos (CAPOLINO, 2009).

O cientista russo Veselago em 1968 descreveu teoricamente em um artigo científico como seriam os efeitos de uma onda eletromagnética sendo propagada por um material que possui permeabilidade e permissividade com valores negativos (VESELAGO, 1968), afirmando que seu comportamento seria diferente dos materiais convencionais, em que uma onda se propagando uniformemente em tal meio, a direção do vetor de Poyting é antiparalelo à direção da velocidade de fase, ao contrário da propagação de uma onda plana em um meio convencional (LUCENA, 2010). Nesta mesma publicação, Veselago ressalta que os estudos relacionados a eletrodinâmica dos materiais que possuem tais parâmetros são sem dúvidas de interesse em pesquisas, mesmo não possuindo essas substâncias disponíveis na época, considerando o assunto puramente formal (VESELAGO, 1968).

A priori, materiais eram criados com tais características separadamente, ou possuíam permissividade ou permeabilidade negativa. Um arranjo de fios condutores

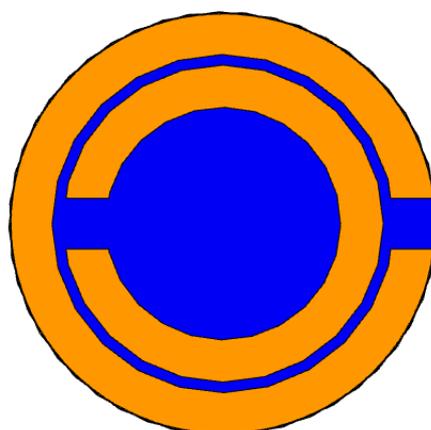
paralelos descritos por Rotman (1962) é exibido pela Fig. 6, onde a permissividade elétrica é negativa e os modos propagantes obedecem a uma relação de dispersão análoga à de um plasma neutro (SARTORI, 2004).



Fonte: Adaptado de Lucena, 2010 (apud Rotman, 1962).

Um material com permeabilidade magnética negativa só foi desenvolvido em 1999 por Pendry, através de um arranjo periódico de ressonadores no formato de um semicírculo com uma pequena abertura, bastante parecidos com a letra “C”, ilustrado pela Fig. 7 e denominados SRR (*Split Ring Resonator*), com a condição de que o comprimento de onda a ser utilizado fosse maior que os elementos e o espaçamento da rede compreendida pelos mesmos (SARTORI, 2004).

Figura - 7: Ressonador SRR em formato circular

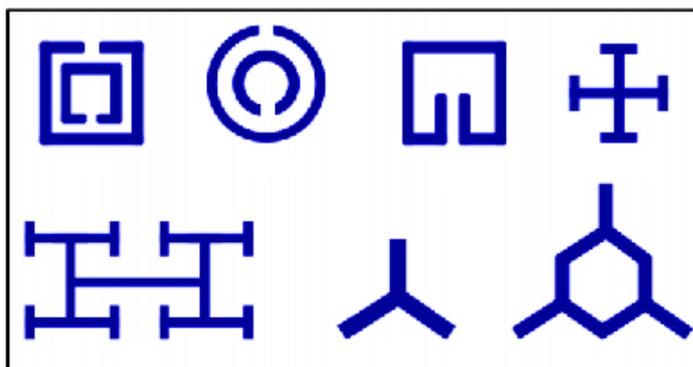


Fonte: Adaptado de Pendry, 1999.

Um único SRR circular age como um dipolo magnético, apresentando uma corrente circulando nos anéis e um padrão de campo magnético fluindo. As linhas de corrente induzida passaram de um anel para o outro através das lacunas capacitivas entre eles, na forma de correntes de linha de deslocamento de campo, tais lacunas podem ser observadas como as falhas nos anéis apresentados pela Fig. 7 (MARQUÉS *et al.*, 2003).

De uma forma geral, as estruturas metamateriais são complexas e exigem métodos matemáticos avançados, geralmente feitos através de análise computacional, para determinar suas dimensões específicas, dependendo de parâmetros como frequência de ressonância, permissividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais em que forem inseridos e capacidade de condução elétrica. Algumas dessas estruturas são apresentadas na Fig. 8:

Figura - 8: Células Metamateriais



Fonte: Adaptado de Guelber, 2014 (apud Capolino, 2009).

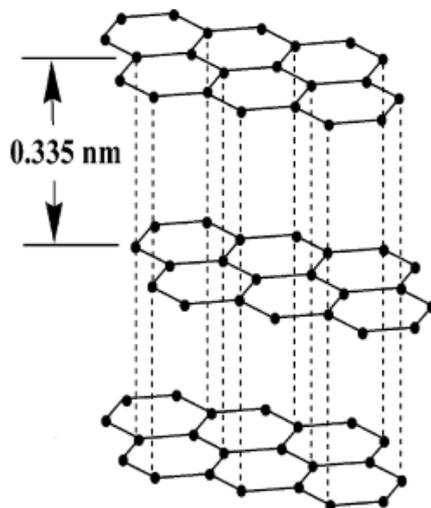
4.4 Grafite

O carbono possui a intrigante capacidade de combinação com outros elementos químicos e até com si próprio em forma de cadeias, através de diversas maneiras distintas, sendo a base de vários compostos orgânicos que constituem a vida, podendo ser encontrado em abundância na natureza em forma de carvão ou grafite (SENGUPTA *et al.*, 2010).

Em grafite, o carbono elementar tem a energia de mais baixo estado, à pressão e temperatura ambientes. Sendo um material anisotrópico, sua estrutura é formada por compostos por átomos de carbono fortemente ligados em anéis hexagonais, representados pela Fig. 9, denominados folhas de grafeno, sobrepostas umas às outras em formas de

camadas, que possuem sua energia mais baixa quando são completamente planas, e separadas a uma distância de 0,335 nm (SENGUPTA *et al.*, 2010).

Figura - 9: Camadas de Grafeno



Fonte: Adaptado de Sengupta *et al*, 2010.

Sendo um material eletricamente e termicamente condutor, apesar de não ser um metal, o grafite possui característica macia e lubrificante, devido as folhas de grafeno estarem juntas por Van der Waals, o que permite que as camadas deslizem facilmente entre si, explicando sua capacidade de deixar marcas em folhas de papel (SENGUPTA *et al.*, 2010).

Por ser um material com propriedades físicas interessantes, de fácil aquisição, o grafite é um objeto de estudo cobiçado nas mais diversas aplicações.

A anisotropia em suas propriedades eletromagnéticas foi bastante estudada para a construção de polarizadores infravermelhos e micro-ondas em 1960, por possuir uma forte profundidade de pele, que é a distância característica de penetração de uma onda eletromagnética em um material (DRESSELHAUS, 2004). O grafite é um semimetal com uma estrutura cristalina de camada uniaxial que permite uma anisotropia extremamente forte, que a depender da faixa de frequência pode atender à exigência de refração negativa para certas ondas eletromagnéticas (SUN, ZHOU, LI, 2011).

Recentemente pesquisas no âmbito das telecomunicações apresentam folhas de grafite em antenas planares de banda ultra larga, exibindo resultados com até 92,3% de eficiência, concluindo que sendo um produto de peso leve, flexível e um condutor

altamente eficiente, o papel de grafite se torna algo promissor (CHEN, FUMEAUX, 2018).

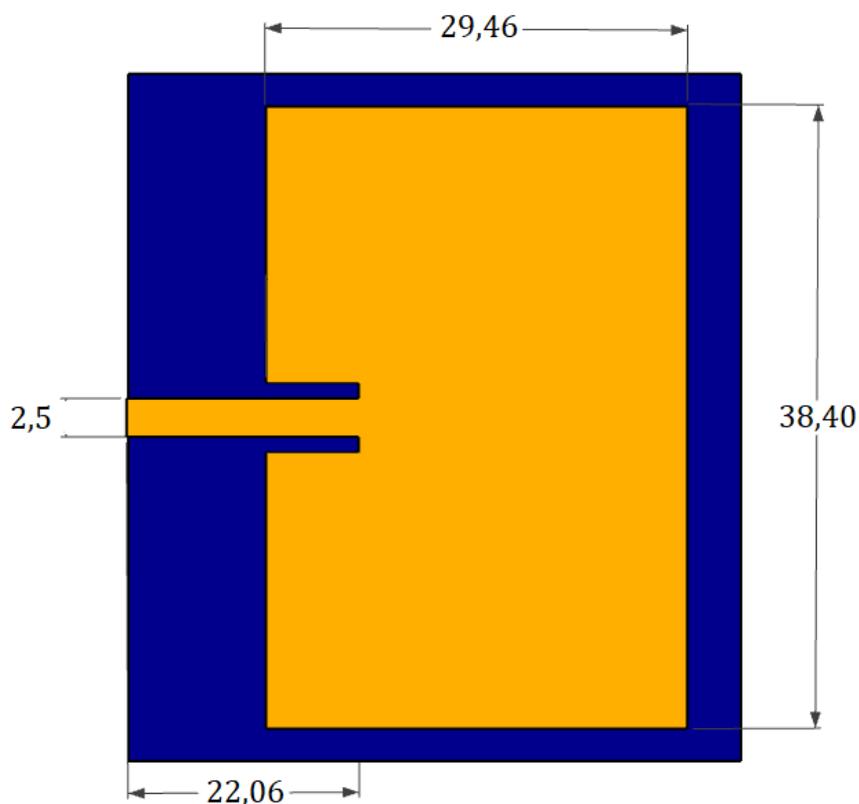
5 ESTRUTURAS BASE

A seguir são apresentadas as dimensões estruturas utilizadas neste trabalho, bem como seus parâmetros básicos, peças chave para a construção dos resultados. É importante ressaltar que todas possuem suas dimensões em milímetros.

5.1 Antena Planar

A antena planar base foi construída utilizando o conceito de permissividade elétrica efetiva, sendo sua teoria apresentada pela revisão bibliográfica deste trabalho. Suas dimensões após pequenos ajustes, realizados com testes em simulações, de modo que a frequência de operação seja 2,4 GHz são apresentadas pela Fig. 10. Vale ressaltar que todas as dimensões estão em milímetros.

Figura - 10: Dimensões da Antena Base.

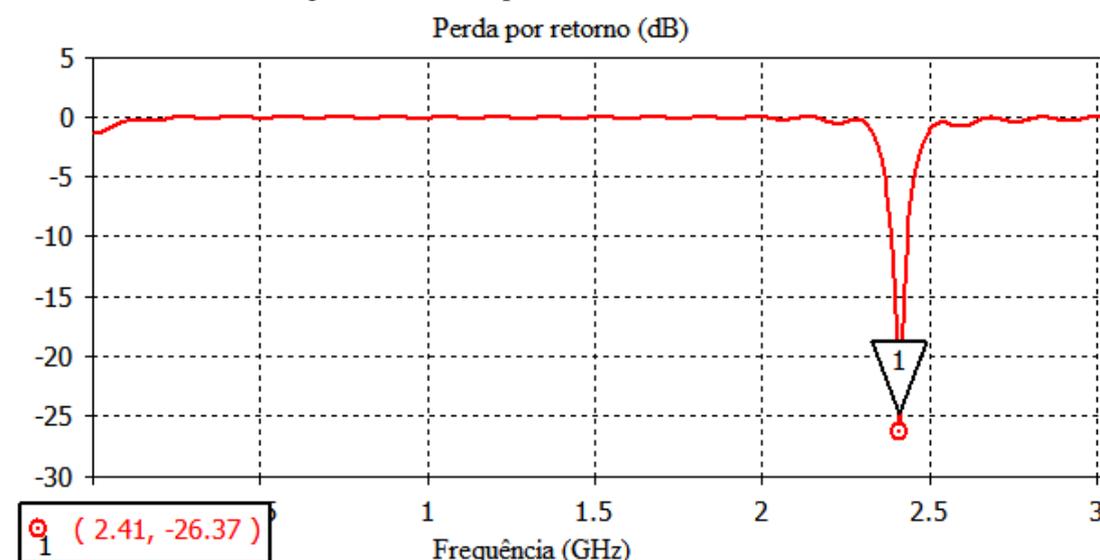


Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de tornar o *patch* mais visível na Fig. 10, parte do substrato e do plano terra foram recortados, suas dimensões reais correspondem ao dobro da largura e comprimento do *patch*, ou seja, 55,22 e 76,80 milímetros respectivamente. O valor da largura do *inset feed* é de 0,55mm.

Os principais parâmetros da antena planar básica, perda por retorno, diretividade e ganho são apresentados pelas Fig. 11, Fig.12 e Fig. 13:

Figura - 11: Perda por retorno da Antena Base.

