

Arielly Rodrigues

Análise Paramétrica de Antenas Log-Periódicas Lineares e com Fractal de Koch

Alegrete, RS

12 de dezembro de 2017

Arielly Rodrigues

Análise Paramétrica de Antenas Log-Periódicas Lineares e com Fractal de Koch

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Telecomunicações**, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete - RS, Área de Concentração em Radiofrequência.

Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA

Curso de Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Prof. Marcos Vinício Thomas Heckler

Alegrete, RS

12 de dezembro de 2017

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R698a Rodrigues, Arielly

Análise Paramétrica de Antenas Log-Periódicas Lineares e com Fractal de Koch / Arielly Rodrigues.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2017.

"Orientação: Marcos Vinício Thomas Heckler".

1. Antenas Log-Periódicas. 2. Fractais de Koch. 3. Antena Dupla-Faixa. 4. Análise Paramétrica. 5. Miniaturização de Antenas. I. Título.

ARIELLY RODRIGUES

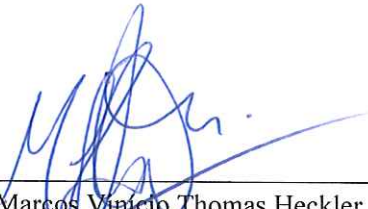
ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ANTENAS LOG-PERÍODICAS LINEARES E COM FRACTAL DE KOCH

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Área de Concentração: Radiofrequência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de Novembro de 2017.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler
Orientador



Prof. Me. Edson Rodrigo Schlosser
UNIPAMPA



Prof. Me. Lucas Santos Pereira
UNIPAMPA

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre me guiando e fortalecendo em todos os desafios que me foram apresentados ao longo desta graduação.

Agradeço a minha família, que sempre esteve ao meu lado. Obrigada por todo amor e paciência que sempre recebo. Em especial a minha mãe Zenaide, minha grande fortaleza que sempre me incentivou a correr atrás dos meus sonhos e por estar sempre ao meu lado me apoiando e incentivando a me tornar uma pessoa melhor a cada dia. Ao meu irmão Adriel que foi meu companheiro aqui em Alegrete, obrigada por toda compreensão e carinho.

Quero agradecer as belas amigas que construí na universidade, irmãos que ganhei e mesmo no período que me afastei de Alegrete se fizeram presente. Obrigada Sinara Matos, Daniel Baú, Bruna Machado e Danielli Duó, por cada palavra amiga e consolo que sempre pude contar. Agradeço também ao meu grande irmão Djonathan Fassbinder, que foi meu fiel companheiro ao longo da graduação. Apesar de cada um seguir um caminho, sempre estivemos juntos um ajudando ao outro.

Não poderia deixar de agradecer ao Haiglan Plotzki, que sempre se dispôs a me auxiliar em todos os trabalhos e projetos das disciplinas, obrigada pela sua ajuda e paciência de sempre.

Ao Prof. Marcos Vinício Thomas Heckler, agradeço pela grande oportunidade em poder realizar a minha iniciação científica ao longo da graduação e ser meu orientador neste trabalho. Muito obrigada pela sua orientação, conhecimento que me foi passado e compreensão nestes anos como sendo sua aluna.

Aos meus colegas de laboratório LEMA, por todo apoio e companheirismo ao longo da graduação, em especial ao Daniel Lemes e ao Juner Viera, por sempre se disponibilizarem em ajudar. Obrigada aos técnicos Cleiton e Diego pela ajuda na construção dos meus protótipos.

Não poderia deixar de agradecer ao Prof. Marco Antônio Durlo Tier, que foi meu tutor durante 4 anos no PET-CTC, muito obrigada por todas as oportunidades que me foram dadas e pela confiança de sempre.

Meu muito obrigada a todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo de toda a minha graduação.

*“Todos evoluem desidratando, seja pelo suor do trabalho
ou pelas lágrimas do sofrimento”.*
(Chico Xavier)

Resumo

Este trabalho utiliza a técnica de fractal de Koch para miniaturizar antenas log-periódicas lineares banda larga que contemplam as frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz). Assim, o principal objetivo é reduzir as dimensões físicas totais da antena log-periódica convencional (com dipolos lineares) mantendo-se aproximadamente o mesmo desempenho eletromagnético. Inicialmente, foi necessário projetar a antena log-periódica linear banda larga no *software* de simulações eletromagnéticas *Ansys HFSS*. Nesta etapa, foi realizado um estudo do posicionamento do cabo coaxial na linha de alimentação da antena. Verificou-se que a transição entre o cabo coaxial de alimentação e a antena é bastante crítica para obtenção de bons resultados, especialmente na porção mais alta da faixa de operação.

Na segunda etapa do trabalho, um estudo foi realizado para verificar a viabilidade de obtenção de uma estrutura dupla-faixa a partir da antena log-periódica convencional. Para este fim, escolheu-se um dipolo para ser retirado da estrutura.

Com o objetivo de reduzir as dimensões da antena log-periódica original, diversas técnicas fractais presentes na literatura foram estudadas, sendo que o fractal de Koch foi o escolhido por apresentar maior conformidade para a redução estrutural da antena. Inicialmente, as duas primeiras iterações de fractal foram aplicadas à antena. A cada aumento da iteração da estrutura fractal, obteve-se redução das dimensões globais da antena, mantendo-se aproximadamente o desempenho eletromagnético em termos de atuação em banda larga. Uma antena log-periódica com fractal de Koch de primeira ordem foi projetada e caracterizada experimentalmente.

Todas as antenas apresentadas neste trabalho foram fabricadas e medidas com a infraestrutura disponível no Laboratório de Eletromagnetismo, Micro-Ondas e Antenas (LEMA) da UNIPAMPA, a fim de validar os resultados simulados. Por fim, uma seção do trabalho é destinada para a descrição das simulações realizadas e para o processo de construção e medição dos protótipos, além da síntese das principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Palavras-chave: Antenas log-periódicas. Miniaturização de antenas. Fractal de Koch. Antena dupla-faixa.

Abstract

In this work, the Koch fractal is used to reduce the overall size of printed log-periodic antennas that operate in both WLAN (2.4 GHz) and WiMAX (5.8 GHz) frequency bands. The main goal is to develop an antenna reduced in size whilst keeping nearly the same electromagnetic properties of conventional log-periodic antennas. The first step in this development was the design of a printed log-periodic antenna by modelling the structure in the electromagnetic simulation Ansys HFSS. A detailed study about the transition between the coaxial cable used to feed the antenna and the printed structure has been carried out. The investigations showed that this is a critical issue of the antenna design, especially concerning the higher part of the operation band.

The second part of the present work was the development of a dual-band antenna based on the log-periodic topology. This has been achieved by removing one dipole and by making small geometrical changes in the antenna developed in the first part.

In order to reduce the overall antenna dimensions, fractal geometries have been studied. Among the analyzed cases, the Koch fractal has been chosen due to the ease of implementation. The two first iterations have been applied to the conventional log-periodic antenna. By increasing the order of the Koch fractal, the global antenna dimensions could be reduced whilst keeping nearly the same electromagnetic properties. A prototype with the first iteration has been designed and modelled in ANSYS HFSS.

All the designed antennas have been fabricated and measured in the Laboratório of Electromagnetics, Microwaves and Antennas (LEMA) of UNIPAMPA, so as to allow validating the simulation results. The main challenges faced during the fabrication of the prototypes are also described at the end of this document.

Key-words: Log-periodic antennas. Antenna miniaturization. Koch fractal. Dual band antennas.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Antena log-periódica de filamentos cilíndricos.	29
Figura 2 – Regiões de operação da antena log-periódica.	30
Figura 3 – Antena log-periódica linear banda larga.	31
Figura 4 – Parâmetros construtivos da antena log-periódica linear.	33
Figura 5 – Geometrias fractais.	35
Figura 6 – Curva de Minkowski.	36
Figura 7 – Triângulo de Sierpinski.	36
Figura 8 – Iterações da curva de Koch.	38
Figura 9 – Primeira iteração de Koch.	38
Figura 10 – Triângulo equilátero.	39
Figura 11 – Segunda iteração de Koch.	39
Figura 12 – Detalhe da transição do cabo coaxial - linha de fitas paralelas, vista lateral.	42
Figura 13 – Antena log-periódica linear banda larga projetada.	43
Figura 14 – Detalhe da transição entre cabo coaxial e linha de fitas paralelas, vista superior.	44
Figura 15 – Coeficiente de reflexão da posição inicial da alimentação da antena linear.	45
Figura 16 – Coeficiente de reflexão das posições de transição na antena log-periódica linear.	45
Figura 17 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica linear.	46
Figura 18 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica linear.	46
Figura 19 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica linear.	47
Figura 20 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear banda larga para a frequência de 2,4 GHz.	48
Figura 21 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear banda larga para a frequência de 5,8 GHz.	48
Figura 22 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a esquerda da antena log-periódica linear.	49
Figura 23 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a direita da antena log-periódica linear.	49
Figura 24 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical inferior da antena log-periódica linear.	50

Figura 25 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical superior da antena log-periódica linear.	50
Figura 26 – Aumento da distância entre raio de desbaste e posição do cabo coaxial.	51
Figura 27 – Coeficiente de reflexão após a retirada do quinto dipolo da rede.	52
Figura 28 – Antena log-periódica sem o novo dipolo.	52
Figura 29 – Coeficiente de reflexão após a retirada de diferentes dipolos da rede.	53
Figura 30 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 2,4 GHz.	53
Figura 31 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 5,8 GHz.	54
Figura 32 – Primeira iteração do dipolo de Koch.	56
Figura 33 – Antena log-periódica fractal de primeira iteração simulada.	57
Figura 34 – Posição da transição cabo coaxial - linha de fitas paralelas da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	57
Figura 35 – Coeficiente de reflexão inicial da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	58
Figura 36 – Coeficiente de reflexão das posições da transição na antena log-periódica fractal de primeira iteração.	58
Figura 37 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	59
Figura 38 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	60
Figura 39 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	60
Figura 40 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica fractal de primeira iteração para a frequência de 2,4 GHz.	61
Figura 41 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica fractal de primeira iteração para a frequência de 5,8 GHz.	61
Figura 42 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a esquerda da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	62
Figura 43 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a direita da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	63
Figura 44 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical inferior da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	63
Figura 45 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical superior da antena log-periódica fractal de primeira iteração.	64
Figura 46 – Aumento da distância entre raio de desbaste e posição do cabo coaxial.	64
Figura 47 – Segunda iteração do dipolo de Koch.	65
Figura 48 – Antena log-periódica fractal de segunda iteração.	66