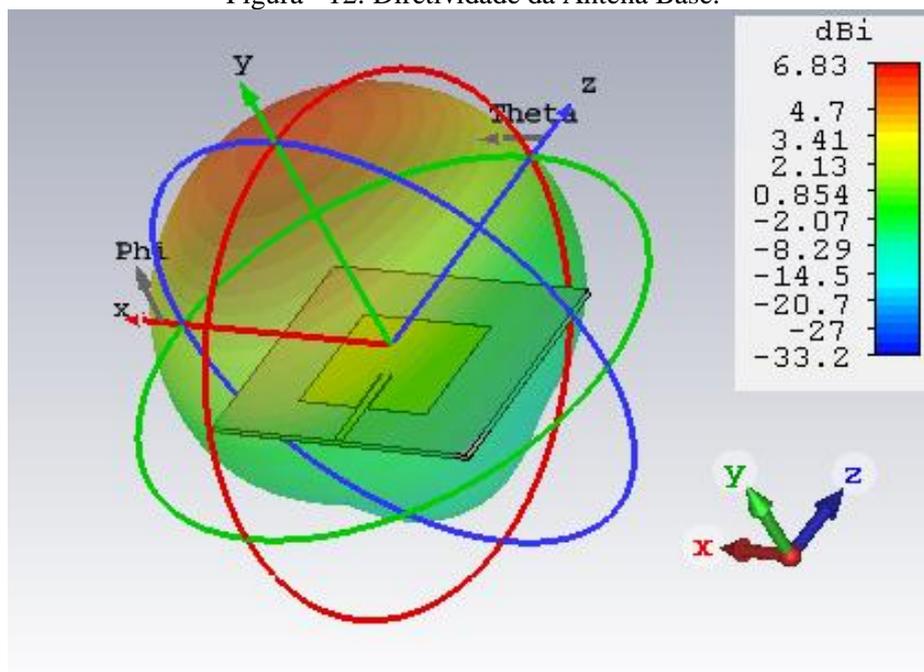


Fonte: Elaborada pelo autor.

A faixa de sintonia da antena base pode ser obtida através do gráfico da perda por retorno, a partir dos valores da frequência em -10 dB. A banda de sintonia desse resultado vai de 2,38 GHz a 2,42 GHz. O valor de pico da perda por retorno pode ser observado com uma frequência de 2,41 GHz, sendo seu valor -26,37 dB.

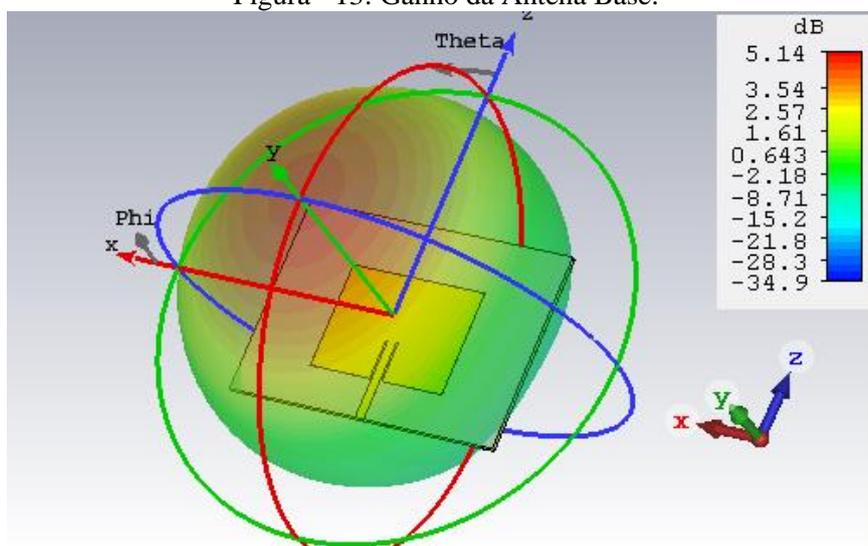
Além de exibir os valores da diretividade e do ganho da antena, as Fig. 12 e 13 apresentam o formato da irradiação de sinal, em forma de um gráfico de calor, sendo os melhores valores mostrados através das cores quentes. O valor da diretividade é de 6,83 dBi, enquanto o ganho possui um valor de 5,14 dB.

Figura - 12: Diretividade da Antena Base.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 13: Ganho da Antena Base.



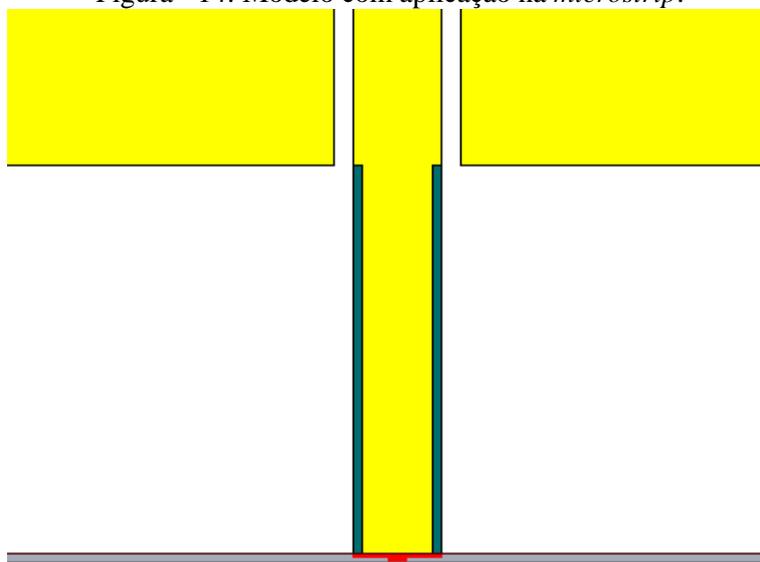
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Antena Planar com aplicações de grafite

Utilizando a antena planar básica, parte de suas estruturas condutoras, como *patch* e *microstrip*, foram substituídas por grafite, com o intuito de analisar os impactos causados pela implementação deste material, definindo se são benéficos ou não para aprimorar seus parâmetros. A Fig. 14 ilustra o modelo do melhor resultado obtido através

de diversas simulações com montagens distintas, a aplicação de material é representada pela cor esverdeada.

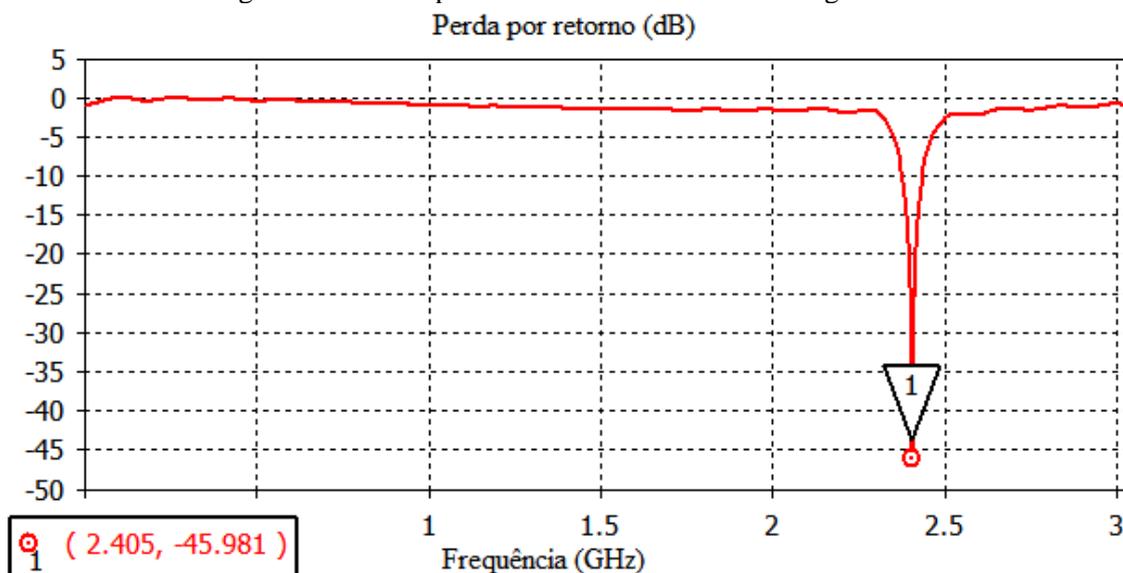
Figura - 14: Modelo com aplicação na *microstrip*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

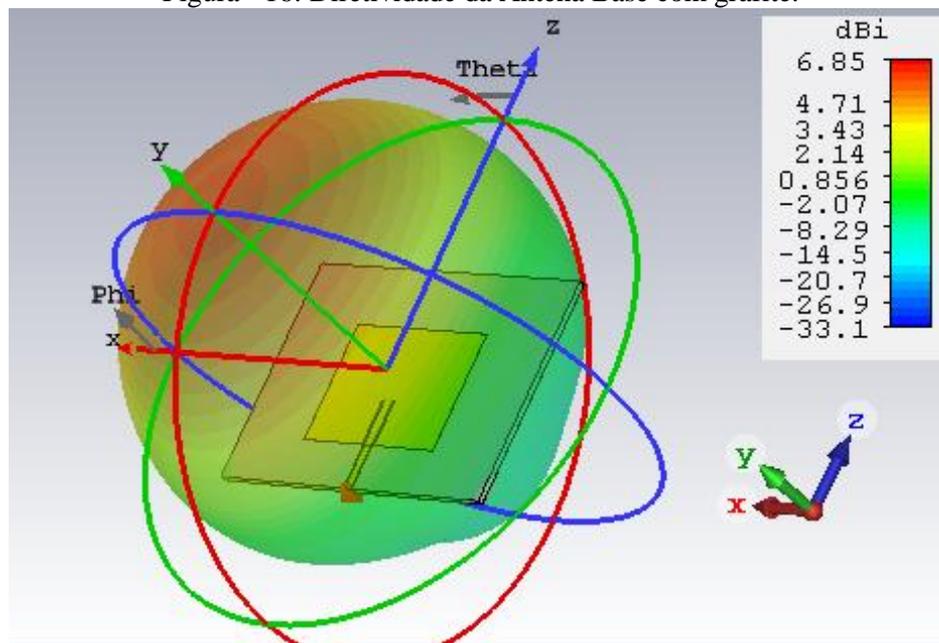
A aplicação foi feita na *microstrip* com um recorte de 0,25 milímetros em cada lado, substituindo suas bordas por grafite. O parâmetro básico que apresentou melhor desempenho com relação a antena base foi a perda por retorno, com uma melhora de quase -20 dB. Os valores obtidos para perda por retorno, diretividade e ganho são apresentados pelas Fig. 15, Fig. 16 e Fig. 17:

Figura - 15: Perda por retorno da Antena Base com grafite.



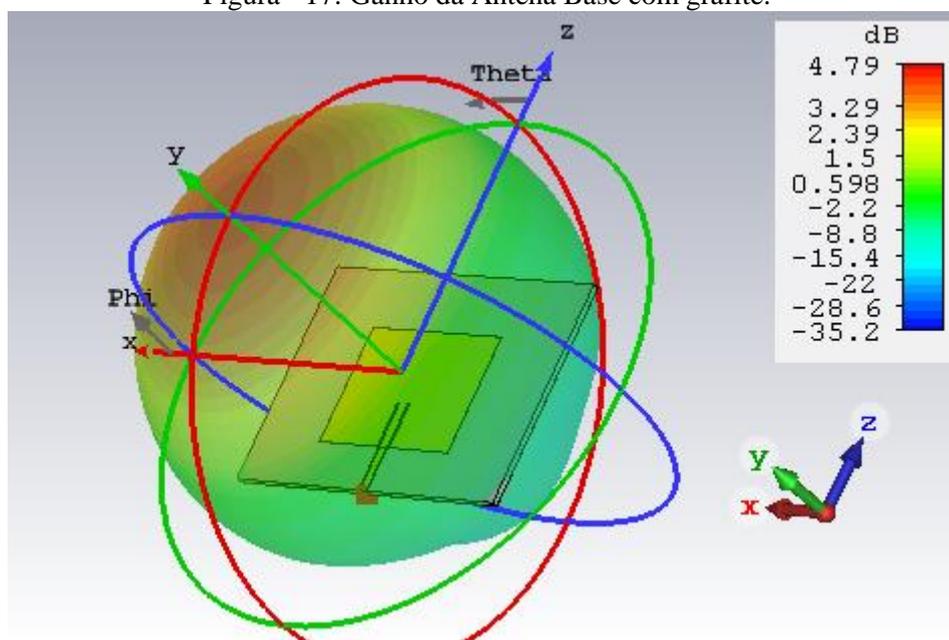
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 16: Diretividade da Antena Base com grafite.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 17: Ganho da Antena Base com grafite.

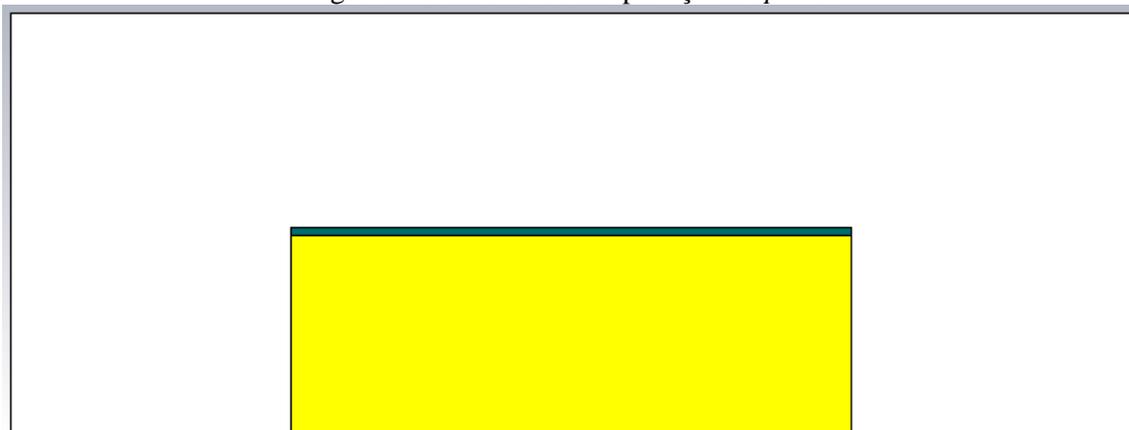


Fonte: Elaborada pelo autor.

Diante destes resultados, vale ressaltar que para os valores da perda por retorno, quanto menor o dB apresentado, melhor o desempenho da antena, enquanto para o ganho e a diretividade, quanto maior o valor apresentado, melhor o desempenho.

Algumas aplicações realizadas em outras partes da antena não surgiram efeitos positivos para o desempenho da antena planar básica. A Fig. 18 exemplifica uma aplicação realizada na parte superior do *patch* da antena, em que uma faixa de 0,5mm de cobre foi recortada e substituída por grafite.

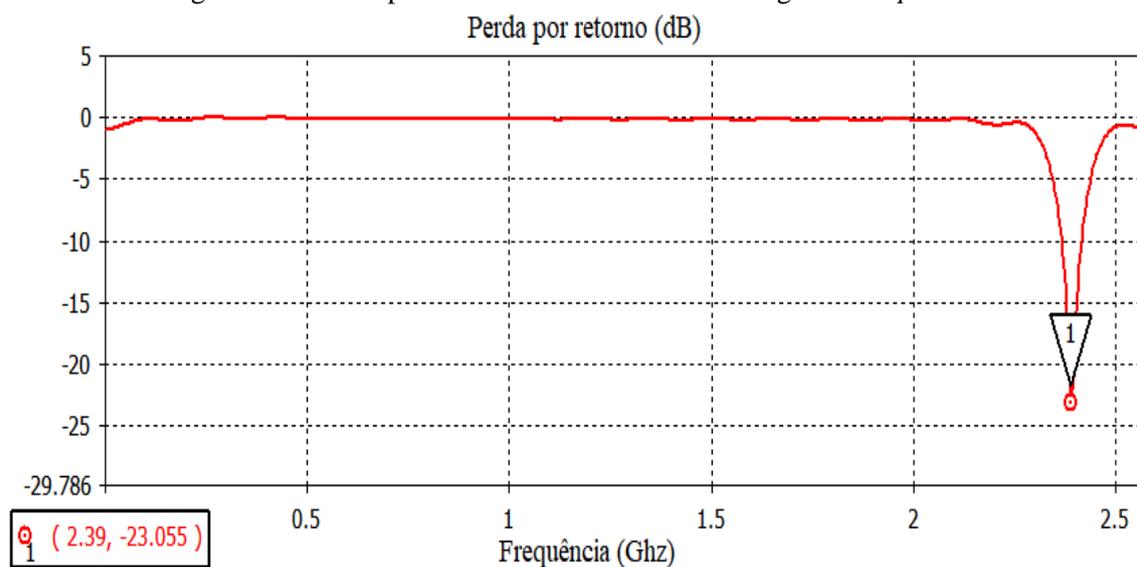
Figura - 18: Modelo com aplicação no *patch*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado apresentado pela Fig. 19 mostra a perda por retorno deste recorte, possuindo uma diferença negativa de -3,32 dB com relação a antena base e -22,93 com relação a aplicação do grafite na *microstrip*, ou seja, ouve uma redução do desempenho neste parâmetro.

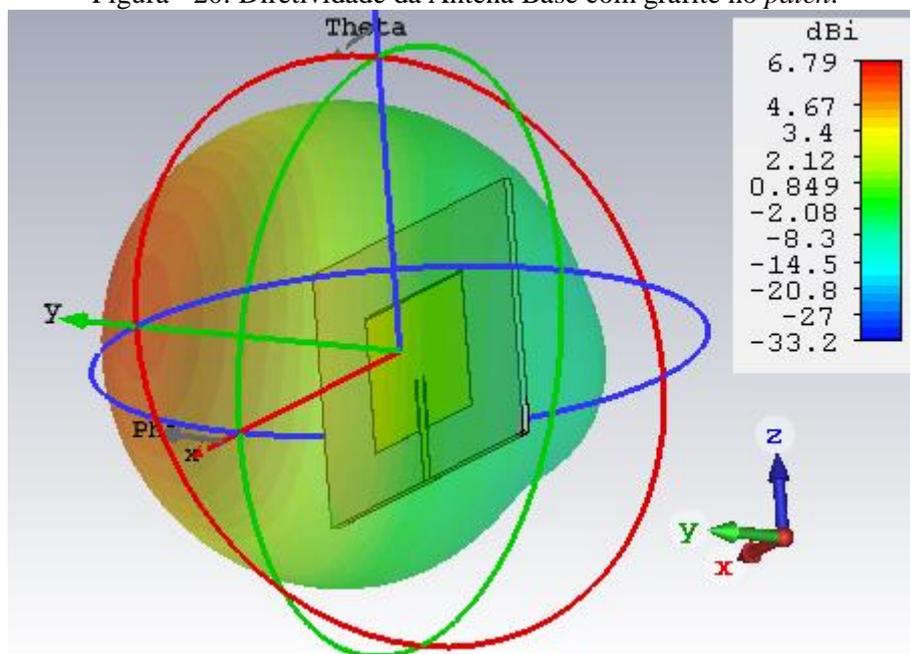
Figura - 19: Perda por retorno da Antena Base com grafite no *patch*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

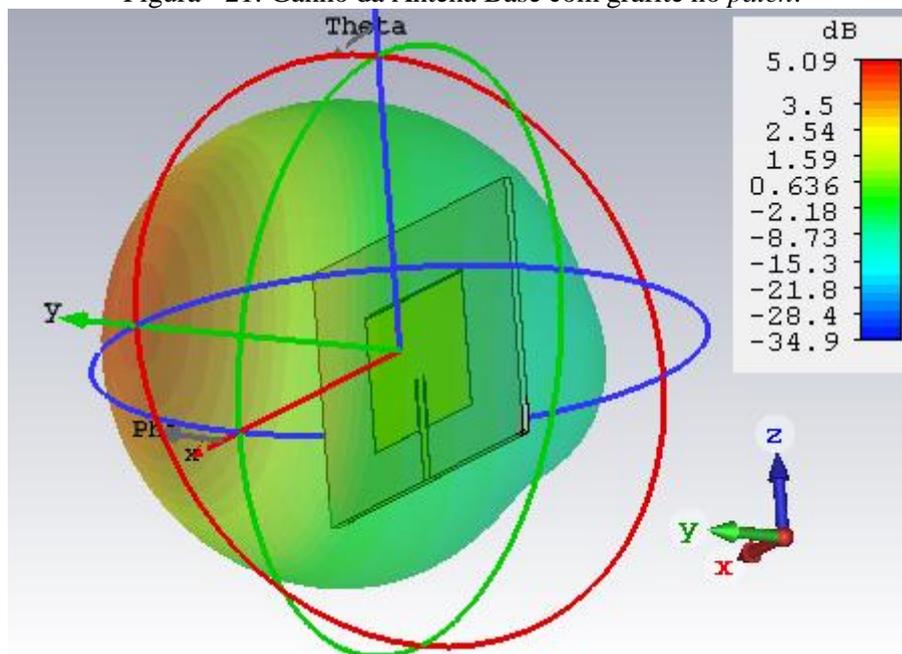
A Fig. 20 e a Fig. 21 apresentam os valores da diretividade e o ganho, respectivamente. Ambos apresentaram uma leve redução com relação a antena base, prejudicando o desempenho.

Figura - 20: Diretividade da Antena Base com grafite no *patch*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 21: Ganho da Antena Base com grafite no *patch*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 22 exemplifica uma aplicação realizada no substrato da antena base, ao invés de realizar um recorte, duas camadas de grafite com espessura de 0,035mm e 0,5mm de largura foram sobrepostas a parte dielétrica, distantes 0,5mm entre si.

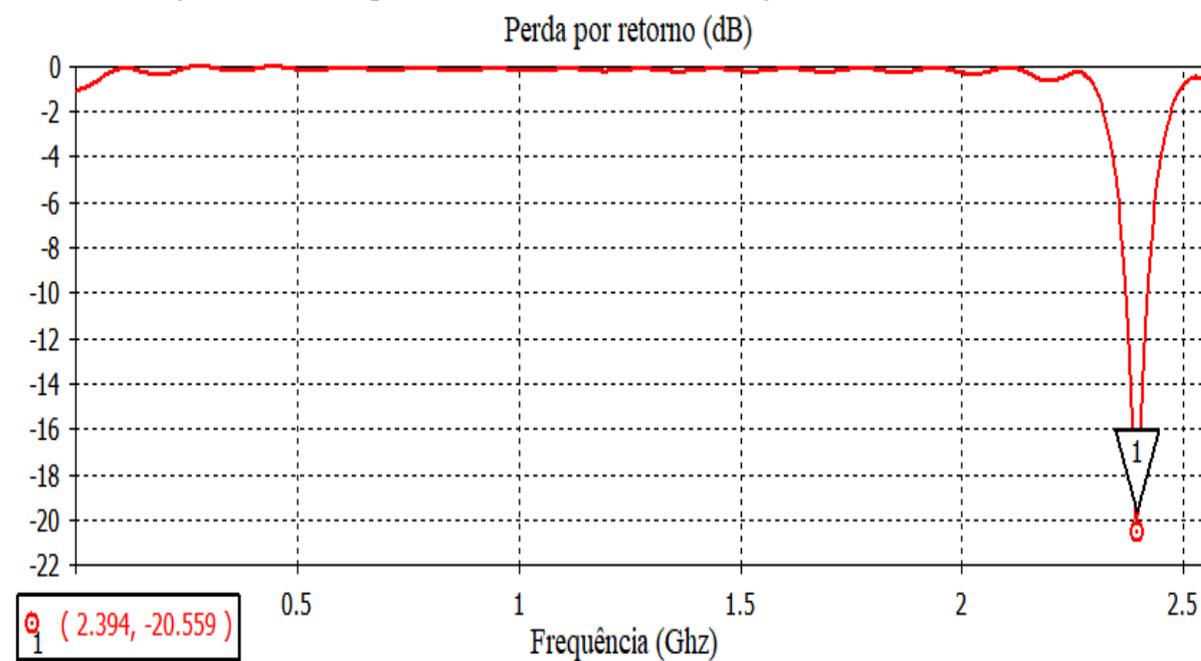
Figura - 22: Modelo com aplicação no substrato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para a perda por retorno pode ser observado pela Fig. 23, com -20,55 dB, com uma pequena variação com relação a frequência, sendo seu valor 2,39 GHz, dentro da faixa de operação da antena.