Figura 49 – Posição do cabo coaxial na antena log-periódica fractal de segunda iteração.	66
Figura 50 – Coeficiente de reflexão das posições da transição na antena log-periódica fractal de segunda iteração.	67
Figura 51 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica fractal de segunda iteração.	67
Figura 52 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica fractal de segunda iteração.	68
Figura 53 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica fractal de segunda iteração.	69
Figura 54 – Antena log-periódica linear banda larga construída.	71
Figura 55 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica linear banda larga simulada e construída.	72
Figura 56 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica linear construída.	73
Figura 57 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica dupla-faixa construída.	73
Figura 58 – Medição do plano E (a) antenas em visada direta, (b) rotação da antena receptora de 180° a 360°	74
Figura 59 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear para a frequência de 2,4 GHz.	75
Figura 60 – Medição do plano H (a) antenas em visada direta, (b) rotação da antena receptora de 180° a 360°	75
Figura 61 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear para a frequência de 5,8 GHz.	76
Figura 62 – Antena log-periódica linear dupla-faixa prototipada.	76
Figura 63 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica linear dupla-faixa simulada e construída.	77
Figura 64 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 2,4 GHz.	77
Figura 65 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 5,8 GHz.	78
Figura 66 – Antena log-periódica fractal de primeira iteração prototipada.	78
Figura 67 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica fractal de primeira iteração simulada e construída.	79
Figura 68 – Dipolo da rede linear.	79
Figura 69 – Dipolo da rede fractal.	80
Figura 70 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica fractal construída.	80
Figura 71 – Comparação das antenas log-periódicas linear banda larga e fractal de primeira iteração prototipadas.	81

Figura 72 – Diagramas normalizados da antena log-periódica fractal para a frequência de 2,4 GHz.	82
Figura 73 – Diagramas normalizados da antena log-periódica fractal para a frequência de 5,8 GHz.	82

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros construtivos da antena log-periódica impressa	43
Tabela 2 – Parâmetros construtivos dos dipolos que compõem a rede fractal de primeira iteração	56
Tabela 3 – Parâmetros construtivos dos dipolos que compõem a rede fractal de segunda iteração	65

Lista de abreviaturas e siglas

HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
LEMA	<i>Laboratório de Eletromagnetismo, Micro-Ondas e Antenas</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>
UNIPAMPA	<i>Universidade Federal do Pampa</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

Lista de símbolos

ϵ_r	constante dielétrica
δ	tangente de perdas
σ	fator de escala
τ	fator de espaçamento
α	ângulo de abertura ($^\circ$)
h	espessura do substrato (mm)
W_n	larguras dos dipolos (mm)
l_n	comprimentos físicos dos dipolos (mm)
S_n	espaçamentos entre os dipolos (mm)
N	número total de elementos que compõem a rede
λ	comprimento de onda (mm)
v	velocidade da luz (m/s)
f_{min}	frequência mínima (Hz)
L_c	posição do cabo coaxial à linha de alimentação (mm)
L_s	aumento da linha após desbaste (mm)
R	raio de desbaste da linha de alimentação (mm)
L	comprimento total da estrutura que contempla os dipolos (mm)
B_{ar}	largura de banda da região ativa (Hz)
B_s	largura de banda projetada (Hz)
B	largura de banda desejada (Hz)
ϵ_r	constante dielétrica do substrato
ϵ_{re}	constante dielétrica efetiva da microfita
$Z_{microfita}$	impedância característica de uma microfita impressa em substrato com metade da espessura h do laminado empregado para confecção da linha de fitas paralelas (Ω)

Z_{ofp}	impedância característica da linha de fitas paralelas (Ω)
Z_a	impedância de entrada e o n -ésimo dipolo da rede (Ω)
$\lambda_{máx}$	comprimento de onda máximo (mm)
$\lambda_{mín}$	comprimento de onda mínimo (mm)
$l_{máx}$	comprimento do maior dipolo (mm)
l_{nf}	comprimento equivalente do dipolo fractal (mm)
h_{nf}	altura do triângulo equilátero (mm)
C	comprimento do segmento de reta do triângulo equilátero (mm)
$K0$	iteração zero da curva de Koch
$K1$	primeira iteração da curva de Koch
$K2$	segunda iteração da curva de Koch
$K3$	terceira iteração da curva de Koch

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Estrutura do Documento	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Antena Log-Periódica Convencional	29
2.2	Antena Log-Periódica Impressa Linear	30
2.2.1	Parâmetros de Projeto de uma Antena Log-Periódica Impressa Linear	32
2.3	Estado da Arte dos Principais Fractais Aplicados à Engenharia de Antenas	34
2.3.1	Curva de Minkowski	35
2.3.2	Triângulo de Sierpinski	36
2.3.3	Geometria de Koch	37
3	PROJETO DE ANTENAS LOG-PERIÓDICAS LINEARES	41
3.1	Alimentação por Cabo Coaxial	41
3.2	Projeto de uma Antena Log-Periódica Linear Banda Larga	42
3.2.1	Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas	44
3.2.1.1	Posicionamento da Transição	44
3.2.1.2	Influência do Toco em Aberto na Transição	45
3.2.1.3	Influência do Raio de Desbaste	46
3.2.1.4	Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R	47
3.2.2	Análise do Impacto de Possíveis Erros de Construção da Antena	47
3.3	Projeto de uma Antena Log-Periódica Linear Dupla-Faixa	51
4	PROJETO DE ANTENAS LOG-PERIÓDICAS COM FRACTAIS DE KOCH	55
4.1	Antena Log-Periódica Fractal de Primeira Iteração	55
4.1.1	Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas	57
4.1.1.1	Posicionamento da Transição	57
4.1.1.2	Influência do Toco em Aberto da Transição	59
4.1.1.3	Influência do Raio de Desbaste	59
4.1.1.4	Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R	59
4.1.1.5	Análise do Impacto de Possíveis Erros de Construção da Antena	61
4.2	Antena Log-Periódica Fractal de Segunda Iteração	63
4.2.1	Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas	65
4.2.1.1	Posicionamento da Transição	65

4.2.1.2	Influência do Toco em Aberto da Transição	66
4.2.1.3	Influência do Raio de Desbaste	67
4.2.1.4	Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R	68
5	RESULTADOS FINAIS	71
5.1	Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Linear Banda Larga	71
5.2	Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Linear Dupla-Faixa	76
5.3	Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Fractal de Primeira Iteração	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS	85

1 Introdução

As tecnologias de comunicação sem fio utilizam o ar como meio de propagação, onde a transferência de informações se dá através de sinais de radiofrequência, que são transmitidos e recebidos por meio de antenas. Nos últimos anos, os sistemas de comunicação sem fio têm-se popularizado e suas aplicações abrangem diversos sistemas como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), LTE (*Long Term Evolution*), *Bluetooth*, WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), WLAN (*Wireless Local Area Network*), dentre outras (OLIVEIRA et al., 2010).

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) é o órgão responsável por definir padrões para o funcionamento das redes sem fio, como é o caso das redes WLAN (padrão 802.11) e WiMAX (padrão 802.16). As redes WLAN e WiMAX correspondem ao padrão de transmissão Wi-Fi, oferecendo maior flexibilidade de conectividade aos usuários, permitindo o acesso à internet sem fio por meio de antenas (BEHZAD, 2008). As frequências centrais de operação dos sistemas WLAN e WiMAX são 2,4 GHz e 5,8 GHz, respectivamente. Tendo em vista a expansão do número de equipamentos que requerem conexão à internet, a miniaturização das antenas se torna importante para que os equipamentos apresentem tamanho reduzido.

As técnicas de miniaturização podem ser utilizadas em diversas áreas, tendo como intuito o desenvolvimento de equipamentos compactos, leves e com funcionalidades muito semelhante às de equipamentos convencionais (MORAIS, 2012). Uma das possíveis soluções para se obter uma antena compacta, que atenda muitos usuários simultaneamente com altas taxas de transmissões de dados, é a utilização de antenas impressas. Tais antenas apresentam pequeno volume e peso, além de possuírem baixo custo para produção em massa. Uma das desvantagens de algumas topologias desta categoria é a largura de banda estreita, o que restringe a sua utilização em algumas aplicações. Existem inúmeras topologias de antenas impressas que contornam esse inconveniente, sendo uma delas a antena log-periódica. Por isso, essa topologia foi escolhida nesse trabalho.

A geometria fractal pode ser utilizada na redução do tamanho das antenas, sendo uma forma eficiente de miniaturização. O estudo das geometrias fractais iniciou-se com Benoit Mandelbrot, que propôs as geometrias fractais como formas geométricas abstratas, com padrões complexos que se repetem infinitamente (MANDELBROT, 1989). Os fractais podem ser utilizados em distintas aplicações, tendo como particularidade a auto-semelhança. O Triângulo de Sierpinski e a Curva de Koch são alguns tipos de fractais abordados na literatura.

Visando à miniaturização de antenas log-periódicas, propõe-se a utilização de

fractais de Koch nos dipolos que compõem a geometria. Para esse fim, diversas iterações de fractais de Koch serão aplicadas aos dipolos. Cada nova iteração do fractal de Koch é obtida dividindo-se cada segmento de reta em três partes iguais, formando uma linha poligonal (MANDELBROT, 1989). Portanto, a cada nova iteração, os dipolos deverão apresentar comprimento cada vez mais reduzido. Ao se utilizar essa técnica, garante-se desempenho muito similar ao de uma antena log-periódica linear (*i.e* sem a aplicação de fractais).

Em (WILDNER, 2015) são apresentadas antenas log-periódicas que utilizam a técnica de fractal de Koch para miniaturização. Neste trabalho são aplicadas as três primeiras iterações de Koch à antena log-periódica linear. No entanto, o projeto desenvolvido por (WILDNER, 2015) não segue a característica periódica da antena, pois não foi utilizado o número de dipolos calculados; a largura dos dipolos da rede é a mesma para todos os elementos, bem como a impedância da linha de alimentação não corresponde a 50Ω , equivalente a impedância característica do conector utilizado. Assim, propõe-se o desenvolvimento de antenas log-periódicas com fractal de Koch, que tenham como característica principal da antena a periodicidade, seguindo as equações fundamentais para seu projeto.

Tendo em vista que a antena log-periódica apresenta banda larga, estudar-se-á seu comportamento elétrico após a aplicação de algumas iterações de fractal de Koch, com vistas à sua aplicação como antena banda larga e, posteriormente, como antena dupla-faixa, operando nas frequências livres WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz). Para isso, a antena log-periódica banda larga deverá ser projetada para operar na faixa de 2,3 GHz a 6,0 GHz. Além disso, vários estudos serão apresentados a respeito do posicionamento da linha de alimentação da antena.

1.1 Estrutura do Documento

Inicialmente, foi apresentada no primeiro capítulo uma contextualização e problemática do trabalho a ser desenvolvido, propondo uma possível solução para a utilização de antenas impressas que visam a sua miniaturização.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre antenas log-periódicas cilíndricas, lineares e fractais. Além de ser exposta uma revisão contendo o estado da arte de fractais, sendo estes utilizados no projeto de antenas impressas, permitindo a miniaturização da mesma, ou seja, a redução de tamanho.