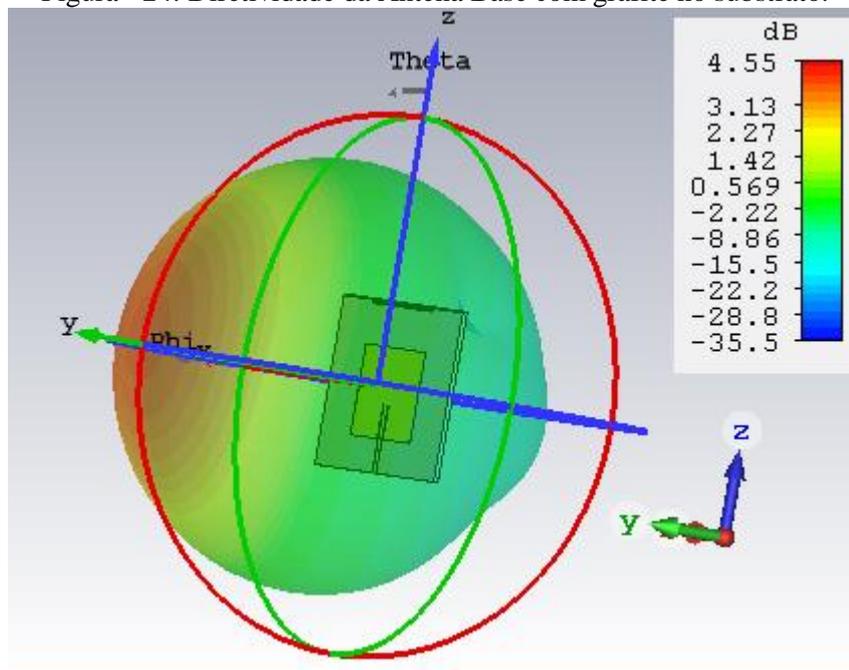
Figura - 23: Perda por retorno da Antena Base com grafite no substrato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

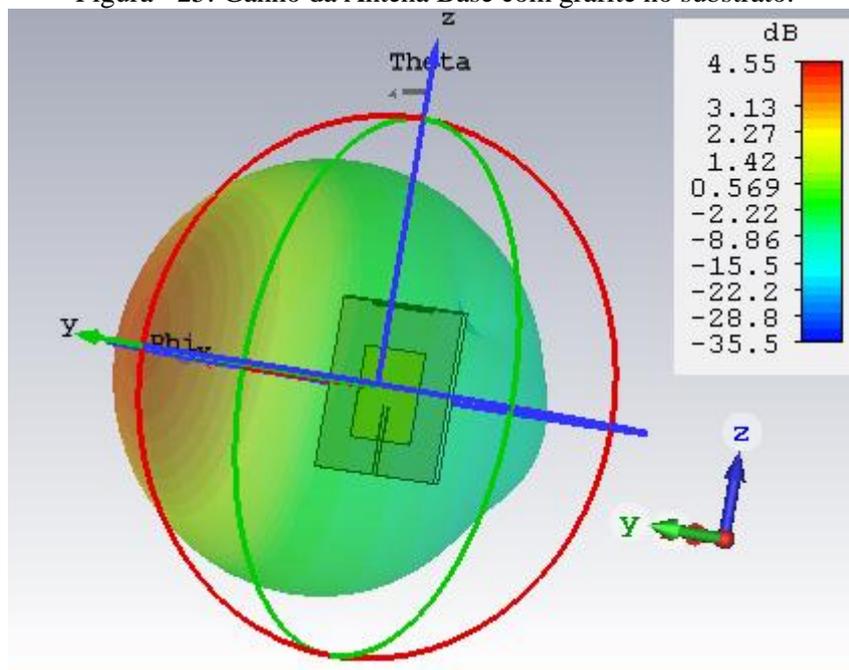
A variação do valor da diretividade comparada com a antena base foi praticamente desprezível, cerca de 0,06 dB, conforme a Fig. 24, enquanto o resultado obtido do ganho da antena apresentou uma redução considerável, conforme a Fig. 25.

Figura - 24: Diretividade da Antena Base com grafite no substrato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 25: Ganho da Antena Base com grafite no substrato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 Estruturas Metamateriais

As estruturas metamateriais apresentadas neste trabalho foram escolhidas a partir dos resultados de outros trabalhos com frequência de ressonância próxima de 2,4 GHz, sendo que em alguns casos adaptações foram necessárias.

5.3.1 CLL (*Capacitively Load Loop*)

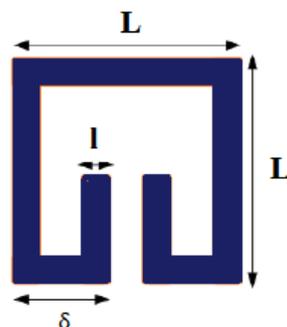
Sendo uma simplificação do SRR (*Split Ring Resonator*) a estrutura metamaterial CLL pode apresentar comportamento condutor magnético ou elétrico, com características artificiais, a depender da direção da onda de polarização (GUELBER, 2014). A parte inferior dessa estrutura apresenta propriedades capacitivas, enquanto sua parte superior apresenta propriedades indutivas (ERENTOK; LULJAK; ZIOLKOWSKI, 2005).

Utilizando uma frequência de ressonância de 10 GHz a estrutura CLL pode ser construída a partir da equação (16), em que L é o valor das arestas laterais da estrutura, λ é valor do comprimento de onda no espaço livre para a frequência determinada, enquanto δ e l são valores dependentes de uma relação entre as arestas laterais (GUELBER, 2014).

$$L = \frac{\lambda}{10} \quad \delta = \frac{L}{6} \quad l = \frac{\delta}{2} \quad (16)$$

Como nesse trabalho a frequência de ressonância é de 2,4 GHz e as formulações para a estrutura CLL foram projetadas inicialmente para faixas de frequências maiores, utilizaremos a equação (16) como referência, porém com uma adaptação, através de uma razão 10 vezes menor para os valores de estrutura. A Fig. 26 ilustra o *Capacitively Load Loop*:

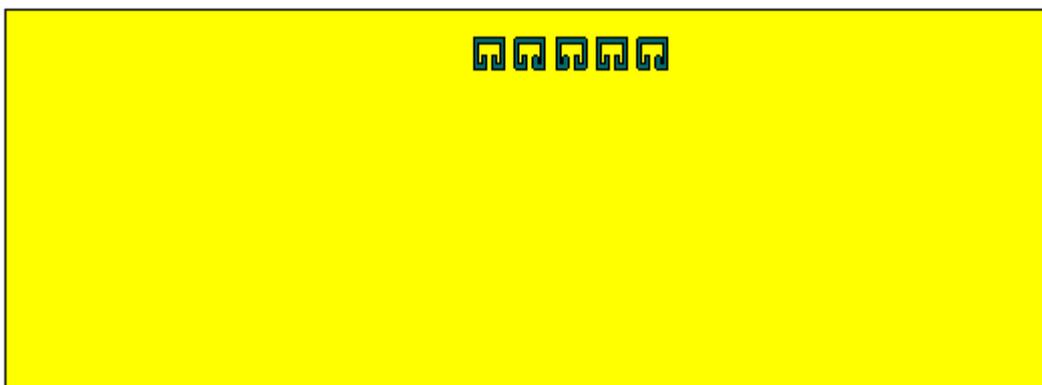
Figura - 26: Estrutura CLL (*Capacitively Load Loop*).



Fonte: Adaptado de Guelber, 2014.

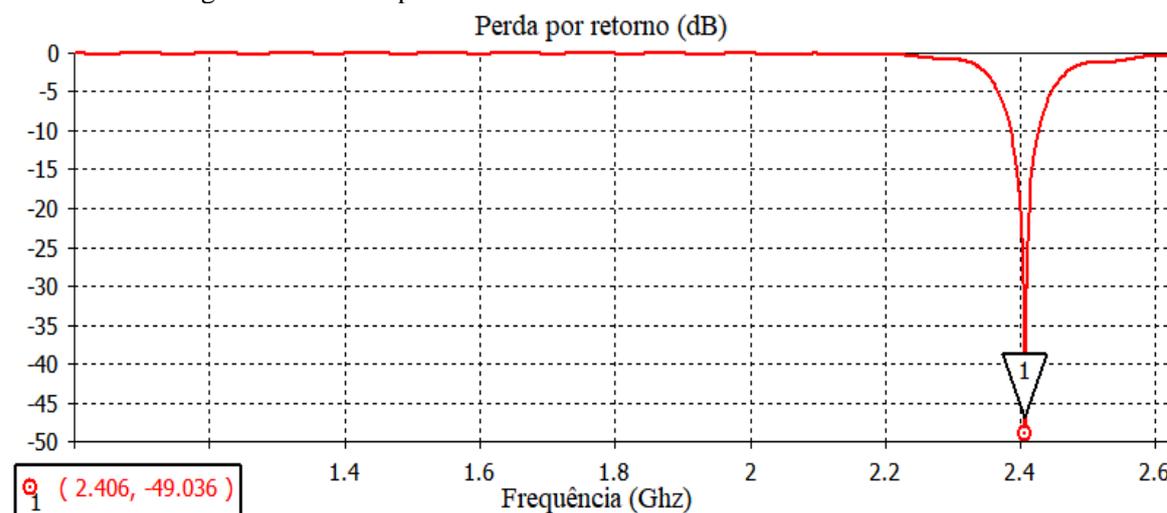
A estrutura metamaterial CLL foi aplicada em torno da antena base, em todas as suas partes físicas. Devido as suas dimensões, arranjos puderam ser feitos de forma mais livre, contudo, o resultado que apresentou melhor desempenho se deu com a aplicação do *Capacitively Load Loop* no *patch* da antena planar de forma linear e ordenada, sendo seu material substituído por grafite. Apesar de possuir um tamanho reduzido, não foi possível realizar simulações com uma quantidade elevada de repetições da estrutura, devido a limitação da quantidade de dados a serem processados pela máquina utilizada. A Fig. 27 ilustra a aplicação feita apenas na parte superior do *patch* da antena base, enquanto as Fig. 28, 29 e 30 mostram os resultados com relação a perda por retorno, diretividade e ganho, respectivamente.

Figura - 27: Aplicação da estrutura CLL na Antena Base.



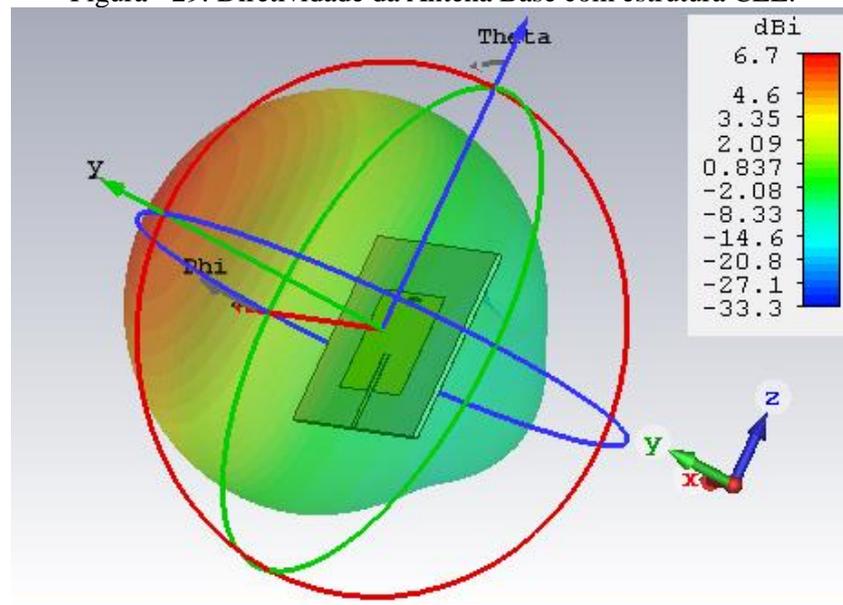
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 28: Perda por retorno da Antena Base com estrutura CLL.



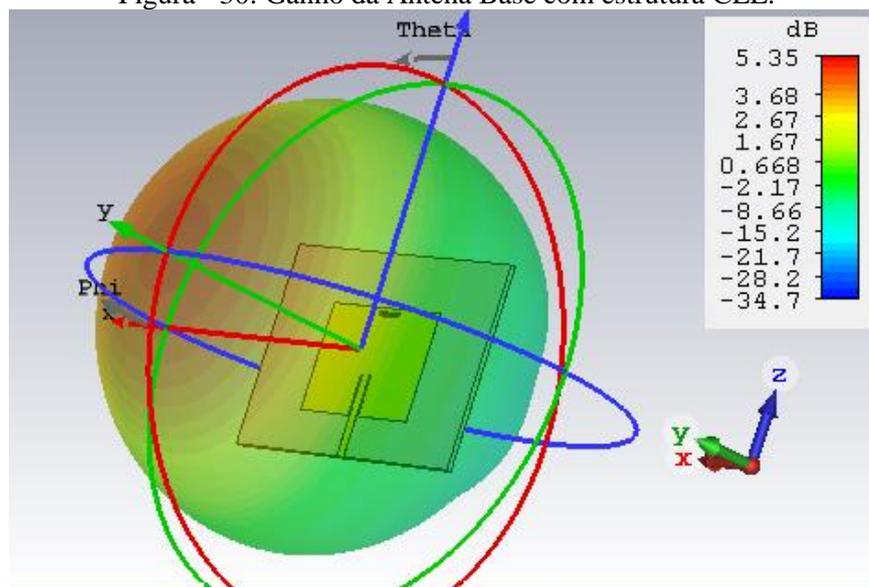
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 29: Diretividade da Antena Base com estrutura CLL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 30: Ganho da Antena Base com estrutura CLL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

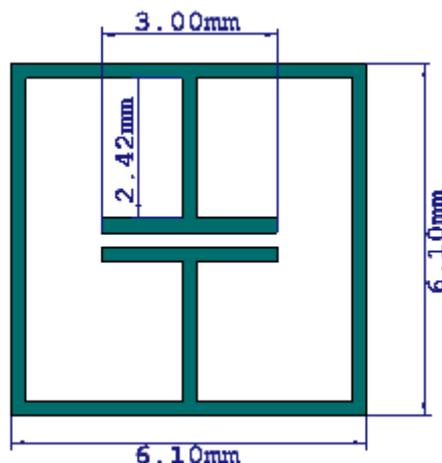
5.3.2 ELC (*Electric-Field-Coupled*)

Conhecido pelo acoplamento de campo elétrico, o ressonador ELC possui uma estrutura com uma região capacitiva ladeada por dois circuitos em paralelo, em formato de alças simétricas, para fornecer a indutância necessária. Quando energizado, o ressonador responde positivamente para polarização elétrica negativa em diferentes faixas de frequências (PHUSKAR, GUPTA, 2015).