O terceiro capítulo trata do projeto de antenas log-periódicas lineares para as frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz). Serão abordados os projetos de antenas log-periódicas banda larga e dupla-faixa lineares, além de uma análise paramétrica para cada estrutura desenvolvida.

Comumente, no capítulo 4 é apresentado o projeto de antenas log-periódicas fractais para as frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz), através da técnica de fractal Koch em operação banda larga. São aplicadas a primeira e segunda iteração do fractal de Koch, além da análise paramétrica em sua estrutura.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos através da implementação das antenas log-periódicas lineares e fractais por meio do *software Ansys HFSS*. Sendo expostos os resultados referentes às simulações eletromagnéticas das antenas banda larga e dupla-faixa. A validação das antenas projetadas foi realizada através da prototipação das antenas log-periódicas linear e fractal de 1ª ordem com operação banda larga, além da antena linear para dupla-faixa. Para isso, realizou-se a comparação de ambos os resultados obtidos, por meio de *software* e medição através do analisador de redes.

No último capítulo, são expostas as conclusões realizadas sobre os projetos executados, bem como propostas de soluções e continuidade deste trabalho de conclusão de curso.

2 Revisão Bibliográfica

Existem diversas topologias de antenas que apresentam operação banda larga, podendo ser utilizadas em distintas aplicações. Escolheu-se trabalhar com a topologia log-periódica, por apresentar operação em uma ampla gama de frequências. Assim, as principais topologias de antenas log-periódicas serão expostas neste capítulo, sendo estas cilíndricas e em circuito impresso.

No caso da utilização da tecnologia em circuito impresso, será aplicada as antenas log-periódicas lineares a técnica de miniaturização. Será apresentada as distintas geometrias de fractais presentes na literatura, a fim de selecionar a melhor técnica à ser aplicada na redução do comprimento dos dipolos.

2.1 Antena Log-Periódica Convencional

A estrutura log-periódica é uma rede de dipolos que apresenta característica *end-fire*, podendo ser formada por dipolos convencionais (cilíndricos). Cada dipolo que compõe a rede ressoa em uma frequência distinta, fornecendo, assim, uma maior largura de banda de operação.

As antenas log-periódicas convencionais apresentam dipolos filamentosares posicionados lado a lado, formando um conjunto coplanar, ou seja encontram-se no mesmo plano. Os dipolos possuem seção transversal cilíndrica e são compostos por material condutor, geralmente o alumínio, devido a redução de peso e custo de fabricação. Tal geometria é mostrada na Figura 1. Alternativamente, esta topologia pode ser construída em tecnologia de circuito impresso, o que a deixa com estrutura compacta e de construção bastante simples.

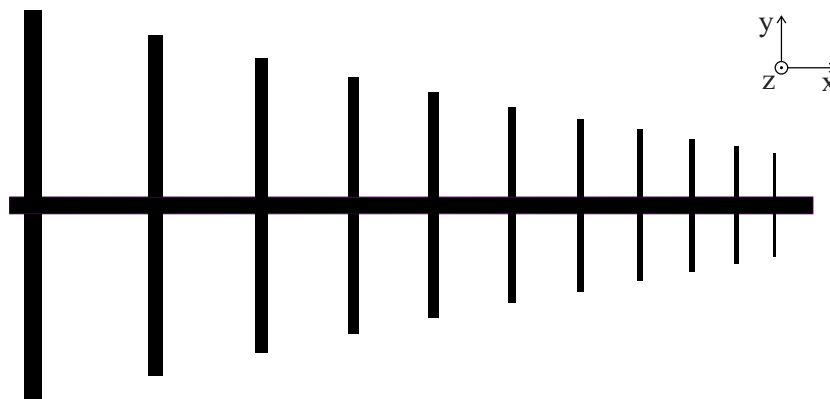


Figura 1 – Antena log-periódica de filamentos cilíndricos.

A alimentação dos dipolos de filamentos cilíndricos pode ser realizada através da

alimentação de uma linha cruzada entre os dipolos (BALANIS, 2005). Sendo que sua máxima irradiação ocorre no elementos de comprimentos físicos próximos a $\lambda/2$ (WELKE, 2014). Assim, considera-se que os elementos menores possuem impedância capacitiva e os maiores reatância indutiva (JUSTINO, 2012).

A Figura 2 apresenta as distintas regiões da rede log-periódica, sendo composta pela região de transmissão, ativa e de reflexão. Estas três regiões da antena estabelecem o diagrama de irradiação resultante, sendo que ao alterar as características de projeto da antena as regiões podem aumentar ou reduzir, devido ao aumento no número de dipolos (WELKE, 2014). Sendo que, as regiões correspondem a:

- Região de transmissão:

Onde realiza-se a alimentação da antena, estando presente nos dipolos menores da rede, correspondentes as frequências elevadas (JUSTINO, 2012);

- Região ativa:

Onde encontram-se os dipolos com comprimento aproximado a $\lambda/2$; (WELKE, 2014)

- Região de reflexão:

Onde a potência flui através do alimentador atingindo os maiores elementos (WELKE, 2014).

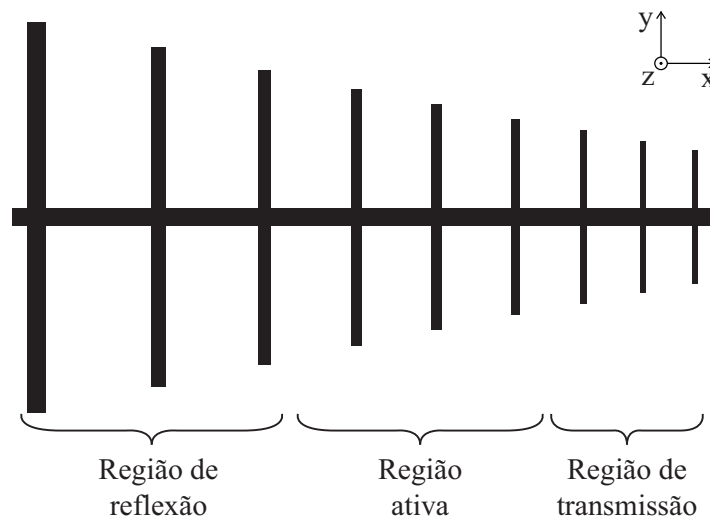


Figura 2 – Regiões de operação da antena log-periódica.

2.2 Antena Log-Periódica Impressa Linear

As antenas de microfita podem ser utilizadas em diversas aplicações devido a sua facilidade de construção, peso e baixo custo de fabricação. Estas antenas apresentam inúmeras vantagens, tais como:

- Facilidade de integração com circuitos discretos ativos e passivos;
- Baixo perfil aerodinâmico;
- Moldáveis a superfícies planas e não planas;
- Versáteis em termos de impedância, polarização e frequência;
- Construídas através da tecnologia de circuito impresso (PCB).

No entanto, tais antenas apresentam largura de banda estreita, restringindo a sua utilização em aplicações que exijam faixa de operação larga. Assim, para contornar esta desvantagem das antenas impressas, emprega-se a topologia de antenas log-periódicas lineares, que tem como principal característica a operação em banda larga.

Diferentemente dos dipolos cilíndricos que compõem a antena log-periódica, a tecnologia de circuito impresso é composta por um determinado substrato, composto de material dielétrico, sendo este coberto por lâminas de cobre aderidas a suas superfícies. A Figura 3 apresenta esquematicamente uma log-periódica impressa, sendo que cada haste do dipolo é impressa em faces opostas do substrato para obter-se inversão de fase entre dipolos adjacentes (POZAR, 2005).

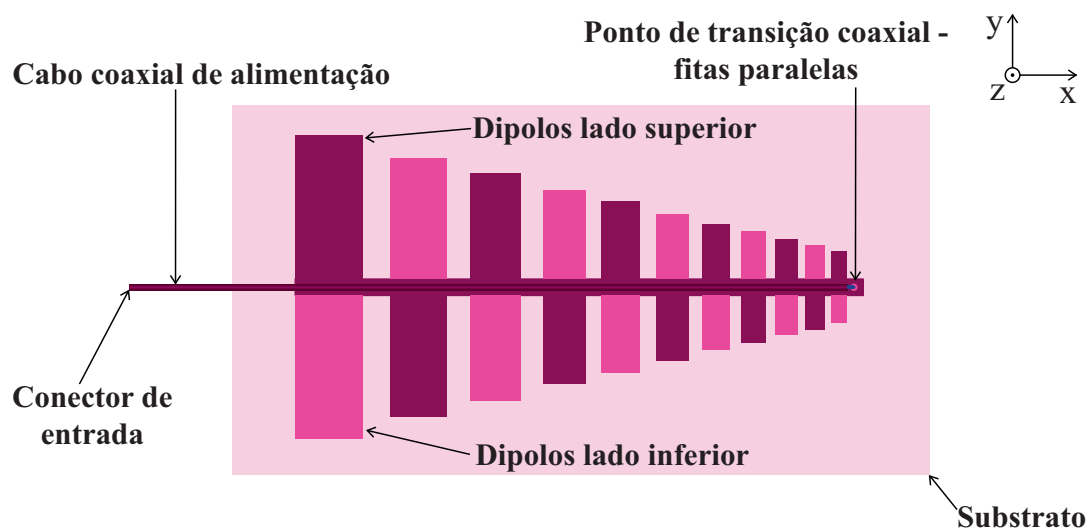


Figura 3 – Antena log-periódica linear banda larga.

Os comprimentos dos dipolos são definidos através de um ângulo de abertura α , dispostos sobre um eixo e espaçados em intervalos de acordo com uma função logarítmica da frequência (BALANIS, 2005). Os elementos mais longos da rede ditam as frequências mais baixa de operação e os elementos menores as mais altas.

2.2.1 Parâmetros de Projeto de uma Antena Log-Periódica Impressa Linear

O procedimento de cálculo de uma antena log-periódica será descrito nesta seção. Inicialmente, será obtida a largura da linha de alimentação da rede. Este tipo de antena apresenta duas fitas paralelas impressas em faces opostas do substrato. A largura da linha de alimentação pode ser projetada empregando-se as Equações (2.1)-(2.7),

$$Z_{ofp} = 2Z_{omicrofita} \quad (2.1)$$

$$Z_{omicrofita} = \frac{120}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln\left(\frac{F_1}{u} + \sqrt{\left(1 + \frac{4}{u^2}\right)}\right) \quad (2.2)$$

$$F_1 = 6 + (2\pi - 6)e^{-(\frac{30,66}{u})^{0,7528}} \quad (2.3)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2}\left(1 - \frac{10}{u}\right)^{-ab} \quad (2.4)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln\left(\frac{u^4 + (\frac{u}{52})^2}{u^4 + 0,432}\right) + \frac{1}{18,7} \ln\left(1 + \left(\frac{u}{18,1}\right)^3\right) \quad (2.5)$$

$$b = 0,564\left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 0,3}\right)^{0,053} \quad (2.6)$$

$$u = \frac{W}{\frac{h}{2}}, \quad (2.7)$$

em que

- Z_{ofp} é a impedância característica da linha de fitas paralelas;
- $Z_{omicrofita}$ é a impedância característica de uma microfita impressa em substrato com metade da espessura h do laminado empregado para confecção da linha de fitas paralelas;
- ϵ_{re} é a constante dielétrica efetiva da microfita descrita no item anterior;
- ϵ_r é a constante dielétrica do substrato;
- h é a espessura do substrato utilizado;
- W é a largura da linha de fitas paralelas.

A Figura 4 apresenta os parâmetros construtivos de uma antena log-periódica de circuito impresso, sendo estes definidos e calculados através do fator de escala σ , fator de espaçamento τ e do ângulo de abertura α da rede (WILDNER, 2015). O ângulo de abertura possibilita o cálculo do comprimento dos dipolos da rede (WELKE, 2014), dado por

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1 - \tau}{4\sigma}\right). \quad (2.8)$$

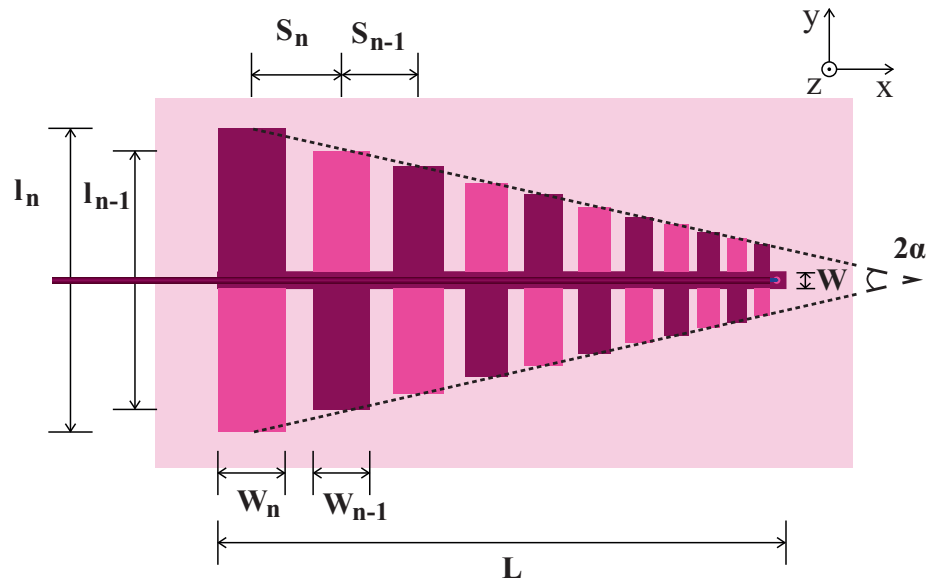


Figura 4 – Parâmetros construtivos da antena log-periódica linear.

Os fatores de escala e espaçamentos são definidos através do gráfico presente em (BALANIS, 2005), em que são apresentadas as curvas de diretividade específica para os valores de σ e τ .

A antena log-periódica apresenta característica banda larga. No entanto, para uma dada frequência de operação dentro da banda especificada, somente alguns dipolos estarão ativos (WELKE, 2014). Dessa forma, uma largura de banda da região ativa da antena é dada por

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot \alpha. \quad (2.9)$$

Por meio da largura de banda da região ativa, especifica-se a largura de banda de projeto B_s , dada a largura de banda especificada B , através de

$$B_s = BB_{ar} = B[1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot \alpha]. \quad (2.10)$$

O comprimento total da estrutura log-periódica pode ser calculado pela Equação (2.12), sendo que $\lambda_{m\acute{a}x}$ é o comprimento de onda máximo de operação, v velocidade da luz e f_{min} frequência mínima de operação

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{v}{f_{min}} \quad (2.11)$$

$$L = \frac{\lambda_{m\acute{a}x}}{4} \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) \cot \alpha. \quad (2.12)$$

A largura dos dipolos pode ser obtida através da relação entre a impedância de entrada e o n -ésimo dipolo da rede Z_a (WELKE, 2014). Considerando que o maior dipolo tenha o comprimento de

$$l_{m\acute{a}x} = 0,5\lambda_{m\acute{a}x} \quad (2.13)$$

$$W_n = \frac{\pi l_{m\acute{a}x}}{e^{\frac{Z_a}{120} + 2,25}}. \quad (2.14)$$

O espaçamento entre os dipolos rede estão associados diretamente ao fator de escala σ e comprimento do maior dipolo, sendo obtido por

$$S_n = 2\sigma l_{m\acute{a}x}. \quad (2.15)$$

Para a determinação dos demais parâmetros construtivos da antena apresentados na Figura 4, foi utilizado a expressão dada por

$$\tau = \frac{l_{n-1}}{l_n} = \frac{S_{n-1}}{S_n} = \frac{W_{n-1}}{W_n}. \quad (2.16)$$

O número total de elementos que compõem a antena log-periódica, é obtido por

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln(\frac{1}{\tau})}. \quad (2.17)$$

2.3 Estado da Arte dos Principais Fractais Aplicados à Engenharia de Antenas

A técnica de fractais pode ser utilizada em sistemas de comunicação sem fio, pois, para tais aplicações, necessita-se de antenas pequenas, de banda larga ou múltiplas bandas. Para atender ao requisito de antenas compactas, limitações normalmente são impostas ao projeto. A solução para atender a esta exigência é a utilização de técnicas de fractais, que

são baseadas no uso de uma forma geométrica recursiva e com dimensões fracionárias das originais (MORAIS, 2012).

De acordo com (FILHO, 2010), a forma do *patch* influencia na distribuição de corrente e de campo na superfície da antena. O irradiador pode apresentar qualquer geometria, como quadrada, circular, triangular, anel, fractal e elíptica, etc. A Figura 5 mostra as geometrias fractais que podem ser utilizadas como *patch*.



Figura 5 – Geometrias fractais.

Na natureza, podem-se encontrar diversos tipos de geometrias fractais que possuem similaridade inerente e auto-inerente. Estes podem ser classificados como determinísticos ou aleatórios. O matemático Benoit B. Mandelbrot introduziu novos fractais para modelar estruturas complexas, como árvores e montanhas, e que possuem uma inerente auto-similaridade e auto-afinidade em suas geometrias (BALANIS, 2005) (MANDELBROT, 1989).

Na engenharia de antenas, tais geometrias podem ser empregados para a miniaturização. Para se obter um fractal, deve-se iniciar o processo por meio de uma geometria básica, denominada iniciador. A seguir são apresentadas algumas geometrias clássicas.

2.3.1 Curva de Minkowski

Também conhecida como ilha de Minkowski, esta geometria é obtida através da substituição dos segmentos de reta de um iniciador quadrado (MORAIS, 2012), como demonstrado na Figura 6. Este procedimento iterativo pode ser utilizado em um número infinito de iterações. Tem como propriedade característica a sua auto-similaridade, podendo ser utilizada para o projeto de antenas multibanda (OLIVEIRA et al., 2010).

Esta técnica é frequentemente utilizada em antenas de microfita, a fim de obter miniaturização. No entanto, a largura de banda que pode ser alcançada é relativamente pequena. Para o caso em que se deseja a miniaturização das antenas e maior largura de banda, deve-se utilizar a técnica de fractal de Koch. A curva de Minkowski é frequentemente utilizada em antenas *patch* com formato quadrado ou retangular, como apresentado em (OLIVEIRA et al., 2010).

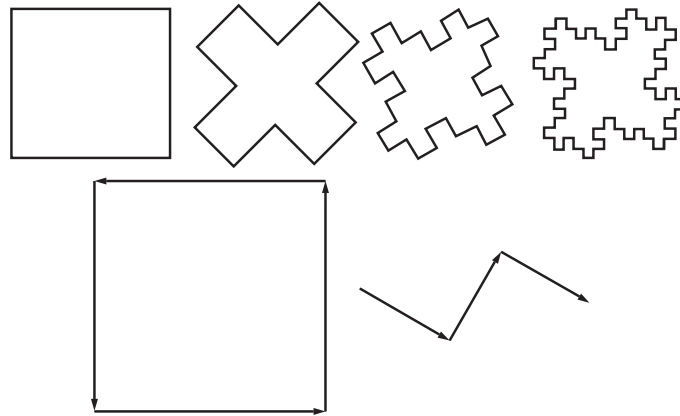


Figura 6 – Curva de Minkowski.

2.3.2 Triângulo de Sierpinski

Esta geometria é atribuída ao matemático Waclaw Sierpinski, que estudou suas principais propriedades (PEITGEN; JURGEN; SAUPE, 2003). A geometria de Sierpinski pode ser obtida através da remoção de um triângulo equilátero invertido de menor escala a partir de um triângulo equilátero inicial, como demonstrado na Figura 7. A geometria é obtida dividindo-se os lados do triângulo equilátero inicial em 2 partes e unindo-se os pontos médios obtidos. Ao remover o primeiro triângulo, restarão três triângulos de menor escala (PINHEIRO, 2014). Iterações de ordem mais elevada podem ser obtidas repetindo-se o procedimento aos triângulos resultantes.

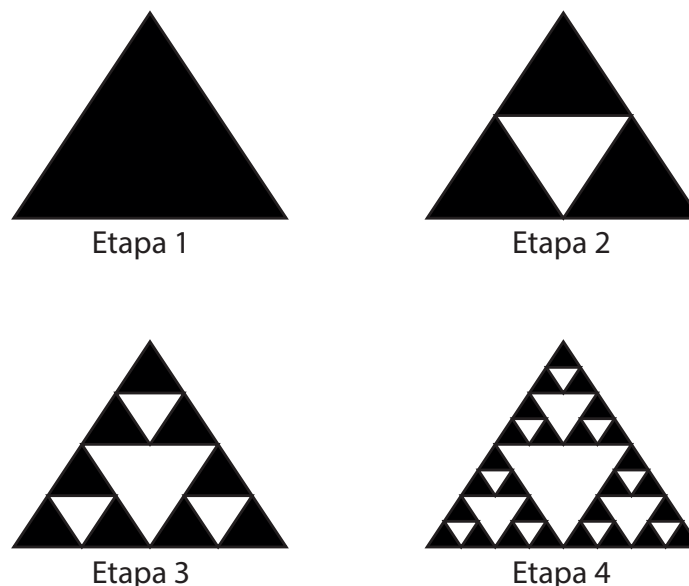


Figura 7 – Triângulo de Sierpinski.

Como se pode observar na Figura 7, os triângulos definidos nas etapas subsequentes ao inicial (etapa 1) recordam o iniciador devido a sua auto-similaridade.

Este tipo de fractal pode ser empregado como dipolo ou monopolo, tendo como características favoráveis de irradiação em termos de ressonância, impedância, diretividade

e diagrama, conforme abordado em (MORAIS, 2012).