O *design* desta estrutura é baseado na combinações de múltiplos ressonadores LC's, tendo como principal característica a capacidade de fornecer uma resposta elétrica ajustável em todas as direções. Sua resposta constitutiva é puramente elétrica pois as correntes que fluem pelas alças simétricas indutivas possuem sentido oposto, por tanto, os campos magnéticos induzidos em cada seção são opostos, levando a um momento magnético zero (SMITH, *et al.*, 2009).

A Fig. 31 exemplifica o modelo do ressonador ELC, bem como a definição dos valores utilizados para a confecção de sua estrutura, baseados nas definições propostas (PHUSKAR, GUPTA, 2015). A parte condutor de toda a estrutura possui uma espessura de 0,25mm.

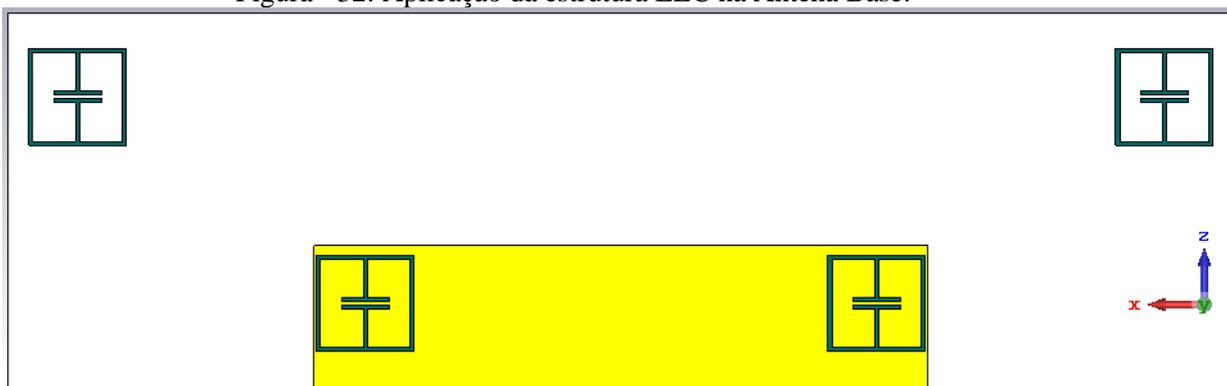
Figura - 31: Estrutura metamaterial ELC



Fonte: Adaptado de Phuskar, Gupta, 2015.

As aplicações deste ressonador foram realizadas em partes distintas da antena base, sendo que quando feita no plano terra, os resultados não foram positivos para o seu desempenho. Os melhores resultados foram obtidos através da aplicação simultânea no substrato e na parte irradiante, vale comentar que tal feito gera uma quantidade maior de dados para o processamento da simulação. A simulação que apresentou melhor resultado possui aplicações da estrutura ELC na parte superior do *patch* da antena e no substrato, ambos utilizando como material o grafite. A Fig. 32 ilustra como a aplicação foi realizada.

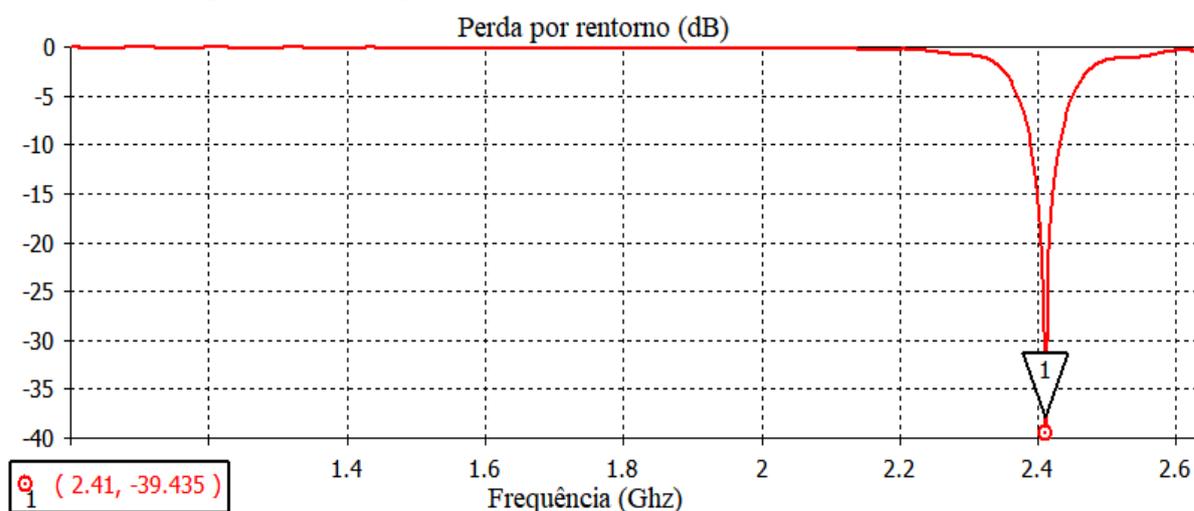
Figura - 32: Aplicação da estrutura ELC na Antena Base.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das simulações realizadas com o CST, os resultados com relação a perda por retorno, diretividade e ganho podem ser observados pelas Figuras 33, 34 e 35, respectivamente.

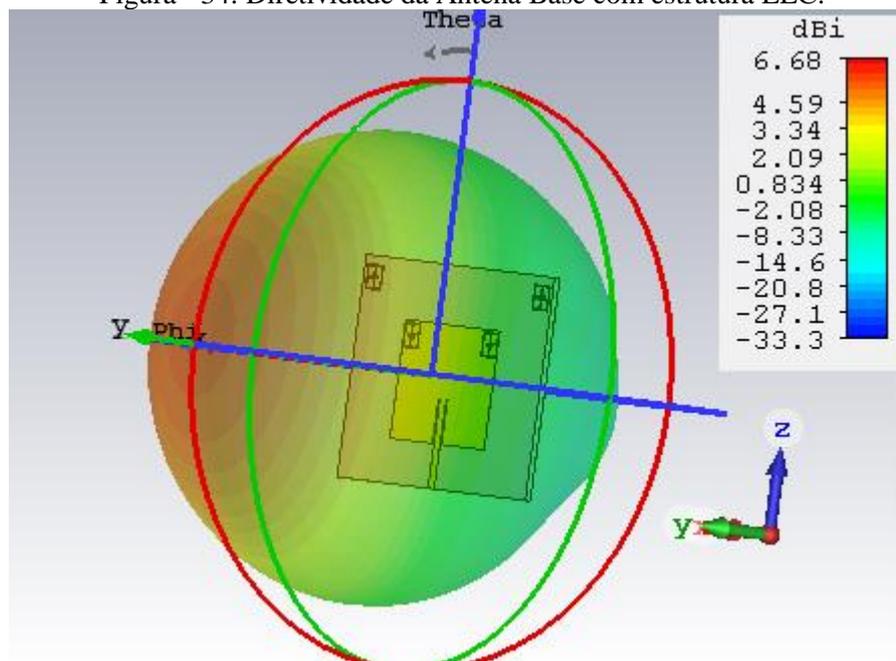
Figura - 33: Perda por retorno da Antena Base com estrutura ELC



Fonte: Elaborada pelo autor.

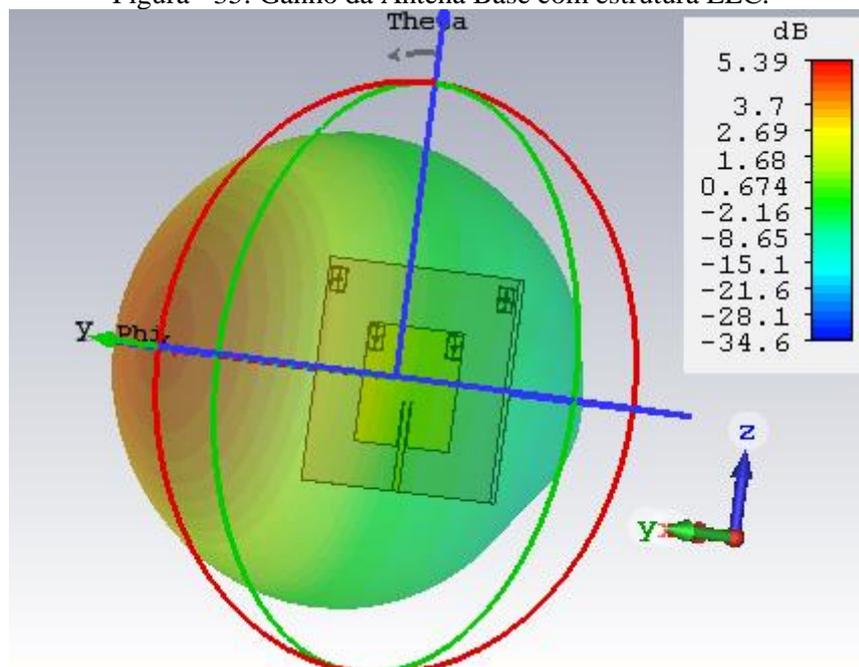
Através da Fig. 33 é possível perceber que houve uma alteração significativa no valor da perda por retorno, alcançando uma diferença de quase -14 dB com relação a antena original, junto com um leve aumento da faixa de operação. Apesar disso, os valores obtidos para a diretividade e o ganho com a aplicação da estrutura metamaterial ELC praticamente não sofreram alterações tão significativas, sendo a diferença mais expressiva com relação ao ganho.

Figura - 34: Diretividade da Antena Base com estrutura ELC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 35: Ganho da Antena Base com estrutura ELC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.3 Compact SRR (Split Ring Resonator)

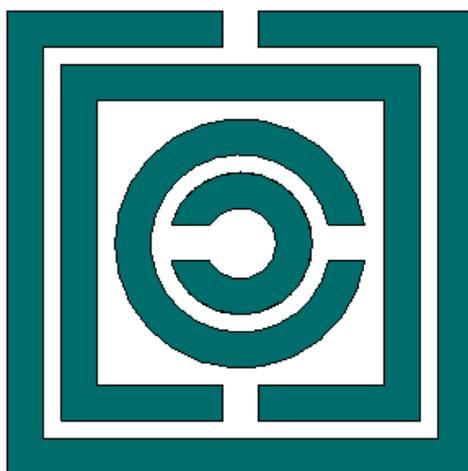
Este metamaterial foi projetado para ser uma estrutura compacta, comportando-se como um aglomerado indutivo-capacitivo, onde as ressonâncias são geradas pelas fendas nas tiras de metais. Uma parte do metal é excitada por um campo magnético variável no

tempo, que gera um campo elétrico na fenda, induzindo por consequência uma corrente no metal do outro lado (HASAN *et al.*,2019, p.3).

Os ressonadores circulares são responsáveis pelo efeito capacitivo, enquanto os ressonadores quadriculares são responsáveis pelo efeito indutivo, as lacunas foram criadas para gerar a impedância necessária (HASAN *et al.*,2019, p.3).

A Fig. 36 ilustra o formato da estrutura metamaterial. As lacunas possuem a mesma espessura que o metal condutor, 0,5mm. O ressonador quadricular possui 6,5mm de lado para a estrutura externa e 5mm para a interna. Os ressonadores circulares possuem 1,75mm para o anel externo e 1mm para o anel interno.