2.3.3 Geometria de Koch

Estes fractais foram estudados pela primeira vez pelo matemático Helge von Koch. As curvas de Koch são demonstradas na Figura 8 (VINOY; ABRAHAM; VARADAN, 2003), (GANGULY, 2003) e (FELBER, 2000). A cada nova iteração, o segmento de reta é dividido em quatro pequenas retas com partes iguais, formando uma linha poligonal (MANDELBROT, 1989). De maneira simples, o fractal de Koch pode ser obtido da seguinte maneira:

- Nível 0: Equivalente a um segmento de reta;
- Nível 1: Divide-se em 4 partes iguais o segmento de reta (nível 0), formando uma linha poligonal;
- Nível 2: Repete-se o nível 1 para cada um dos segmentos;
- Nível n: Repete-se o processo para cada segmento do nível (n-1).

Este tipo de fractal possibilita o preenchimento de espaço e aumento do comprimento elétrico da antena, reduzindo, assim, as dimensões dos elementos (WILDNER, 2015). Ao se aplicar esta técnica de fractal aos dipolos que compõem a rede log-periódica, reduzir-se o comprimento total da antena, tornando-a compacta e com as mesmas funcionalidades da versão linear.

A Figura 8 apresenta as três primeiras iterações da curva de Koch, denominadas como K0, K1, K2 e K3. Conforme esta, como forma de exemplificação, as iterações apresentadas possuem o mesmo comprimento. Ao aplicar a técnica na prática, a cada iteração subsequente, o comprimento efetivo dos dipolos é reduzido. O primeiro dipolo correspondente à Figura 8 é o segmento linear denominado K0, que corresponde a uma das hastes de um dipolo convencional.

A antena de Koch é utilizada para ilustrar de forma eficaz como os formatos fractais podem melhorar algumas características das antenas de formato euclidiano comum, podendo ser um bom candidato para se tornar um eficiente irradiador (WILDNER; VANTI, 2012). Nas primeiras cinco iterações da curva de Koch, obtêm-se os maiores benefícios, sendo que pouca alteração nas características do dipolo fractal e um pequeno aumento na complexidade ocorrem com iterações adicionais (BALANIS, 2005).

A primeira iteração de fractal de Koch é apresentada na Figura 9, sendo que, para se obter a iteração K1, divide-se, inicialmente o segmento de reta K0 em quatro pequenas retas com comprimentos iguais, conforme a Equação (2.18). As duas retas centrais são

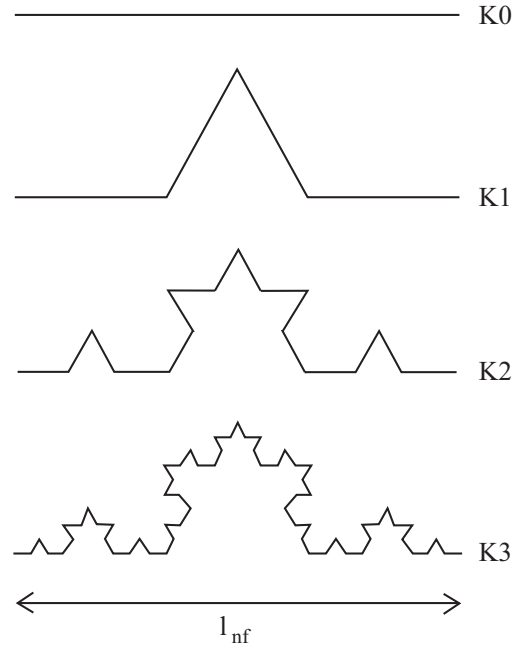


Figura 8 – Iterações da curva de Koch.

usadas para formar um triângulo equilátero sem a base. Assim, a primeira iteração K1 apresenta uma redução para $3/4$ do comprimento de K0.

$$C = l_n \left(\frac{1}{4}\right)^n \quad (2.18)$$

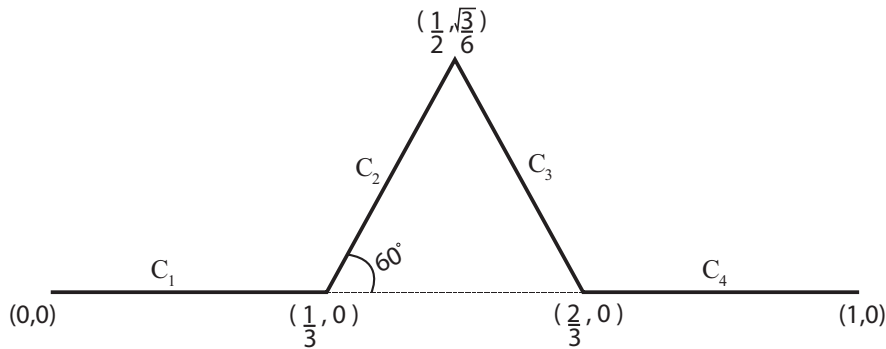


Figura 9 – Primeira iteração de Koch.

O comprimento efetivo de cada dipolo após cada iteração utilizando a técnica de fractal de Koch pode ser calculado através de

$$l_{nf} = \left(\frac{3}{4}\right)^n l_n \quad (2.19)$$

em que l_n corresponde ao comprimento do dipolo linear.

Conforme exemplificado na Figura 9, a cada nova iteração os segmentos de reta dos dipolos são reduzidos, transladados e rotacionados. A rotação e a translação são obtidas através da aplicação do triângulo equilátero ao segmento de reta. A Figura 10 apresenta

as dimensões de um triângulo equilátero, sendo que este possui o mesmo comprimento para seus segmentos de reta C e altura definida por

$$h_{nf} = \frac{\sqrt{3}}{2}C. \quad (2.20)$$

Para o caso da iteração K1 apresentada na Figura 9, o segmento C_1 possui rotação de 0° e translação igual a 0° . Os segmentos C_2 e C_3 formam o triângulo equilátero sem a base, podendo ser aplicada a Equação (2.20) para a obtenção de sua altura. Como o triângulo equilátero possui ângulos iguais a 60° , o segmento C_2 possui rotação de 60° e translação equivalente a $1/3$. O segmento C_3 terá rotação de -60° e translação de $1/2$ na horizontal e de $\frac{\sqrt{3}}{6}$ na vertical. O segmento C_4 possui rotação de 0° e translação de $2/3$. Ou seja, a iteração K1 é obtida através de diversas transformações do segmento de reta de K0 (WILDNER, 2015).

As demais iterações de Koch (K2, K3, K4, K5), são obtidas através da utilização das mesmas transformações de segmentos de reta aplicados anteriormente de forma iterativa.

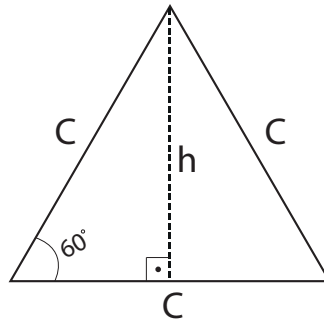


Figura 10 – Triângulo equilátero.

A segunda iteração do fractal de Koch é demonstrada na Figura 11, sendo esta obtida a partir da iteração K1, quando se substituem os segmentos de reta de K1 por novas transformações.

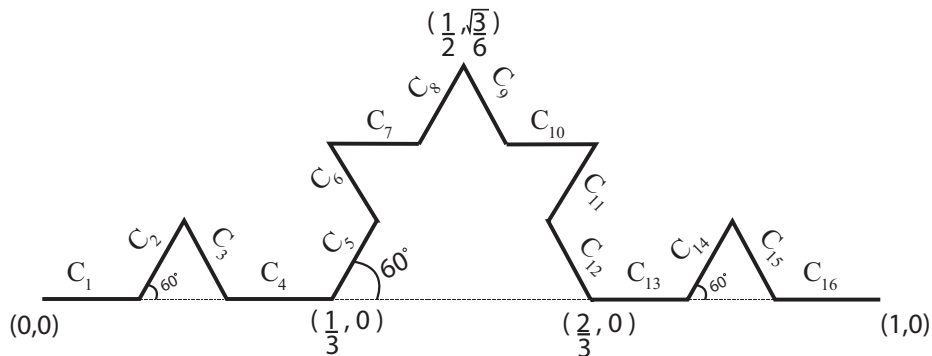


Figura 11 – Segunda iteração de Koch.

3 Projeto de Antenas Log-Periódicas lineares

Para se construir uma antena log-periódica impressa faz-se necessária a utilização dos parâmetros de projeto apresentados na seção 2.2.1. Para operação compatível aos sistemas WLAN e WiMAX, a faixa escolhida para o projeto corresponde a 2,3 GHz a 6 GHz.

Neste projeto, é empregado o substrato Taconic TLC-338, que possui permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 3,3$ e espessura de $h = 1,524$ mm, conforme (TACONIC, 2017). Em antenas impressas, o tipo de substrato utilizado no projeto torna-se primordial para obtenção dos resultados desejados. Ao apresentar tangente de perdas $\delta = 0,0034$, considerada baixa, reduz-se as possíveis perdas dielétricas da antena. Um cabo coaxial é empregado para a alimentação da antena (50Ω), sendo este fixado à antena por meio de solda.

Para que o projeto da antena log-periódica seja considerado satisfatório, deseja-se obter resultados simulados e práticos de valores de coeficiente de reflexão menor ou igual a -10 dB na faixa de interesse, além de diretividade de 8 dBi, polarização linear e impedância de entrada de 50Ω .

3.1 Alimentação por Cabo Coaxial

Conforme (FILHO, 2010), a alimentação via cabo coaxial em antenas de microfitas podem ser aplicada diretamente através da perfuração no substrato, sendo requerida operação cuidadosa, pois o controle mecânico da conexão é extremamente manual, podendo interferir nas frequências mais altas de operação da antena, devido a alimentação ser efetuada na região de transmissão da antena. O casamento de impedância da antena é obtido através da posição da alimentação na antena.

Ao se realizar a conexão em uma dada posição, toda a estrutura da antena é responsável por alimentar os demais elementos de forma que todos os parâmetros construtivos da mesma impactam no casamento de impedância de toda faixa de operação (POOLE, 2017).

No caso descrito em (CHAULOUX; COLOMBEL,), a distância da posição do cabo coaxial à linha de alimentação da antena e o fator de escala foram variados, a fim de reduzir o coeficiente de reflexão e a largura de banda da antena. Ao distanciar o cabo coaxial da antena, (CHAULOUX; COLOMBEL,) obteve a redução do coeficiente de reflexão. Para as frequências altas, o coeficiente de reflexão não foi alterado. No entanto, para as baixas frequências, obteve-se coeficientes de reflexão abaixo de -10 dB. O autor também fez uso um plano de terra, a fim de isolar a antena de outros dispositivos eletrônicos.

Não foi encontrado na bibliografia um estudo relacionado ao impacto das variações

das posições do cabo coaxial à antena, referente a busca de melhores desempenhos eletromagnéticos. Assim, foi realizado um estudo de diferentes posicionamentos para o cabo, além do aumento da linha de alimentação e raio de desbaste. Este estudo será apresentado na seção 3.2.1 detalhadamente. A Figura 12 apresenta a vista lateral da transição coaxial - fitas paralelas (linha de alimentação), sendo que o condutor central do cabo coaxial é conectado diretamente à fita inferior através de uma perfuração no substrato.

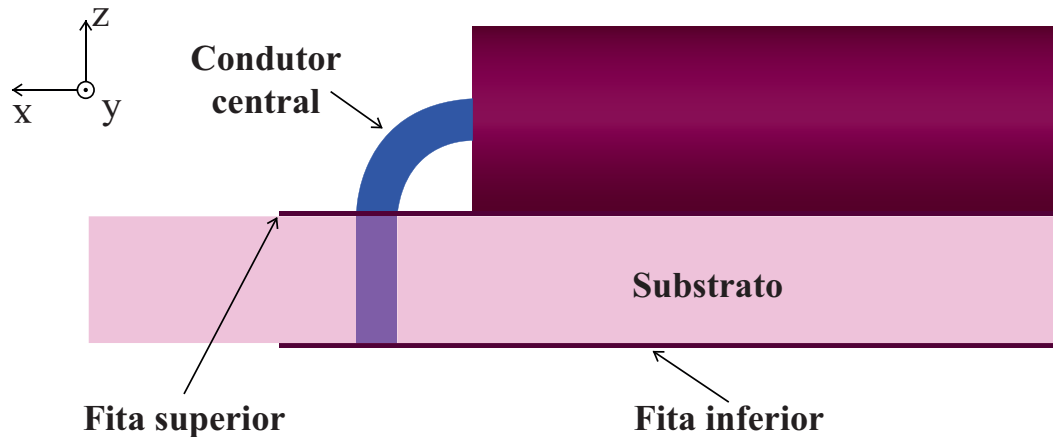


Figura 12 – Detalhe da transição do cabo coaxial - linha de fitas paralelas, vista lateral.

3.2 Projeto de uma Antena Log-Periódica Linear Banda Larga

Para o projeto da antena log-periódica em circuito impresso, inicialmente deve ser obtida a largura da linha de alimentação da antena. Para isso, são utilizadas as Equações (2.1)-(2.7), obtendo-se a largura de 4,5 mm.

Considerando a diretividade de 8 dBi como sendo resultado satisfatório de projeto, determinou-se o fator de escala e espaçamento da antena a partir do gráfico apresentado em (BALANIS, 2005). O fator de escala obtido foi de $\sigma = 0,157$ e de espaçamento $\tau = 0,865$. Com estes parâmetros definidos, empregando-se na equação (2.8), obteve-se ângulo de abertura $\alpha = 12,13^\circ$.

O cálculo das dimensões e espaçamentos dos dipolos que compõem a rede pode ser realizado através da utilização das equações (2.9)-(2.17). O número total de elementos calculados foi de $N = 11$; a largura do maior dipolo equivale a $W_n = 14,236$ mm; comprimento do maior dipolo $l_n = 65,217$ mm; o espaçamento entre o maior dipolo e o elemento adjacente é $S_n = 20,478$ mm; finalmente o comprimento total calculado da estrutura é de $L = 118,516$ mm.

Por meio das Equações (2.9)-(2.16), pôde-se calcular primeiramente as dimensões do primeiro dipolo da rede, sendo correspondente ao dipolo de menor frequência. Para obter as demais dimensões e espaçamentos dos dipolos subsequentes, empregou-se a equação

(2.16), que corresponde a uma expressão recursiva. A Tabela 1 lista as dimensões de todos os dipolos que compõem a antena.

Tabela 1 – Parâmetros construtivos da antena log-periódica impressa

Dipolo n	W_n (mm)	l_n (mm)	S_n (mm)
1	14,236	61,217	20,478
2	12,314	56,412	17,713
3	10,651	52,209	15,322
4	9,213	48,796	13,253
5	7,969	36,511	11,464
6	6,893	31,582	9,916
7	5,963	27,318	8,5779
8	5,158	23,630	7,419
9	4,461	20,440	6,418
10	3,859	17,680	5,551
11	3,338	15,294	4,80

As dimensões do dielétrico foram determinadas de tal maneira a acrescentar 10 vezes a altura do substrato ao comprimento total e comprimento do maior dipolo da rede. O comprimento total obtido da estrutura é de aproximadamente 155 mm e largura total de 80 mm, sendo que será aumentado o comprimento da linha da rede, a fim de se estudar o comportamento da alimentação à antena.

Após efetuados os cálculos dos parâmetros construtivos da antena, a mesma foi desenvolvida computacionalmente a partir do *software Ansys HFSS*, que é utilizado para a realização de simulações eletromagnéticas. A Figura 13 apresenta a antena log-periódica linear banda larga, com todos os parâmetros construtivos definidos anteriormente.

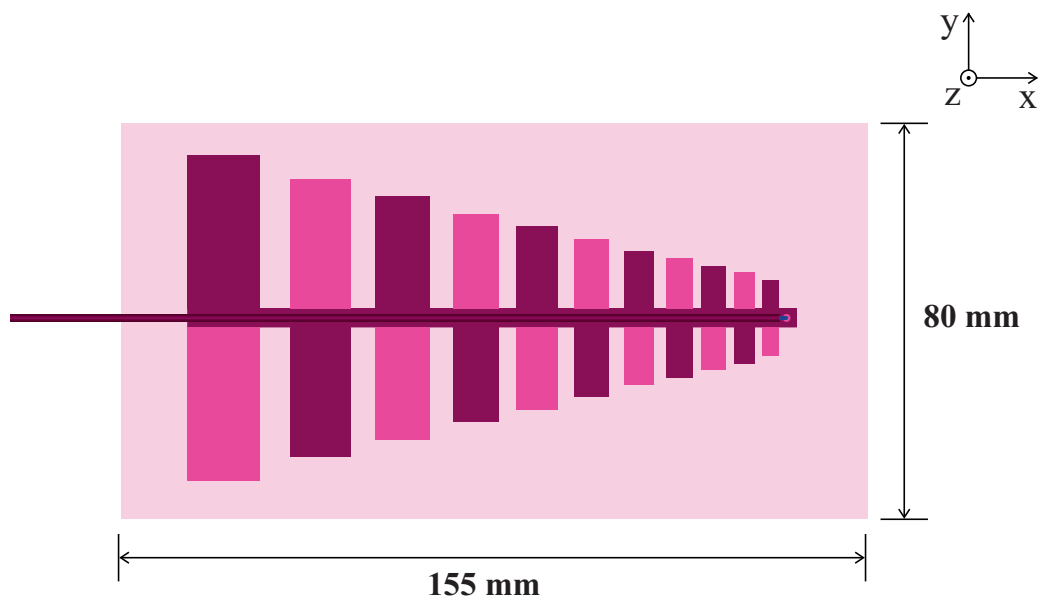


Figura 13 – Antena log-periódica linear banda larga projetada.

3.2.1 Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas

3.2.1.1 Posicionamento da Transição

Inicialmente foi posicionado o cabo coaxial à linha de alimentação da antena estando fixado após o último dipolo que contempla a rede, como mostrado nas Figuras 12 e 14. A posição inicial do cabo, corresponde a posição da alimentação de $L_c = 0,383$ mm, aumento da linha após desbaste $L_s = 0,383$ mm e do raio de desbaste à linha de alimentação igual a $R = 0,75$ mm.

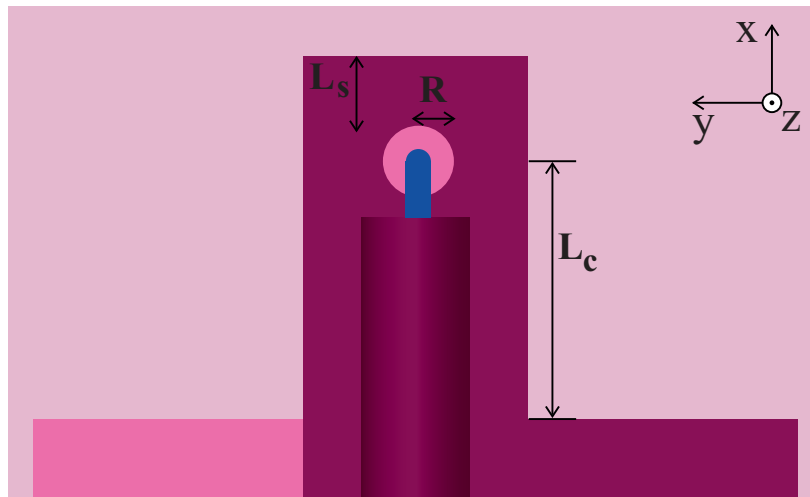


Figura 14 – Detalhe da transição entre cabo coaxial e linha de fitas paralelas, vista superior.

Após ser estipulada a posição inicial do cabo coaxial, a estrutura foi simulada e o coeficiente de reflexão obtido é mostrado na Figura 15. Uma vez que o valor deve ser menor ou igual a -10 dB para garantir a transmissão de potência para o devido funcionamento do projeto, verifica-se que as especificações não foram atendidas ao longo de toda a faixa de operação. Assim, optou-se em variar o posicionamento do cabo coaxial em relação à antena.

Como a transição encontra-se posicionada nos dipolos correspondentes às frequências superiores, o coeficiente de reflexão nestas frequências torna-se mais crítico e susceptível a alterações no momento da construção da antena. A região onde é realizada a alimentação apresenta alta intensidade de campo, assim, podem ocorrer diversas distorções ao se conectar o cabo à antena, afetando, diretamente, no coeficiente de reflexão e diagrama de irradiação. Portanto, será variada a posição do cabo coaxial em relação à antena, para estudar o efeito deste parâmetro sobre o coeficiente de reflexão.

Para efetuar a variação da posição do cabo coaxial, uma série de simulações para a validação do casamento de impedância foram realizadas.