Figura - 36: *Compact SRR (Split Ring Resonator).*

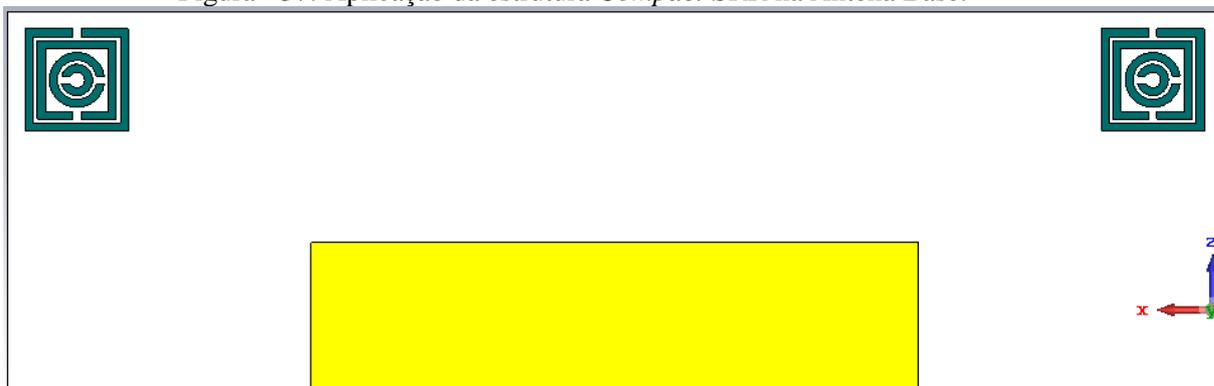


Estrutura SRR

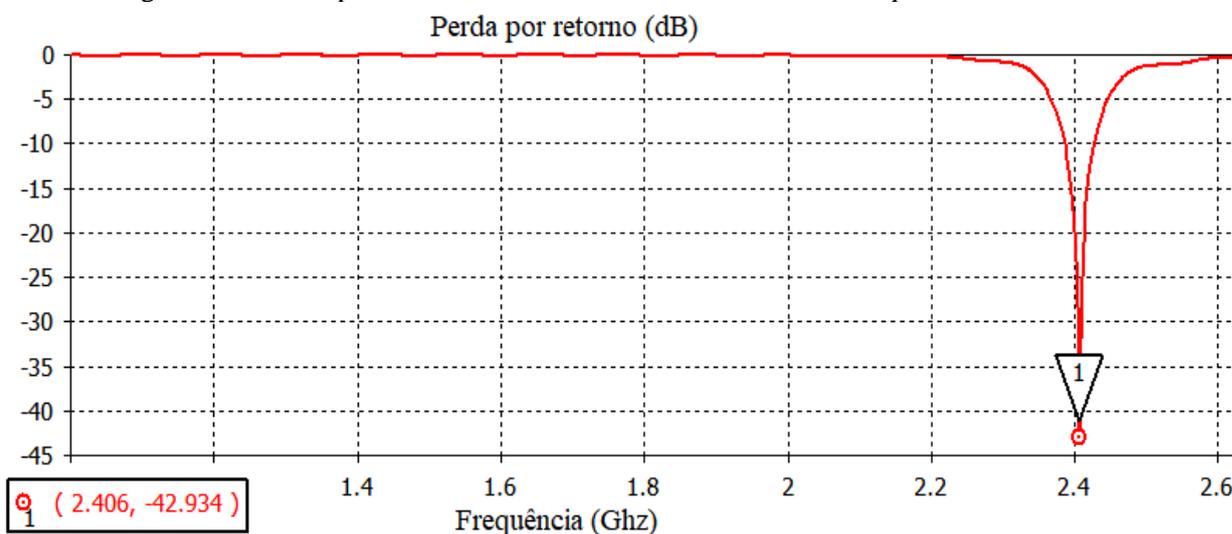
Fonte: Adaptado de Hasan *et al.*

A estrutura compacta além de aplicada em partes distintas da antena planar base, também foi aplicada simultaneamente na parte condutora e dielétrica, contudo, um melhor desempenho pode ser observado quando aplicado direta e exclusivamente em uma só dessas partes, principalmente quando aplicada na parte superior da antena, ou seja, mais distante da porta alimentadora.

O melhor resultado obtido através desta aplicação pode ser observado quando feito no substrato FR-4. Feitas estas constatações, após diversas simulações, a aplicação na antena base com melhor desempenho pode ser ilustrada pela Fig. 37, enquanto as Fig. 38, 39 e 40 mostram os resultados com relação a perda por retorno, diretividade e ganho, respectivamente.

Figura - 37: Aplicação da estrutura *Compact SRR* na Antena Base.

Fonte: Elaborada pelo autor.

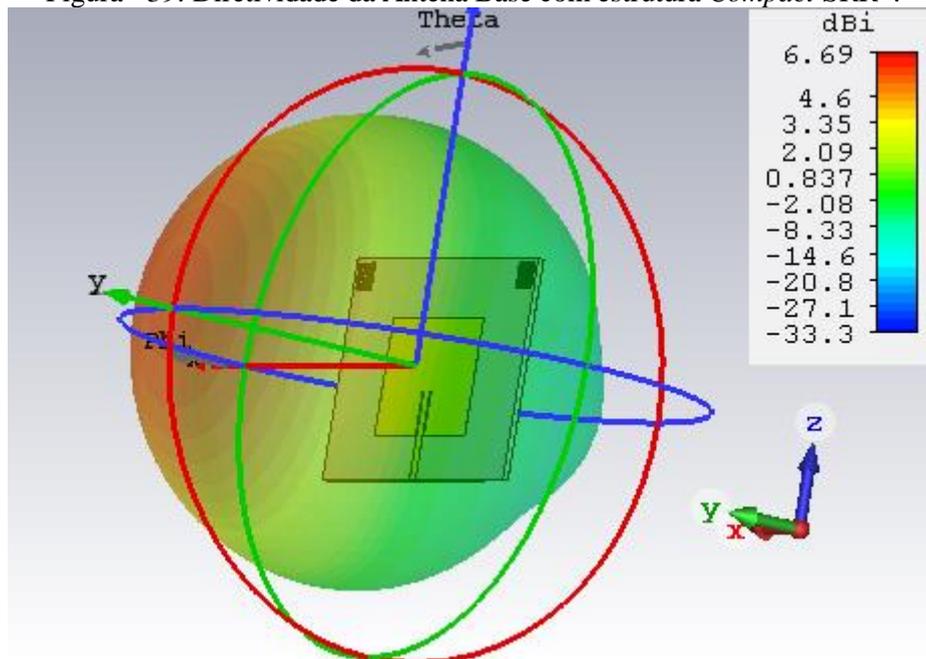
Figura - 38: Perda por retorno da Antena Base com estrutura *Compact SRR*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como a aplicação do metamaterial ELC, a estrutura compacta SRR apresentou uma melhora bastante expressiva com relação a perda por retorno, com um valor ainda melhor do que a aplicação anterior, como pode ser observado através da Fig. 38.

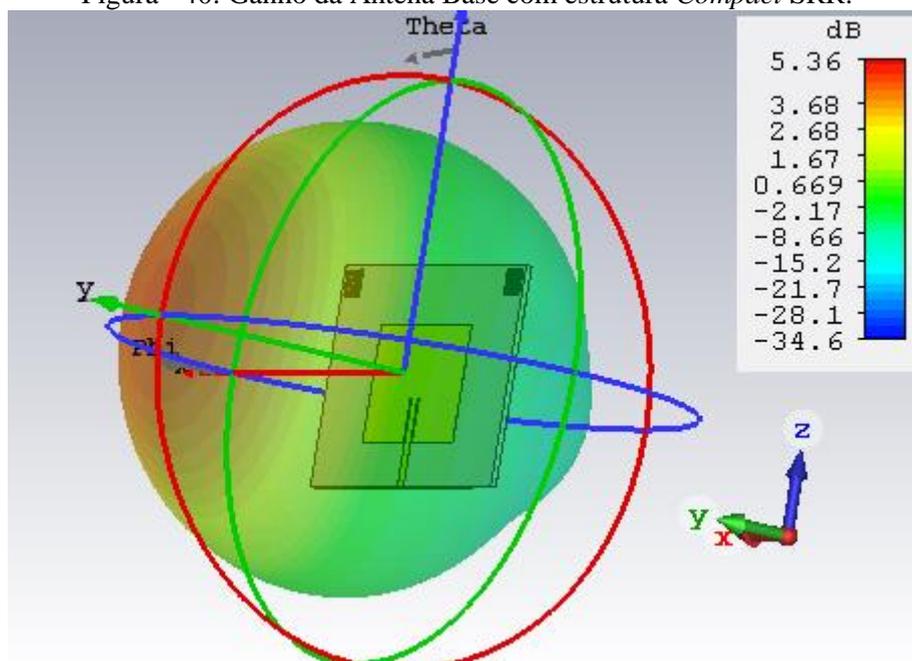
Os resultados obtidos para o ganho e a diretividade apresentaram valores bastantes próximos da aplicação ELC, com uma pequena variação de 0,03 dB em relação ao primeiro parâmetro citado, e 0,01 dBi com relação ao segundo.

Figura - 39: Diretividade da Antena Base com estrutura *Compact SRR* .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 40: Ganho da Antena Base com estrutura *Compact SRR*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.4 EBG (*Electromagnetic Bandgap*)

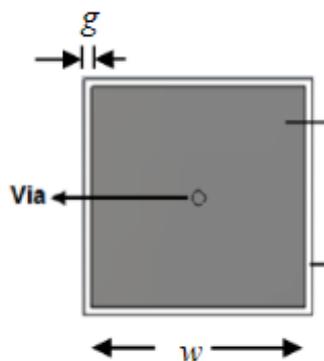
Uma das demandas da tecnologia no futuro será o sistema de comunicação utilizado no corpo humano, através de dispositivos e sensores conectados sem fio, capazes

de se comunicar com o exterior sob todas as condições operacionais. Esses objetivos podem ser alcançados através de antenas planares (ALI; HAROON, 2016).

Com o intuito de otimizar as antenas utilizadas sob estas condições foi desenvolvida a célula EBG (*Electromagnetic Bandgap*), para obter menor consumo de bateria e efetividade de radiação. Essas estruturas se comportam como uma estrutura de gap eletromagnético ou como um condutor magnético artificial, dentro de uma banda de frequência definida (AL; HAROON, 2016).

As estruturas EBG podem ser de dois tipos, *Mushroom* e *Slotted*, neste trabalho utilizaremos apenas a primeira, sendo representada pela Fig. 41.

Figura - 41: Estruturas *Mushroom* EBG .



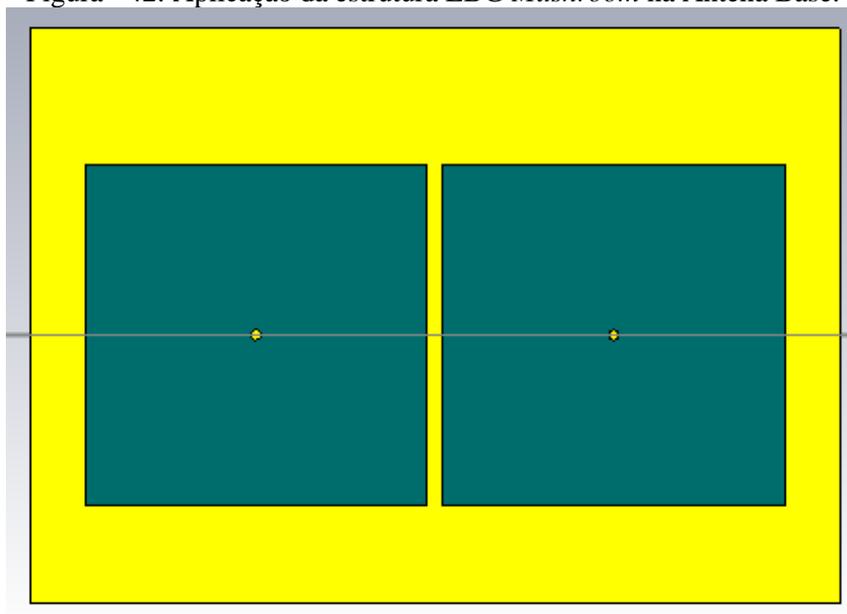
Fonte: Ali, Haroon, 2016.