Foi alterada a posição da transição L_c , para o comprimento da linha de alimentação da antena de $L_s = 0,383$ mm. A Figura 16 apresenta os resultados referentes aos coeficientes de reflexão para a variação da transição. Percebe-se que a posição que resulta em menores

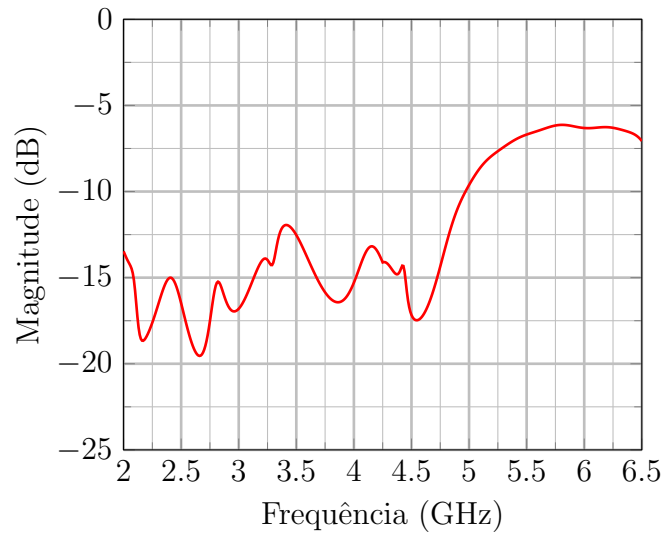


Figura 15 – Coeficiente de reflexão da posição inicial da alimentação da antena linear.

valores para o coeficiente de reflexão é $L_c = 7,383$ mm, com -10 dB em toda a faixa de interesse.

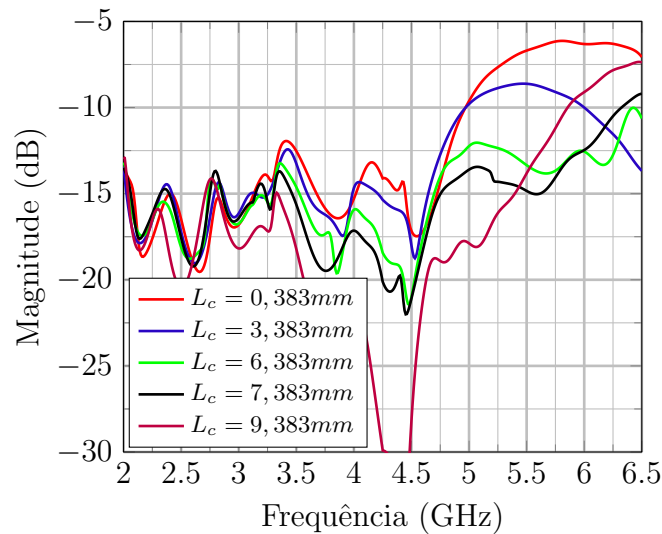


Figura 16 – Coeficiente de reflexão das posições de transição na antena log-periódica linear.

3.2.1.2 Influência do Toco em Aberto na Transição

Após a validação do melhor posicionamento da transição, foi variado o comprimento do toco L_s após a desbaste do cobre, como mostrado da Figura 14. Verifica-se, na Figura 17, a influência do toco no casamento de impedância da antena, principalmente nas frequências mais elevadas. Assim, optou-se em utilizar a distância mínima estipulada inicialmente, sendo esta correspondente a $L_s = 0,383$ mm.

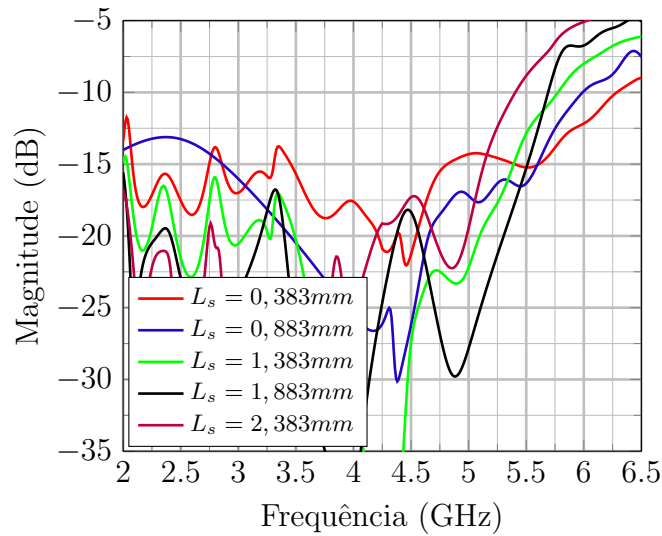


Figura 17 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica linear.

3.2.1.3 Influência do Raio de Desbaste

Ao conectar o cabo coaxial à antena, deve-se efetuar um furo no substrato para haver a alimentação entre a linha de fitas paralelas, como apresentado na Figura 14. Para evitar curto-circuito, o cobre da linha de alimentação ao qual a malha externa do cabo é soldada deve ser parcialmente removido. Assim, foi variado o raio de desbaste do cobre para ser posteriormente analisado o seu impacto no casamento de impedância da antena. Foi considerada para a variação do raio de desbaste $L_c = 7,383\text{ mm}$ e $L_s = 0,383\text{ mm}$. A Figura 18 apresenta a variação do raio de desbaste do cobre, sendo que, ao se aumentar o desbaste, o coeficiente de reflexão não sofre grande alteração em toda banda de operação. Assim sendo, optou-se em preservar o raio definido inicialmente, correspondente a $R = 0,75\text{ mm}$.

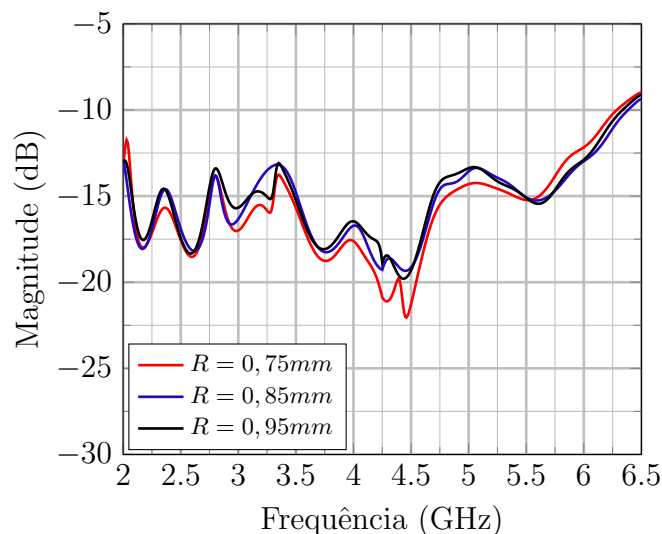


Figura 18 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica linear.

3.2.1.4 Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R

A Figura 19 apresenta os melhores resultados obtidos referentes à variação de distintas posições da transição alterando-se os parâmetros L_c e L_s . A curva em azul na Figura 19 apresenta valores abaixo de -10 dB. Assim, obteve-se a posição da transição para $L_c = 4,383$ mm e $L_s = 1,383$ mm.

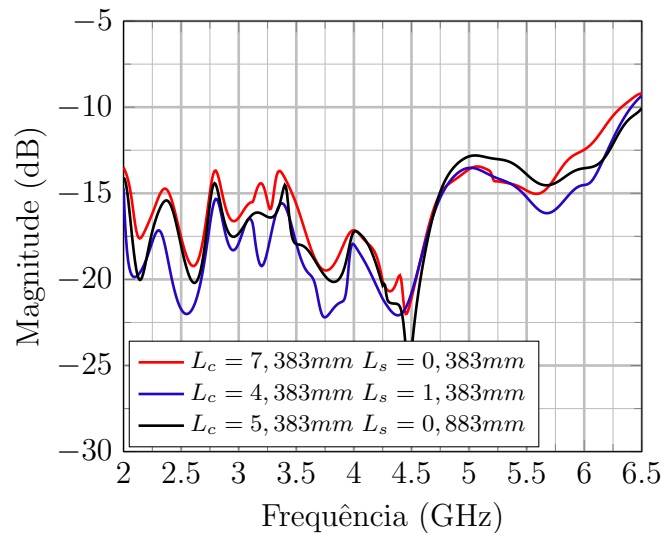


Figura 19 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica linear.

Após a análise e otimização do coeficiente de reflexão da antena, os diagramas de irradiação para as frequências centrais dos sistemas WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz) foram calculados. O diagrama de irradiação em 2,4 GHz e 5,8 GHz são apresentados nas Figura 20 e Figura 21, respectivamente. Os ganhos obtidos nestas frequências equivalem a 8,251 dBi e 8,04 dBi. Para ambas as frequências centrais, obteve-se o ganho das antenas acima de 8 dBi, atendendo as especificações de projeto.

Sabendo que, no ganho considera-se a eficiência de irradiação da antena e na diretividade leva-se em conta as propriedades de irradiação da mesma, ambas apresentam o mesmo formato de diagrama de irradiação, no entanto, a sua intensidade pode variar. Foi estipulado no projeto inicial, obter diretividade equivalente a 8 dBi para as frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, respectivamente. Assim, obteve-se diretividade equivalente a 8,666 dBi para 2,4 GHz e 8,531 dBi para 5,8 GHz.

3.2.2 Análise do Impacto de Possíveis Erros de Construção da Antena

A antena log-periódica linear foi projetada utilizando o *software* de simulação eletromagnética *Ansys HFSS*. Através deste, pode-se projetar a antena visando à sua construção na prática. A alimentação via cabo coaxial da antena implementada no projeto é efetuada por meio da perfuração do substrato, sendo centralizado o condutor central do

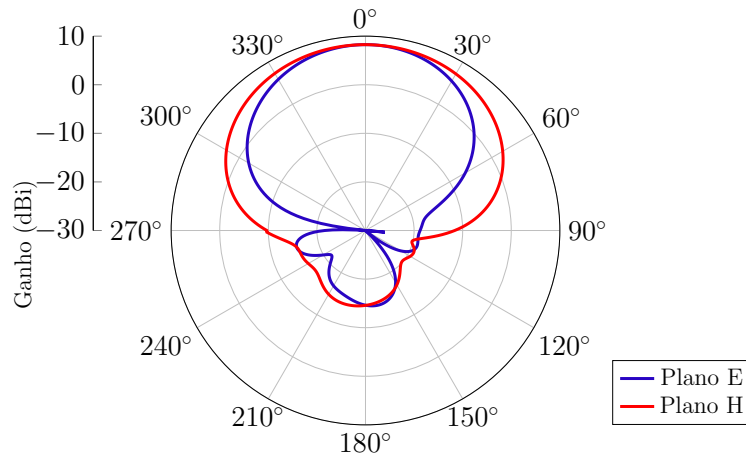


Figura 20 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear banda larga para a frequência de 2,4 GHz.