A equação 17 define a estrutura *Mushroom*, para uma frequência de 2,4 GHz, sendo que a célula possui um raio de $0,004\lambda$.

$$\begin{aligned} w &= 0,24\lambda \\ g &= 0,0125\lambda \end{aligned} \tag{17}$$

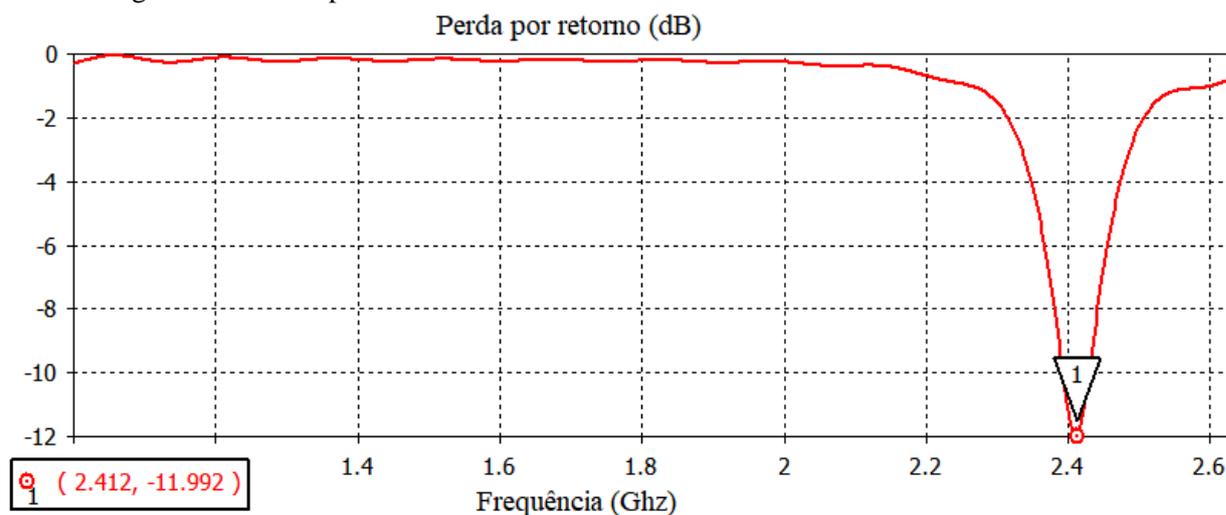
Devido ao seu tamanho não foi possível confeccionar vários arranjos para as aplicações da estrutura EBG *Mushroom* ao longo da antena planar base, ficando restrita apenas à aplicações em disposições distintas no plano terra. Utilizando o grafite como material, o melhor resultado foi através da simulação em que a estrutura foi centralizada na antena. A Fig. 42 ilustra a aplicação da estrutura EBG na antena base.

Figura - 42: Aplicação da estrutura EBG *Mushroom* na Antena Base.



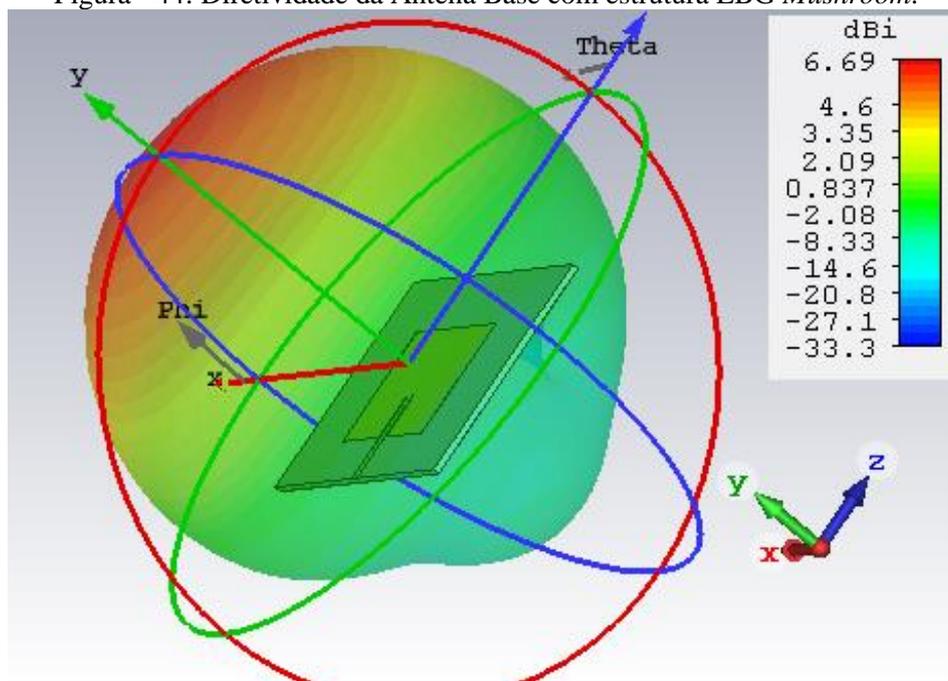
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 43: Perda por retorno da Antena Base com estrutura EBG *Mushroom*.

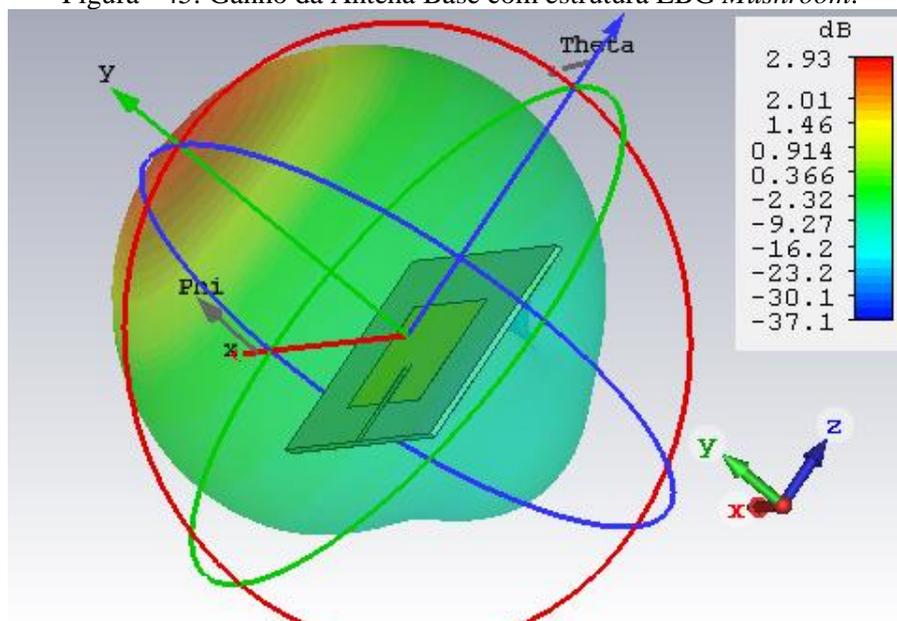


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 43 apresenta o resultado da perda por retorno da aplicação da estrutura metamateria IEBG, é possível observar que o valor obtido com 2,41 GHz é consideravelmente menor do que na antena base, com cerca de -15 dB de diferença. A Fig. 44 apresenta o valor da diretividade nesta aplicação, com 6,69 dBi. O valor do ganho também apresentou uma redução considerável com relação a antena base, conforme pode ser observado pela Fig. 45.

Figura - 44: Diretividade da Antena Base com estrutura EBG *Mushroom*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura - 45: Ganho da Antena Base com estrutura EBG *Mushroom*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Comparações dos resultados

A fim de melhorar a visualização dos resultados obtidos, bem como a influência da aplicação do grafite na antena planar básica, nesta etapa do trabalho comparações são feitas entre os resultados obtidos, através de gráficos e tabelas. O gráfico 1 apresenta o

valor da perda por retorno dos conjuntos, em quanto os gráficos 2 e 3 apresentam as comparações entre os valores de diretividade e ganho obtidos, respectivamente.

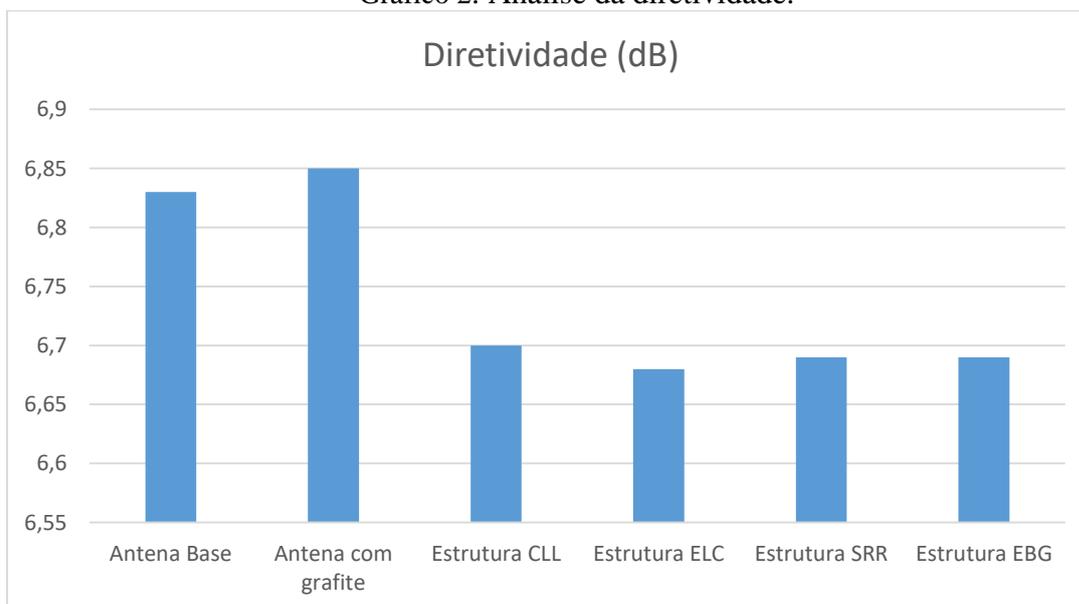
Gráfico 1: Análise da perda por retorno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

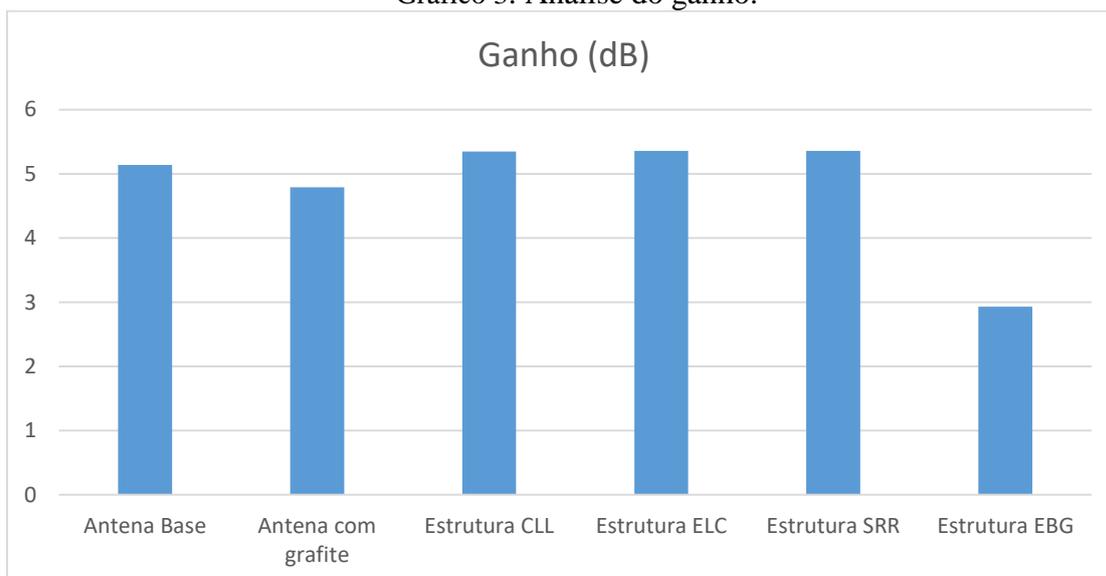
Através do gráfico 1 é possível perceber que o melhor resultado foi apresentado pela aplicação da estrutura metamaterial ELC, seguido da aplicação do grafite ditamente na *microstrip* da antena base. Os efeitos da aplicação do grafite foram bastante expressivos com relação a este parâmetro, em todas as aplicações.

Gráfico 2: Análise da diretividade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3: Análise do ganho.

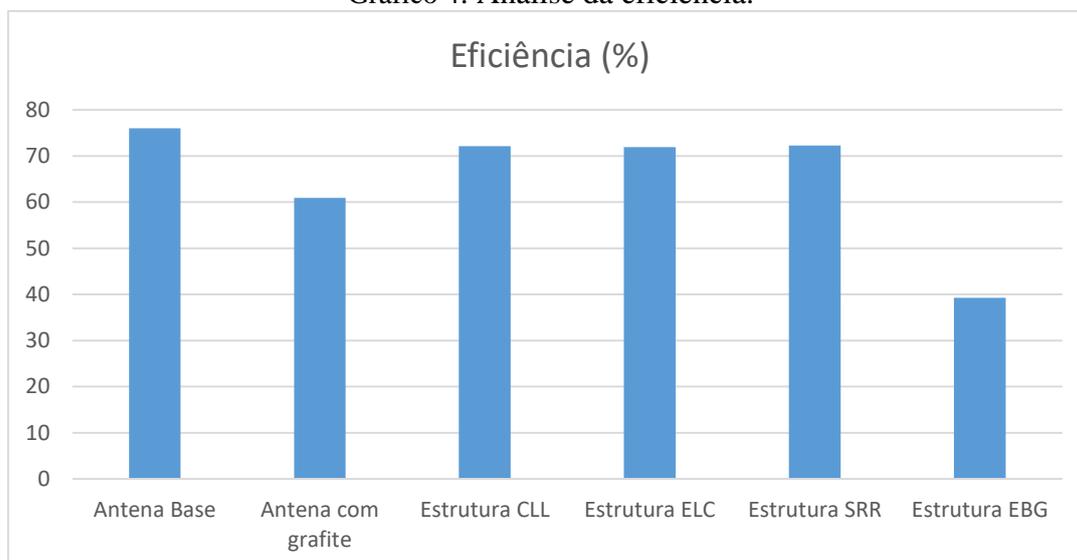


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a análise dos gráficos 2 e 3 é possível perceber que a aplicação das estruturas metamateriais com grafite não implicaram em variações tão bruscas na diretividade e no ganho da antena base, como foi observado em relação a perda por retorno. O resultado que obteve maior variação foi com a aplicação da estrutura EBG, em que o ganho obteve uma redução do seu desempenho em 2,21 dB.

Através das simulações com o CST Studio, é possível obter a eficiência total de radiação da antena planar, além do ganho e diretividade. O gráfico 4 exibe e compara os resultados obtidos, analisando a eficiência em porcentagem.

Gráfico 4: Análise da eficiência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do gráfico da eficiência é possível analisar que as aplicações das estruturas metamateriais não implicaram em uma variação expressiva do seu valor, apesar de reduzir em parte a porcentagem, com exceção da aplicação EBG, em que a eficiência caiu para cerca da metade da antena base.

A Tabela 1 deste trabalho estabelece um comparativo entre o ganho e a diretividade de cada antena, enquanto a Tabela 2 apresenta a largura de banda, analisada através dos resultados da perda por retorno.

Tabela - 1: Comparativo entre os resultados de radiação.

Antena	Diretividade (dB)	Ganho (dB)
Antena Base	6,83	5,14
Antena com Grafite	6,85	4,79
Antena com CLL	6,70	5,35
Antena com SRR	6,69	5,36
Antena com ELC	6,68	5,39
Antena com EBG	6,69	2,93

Fonte: Autor.

Tabela - 2: Comparativo entre a largura de banda de cada antena.

Antena	Início da banda (GHz)	Fim da banda (GHz)	Largura de banda (GHz)
Antena Base	2,38	2,42	0,04
Antena com Grafite	2,37	2,43	0,06
Antena com CLL	2,38	2,42	0,04
Antena com ELC	2,38	2,43	0,05
Antena com SRR	2,38	2,42	0,04
Antena com EBG	2,39	2,42	0,03

Fonte: Autor.

Através da análise da Tabela 2, é possível perceber que a alteração no valor da faixa de operação da antena foi mínimo, chegando apenas a 0,02 GHz com a aplicação do grafite na *microstrip* da antena base.

Com a finalidade de analisar o impacto do grafite em cada estrutura metamaterial, as Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os resultados de cada parâmetro básico nas estruturas CLL, SRR e ELC respectivamente, antes e depois da substituição do material por grafite.

Tabela - 3: Comparativo entre as simulações com CLL.

Antena	Perda por retorno (dB)	Diretividade (dB)	Ganho (dB)
Antena Base	-26,37	6,83	5,14
Antena CLL	-30,85	6,80	5,57
Antena CLL com grafite	-49,03	6,70	5,35

Fonte: Autor.

Tabela - 4: Comparativo entre as simulações com SRR.

Antena	Perda por retorno (dB)	Diretividade (dB)	Ganho (dB)
Antena Base	-26,37	6,83	5,14
Antena SRR	-33,96	6,77	5,54
Antena SRR com grafite	-42,934	6,69	5,36

Fonte: Autor.

Tabela - 5: Comparativo entre as simulações com ELC.

Antena	Perda por retorno (dB)	Diretividade (dB)	Ganho (dB)
Antena Base	-26,37	6,83	5,14
Antena ELC	-26,77	6,77	5,87
Antena ELC com grafite	-33,43	6,68	5,39

Fonte: Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste presente trabalho foi apresentado a fundamentação teórica necessária para compor uma base de entendimento com os parâmetros básicos de uma antena planar, que servem de análise para o desempenho de irradiação da antena, bem como o método utilizado para compor a formulação de sua estrutura física primária, dividida basicamente em três partes, *patch*, *microstrip* e plano terra.

Como os objetivos específicos deste trabalho estão relacionados com a interferência das diferentes topologias metamateriais utilizadas, bem como a aplicação do grafite, não apenas nessas estruturas, mas em substituição de partes da antena, uma ilustração comparativa entre os diferentes resultados obtidos, facilita sua análise.

As aplicações do grafite diretamente na parte condutora antena apresentaram resultados significativos com relação a perda por retorno, otimizando o seu desempenho e diminuindo a perda energética, contudo, houve uma diminuição em seu ganho. As aplicações no substrato e no plano terra não demonstraram bons resultados.

As formulações para as estruturas metamateriais foram baseadas em referências de trabalhos realizados, sendo necessário algumas adaptações em alguns casos, como para a estrutura CLL, devido a frequência de ressonância utilizada de 2,4 GHz ser diferente da utilizada no trabalho de referência.

Devido a capacidade computacional da máquina utilizada, não foi possível aplicar uma quantidade elevada de repetições de estruturas metamateriais em uma mesma simulação, também foi observado que ao substituir o material por grafite, a quantidade de dados a serem processados aumentou. Para viabilizar as simulações, a faixa de frequência utilizada foi de 0 a 3 GHz.

Conforme os resultados apresentados nas seções deste trabalho, é possível perceber que as topologias utilizadas apresentaram valores significativos de melhora com relação a perda por retorno, atingindo uma diferença de aproximadamente 24 dB. Em relação ao ganho e a diretividade, uma leve variação pode ser observada, que em alguns casos não foi benéfica.

Ao analisar a influência das estruturas metamateriais no valor de largura de banda é possível perceber que a alteração foi mínima, quase que desprezível, apesar da melhora de desempenho. Apesar de causar influências positivas para o desempenho da antena em alguns aspectos, é importante avaliar que as estruturas com grafite alteraram a eficiência

da antena negativamente, no caso da aplicação direta do grafite na *microstrip*, a diminuição foi bastante considerável.

Um ponto interessante a ser abordado está relacionado com o comportamento individual de cada topologia, apresentando melhor desempenho em determinada parte da antena, como por exemplo, os resultados obtidos através da aplicação das estruturas SRR no substrato foram melhores do que os resultados na aplicação na parte condutora, enquanto a topologia CLL apresentou melhor desempenho quando aplicada no *patch*. Outro ponto interessante é que as aplicações feitas no plano terra da antena base com as topologias metamateriais apresentadas neste trabalho não surgiram efeito positivo no desempenho dos parâmetros, pelo contrário, o desempenho da antena foi prejudicado, principalmente a eficiência total de radiação e a perda por retorno, conforme pode ser observado pela simulação da estrutura EBG.

Através deste trabalho, não foi possível fabricar o modelo com melhor resultado em relação a antena base, pois, não foi encontrada uma folha de grafite na espessura necessária para a confecção das estruturas metamateriais.

Por fim, conclui-se através de simulações, que de fato os efeitos proporcionados pela utilização de topologias metamateriais com estruturas de grafite, bem como a aplicação de partes deste material, em uma antena planar com frequência de ressonância de 2,4 GHz podem aprimorar o desempenho em relação aos seus parâmetros básicos. Como proposta de trabalhos futuros, é interessante verificar o comportamento destas modificações em um protótipo fabricado, estabelecendo comparações com as simulações realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Usman; HAROON, Sadiq. Design and Analysis of a 2.4 GHz Antenna using Metamaterial Ground Planes for Body Worn Wireless Applications. **Bahria University Journal of Information & Communication Technologies**, [S. l.], v. 9, p. 43-48, 1 jun. 2016.

ARAUJO, H. X.; BARBIN, S. E.; KRETLY, L. C. Metamaterial cell patterns applied to Quasi-Yagi antenna for RFID applications. **2012 IEEE Radio And Wireless Symposium**, [s.l.], p. 383-386, jan. 2012. IEEE.

ARAÚJO, Lincoln Machado de. **Seletivas de frequência e suas aplicações em antenas planares**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/15294/1/LincolnMA.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory Analysis And Design**. 3. ed. New Jersey: A John Wiley & Sons, 2005. 1072 p. Disponível em: <<https://archive.org/details/AntennaTheoryAnalysisAndDesign3rdEd/page/n1>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

BASTIDAS, Juan Pablo Pantoja. **Antenas de micro-ondas para sistemas de comunicações aerotransportados e de solo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Mestre, Campinas, 2016. Disponível em: http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/322396/1/PantojaBastidas_JuanPablo_M.pdf. Acesso em: 27 fev. 2019.

CAPOLINO, Felippo. **Theory and Phenomena of Metamaterials**. New York: Taylor & Francis Group, 2009. 926 p.

CAPOVILLA, Carlos Eduardo. **Antenas planares aplicadas às comunicações móveis de últimas gerações utilizando elementos de Quasi-Yagi**. 2004. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CHEN, Shengjian Jammy; FUMEAUX, Christophe. Highly Efficient Graphite Antennas for Conformal Applications. **Australian Microwave Symposium**, Australia, p. 61-62, 2018.

DRESSELHAUS, M. S. Nanotube antennas. **Nature Publishing Group**, California, v. 432, n. 23/30, p. 959, dez. 2004.

ERENTOK, Ayca; LULJAK, Paul; ZIOLKOWSKI, Richard. Characterization of a Volumetric Metamaterial Realization of an Artificial Magnetic Conductor for Antenna Applications. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION**, [S. l.], p. 160-172, Jan. 2005.

GUELBBER, Elise Fraga. **Aplicações da tecnologia metamaterial em dispositivos de telecomunicações**. 2014. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal de São João Del-rei, Ouro Branco, 2014.

HASAN, Mehedi *et al.* Electrically Compact SRR-Loaded Metamaterial Inspired Quad Band Antenna for Bluetooth/WiFi/WLAN/WiMAX System. **MDPI Electronics**, [S. l.], p. 1-19, 15 jul. 2019.

LUCENA, Daniel Amélio de. **Estado de refração negativa e recuperação de parâmetros em metamateriais**. 2010. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAMEDES, Deisy Formiga. *et al.* **Analysis of impedance matching techniques in tapered microstrip patch antenna**. 2017 Sbmo/iee Mtt-s International Microwave And Optoelectronics Conference (imoc), [s.l.], p. 1-4, ago. 2017. IEEE.

MARQUES, R. *et al.* Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design - Theory and experiments. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [s.l.], v. 51, n. 10, p. 2572-2581, out. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MISRA, Gourav; AGARWAL, Arun; AGARWAL, Kabita. Design and Performance Evaluation of Microstrip Antenna for Ultra-Wideband Applications Using Microstrip Feed. **American Journal Of Electrical And Electronic Engineering**. India, p. 93-99. ago. 2015. Disponível em: <<http://pubs.sciepub.com/ajeee/3/4/2>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

PENDRY, J.B. *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques**, [s.l.], v. 47, n. 11, p. 2075-2084, 1999. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4. ed. Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 758 p. Disponível em: <<http://bbs.hwrf.com.cn/downpeef/Microwave.Engineering,David.M..Pozar,.4ed.,Wiley,.2012.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

PUSHKAR, Pratyush; GUPTA, Vibha Rani. A Design Rule for an ELC Resonator. **IEEE Sponsored 2nd International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems (ICIIECS)**, [S. l.], p. 1-4, 11 abr. 2015.

ROTMAN, W. Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media. **Ire Transactions On Antennas And Propagation**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 82-95, jan. 1962. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

SARTORI, Eduardo José. **Estudo experimental de metamateriais baseados em grandes dielétricas**. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258918/1/Sartori_EduardoJose_M.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2019.

SAJUYIGBE, Soji *et al.* Design and Analysis of Three-Dimensionalized ELC Metamaterial Unit Cell. **IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS**, [S. l.], v. 8, p. 1268-1271, fev. 2009.

SENGUPTA, Rajatendu. *et al.* A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. **Progress In Polymer Science**. Índia, p. 639-670. nov. 2010.

SILVA, Geysse Mirelle Brito da. **Projeto de uma antena de microfita com possível aplicação em aeronaves**. 2018. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

STUTZMAN, W. L. Estimating directivity and gain of antennas. **Ieee Antennas And Propagation Magazine**, [s.l.], v. 40, n. 4, p.7-11, 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

SUN, Jingbo. *et al.* Indefinite permittivity and negative refraction in natural material: Graphite. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 98, n. 10, 7 mar. 2011. AIP Publishing.

VESELAGO, V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . **Soviet Physics Uspekhi**, Rússia, v. 10, n. 4, p. 517-526, jul. 1964.