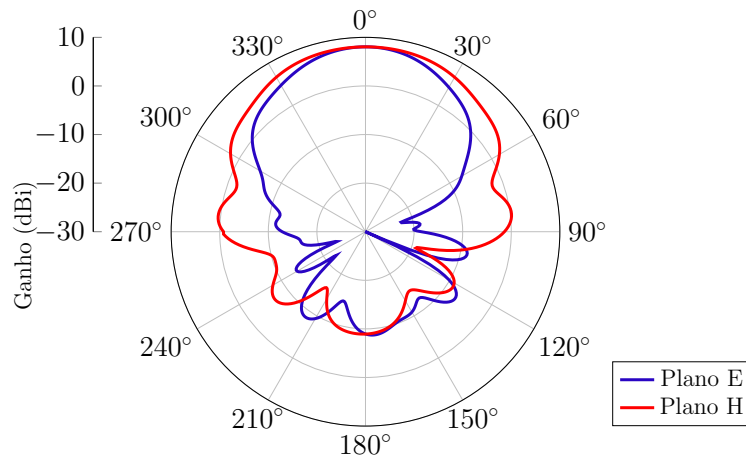


Figura 21 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear banda larga para a frequência de 5,8 GHz.

cabo coaxial ao desbaste. Como nas simulações computacionais considera-se que não há ocorrência de desvios mecânicos e na construção da antena não se consegue reproduzir fielmente a estrutura simulada, a precisão do processo de prototipação é crucial. Além disso, a soldagem da transição cabo coaxial - linha de fitas paralelas é realizada manualmente, podendo interferir diretamente no desempenho nas frequências mais altas de operação da antena.

Como a alimentação encontra-se posicionada nos dipolos correspondentes às frequências superiores, o coeficiente de reflexão nestas frequências torna-se mais crítico e susceptível a alterações no momento da construção da antena. Assim, diversas simulações dos possíveis erros que podem vir a ocorrer na prototipação da antena foram realizadas.

Inicialmente, foi deslocado o condutor central apresentado em azul na Figura 14, sendo deslocado o cabo no sentido horizontal para a direita e esquerda inicialmente. A Figura 22 apresenta o deslocamento horizontal do cabo para a direção esquerda e na Figura

23 o deslocamento pela direita. Percebe-se que o desvio do cabo com deslocamento na horizontal não afetou significativamente na faixa de operação da antena de 2,3 GHz a 6 GHz, obtendo coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB como requerido no projeto. Em seguida, o condutor foi deslocado no sentido vertical. A Figura 24 apresenta o resultado do deslocamento do cabo para cima e na Figura 25 para a parte inferior. Todos os deslocamentos estudados apresentaram pouca influência no coeficiente de reflexão na faixa de operação da antena. No entanto, este estudo foi fundamental para se ter conhecimento dos possíveis erros que possam ocorrer na prática ao soldar o cabo coaxial à antena.

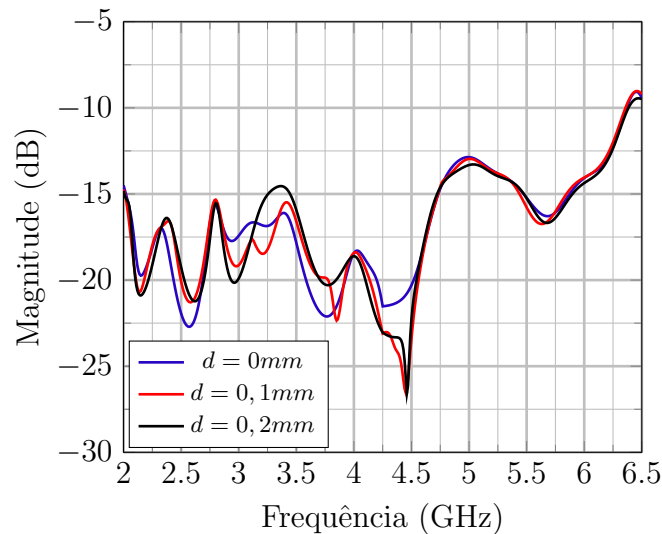


Figura 22 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a esquerda da antena log-periódica linear.

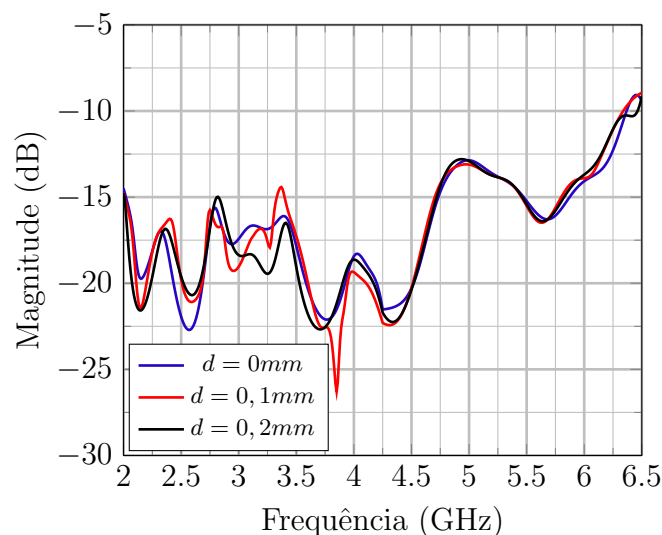


Figura 23 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a direita da antena log-periódica linear.

Outra dificuldade de implementação da antena é a dobra do condutor central à linha de alimentação. Não é possível reproduzir a dobra igualmente na simulação, devido

ao ajuste ser realizado manualmente, assim a execução deste deve ser de extremo cuidado, podendo afetar diretamente no coeficiente de reflexão das altas frequências.

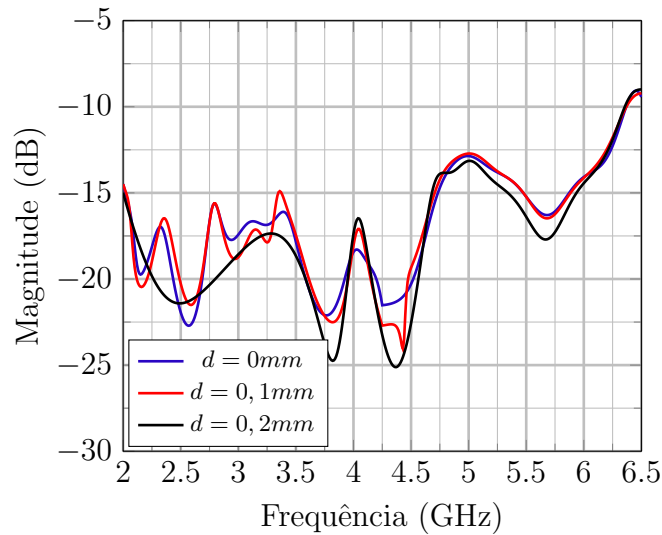


Figura 24 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical inferior da antena log-periódica linear.

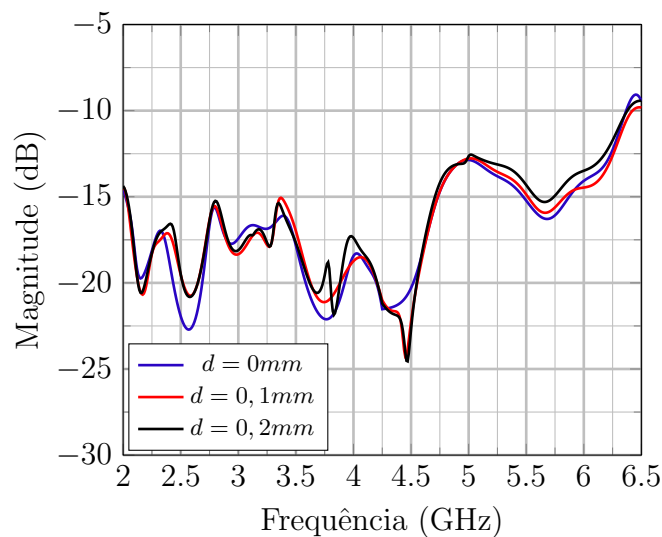


Figura 25 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical superior da antena log-periódica linear.

Além dos possíveis erros no deslocamento do condutor central, foi simulado a variação do distanciamento do cabo coaxial ao raio de desbaste. A Figura 26 apresenta as curvas referente ao distanciamento do cabo, sendo que, quanto maior o distanciamento maior o coeficiente de reflexão, tendo impacto direto no casamento de impedância da antena.

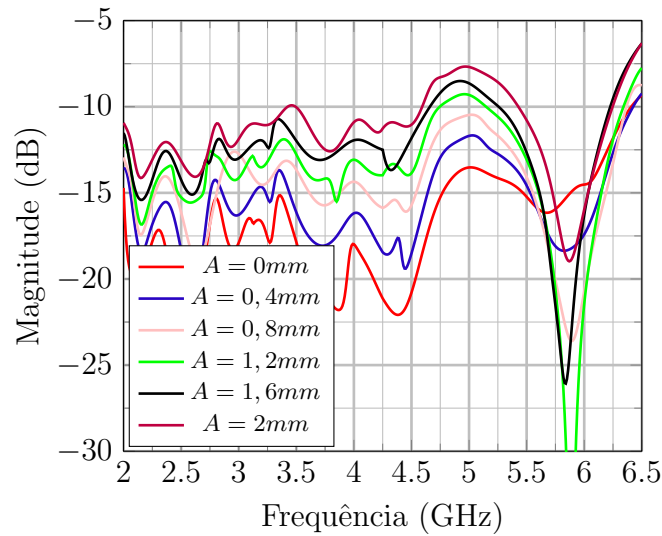


Figura 26 – Aumento da distância entre raio de desbaste e posição do cabo coaxial.

3.3 Projeto de uma Antena Log-Periódica Linear Dupla-Faixa

Como alternativa a diversas outras topologias, propõe-se o desenvolvimento de uma antena dupla-faixa a partir da estrutura log-periódica linear descrita na seção anterior. Esta antena deve operar nas frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz), além de apresentar coeficiente de reflexão menor ou igual a -10 dB, diretividade de 8 dBi, polarização linear e impedância de entrada de 50Ω .

Ao implementar uma antena dupla-faixa, previne-se a recepção de sinais de frequências que não pertençam à faixa de interesse das redes WLAN e WiMAX. Assim, deve-se modificar o modelo inicial da antena log-periódica linear, apresentada na Figura 13. Em (WELKE, 2014), uma antena log-periódica linear dupla-faixa foi estudada a partir de uma log-periódica linear banda larga, porém o trabalho deteve-se apenas a realização de simulações eletromagnéticas. Cada dipolo que contempla a rede da antena log-periódica apresenta frequência de ressonância distinta. Ao unir todos estes dipolos, implementa-se uma rede com atuação banda larga. Por outro lado a retirada de um dipolo da rede pode fazer com que uma faixa de frequências apresente elevada reflexão, separando a faixa de frequência inicial em duas. Ao separar a banda, obtém-se a atuação dupla-faixa esperada.

Em vista disso, foram efetuadas diversas simulações da antena log-periódica linear, sendo retirados distintos dipolos da rede, com o propósito de obter o comportamento dupla-faixa. Considerando-se que se deseja separar a banda total de atuação em duas faixas que contemplem as frequências de WLAN e WiMAX, a primeira escolha natural seria remover um dos dipolos centrais. A Figura 27 apresenta o coeficiente de reflexão da antena log-periódica com a retirada do quinto dipolo da rede. Verifica-se que não se obteve o desempenho esperados nas frequências desejadas.

Assim, simulou-se a retirada de distintos dipolos da rede. A Figura 28 ilustra a

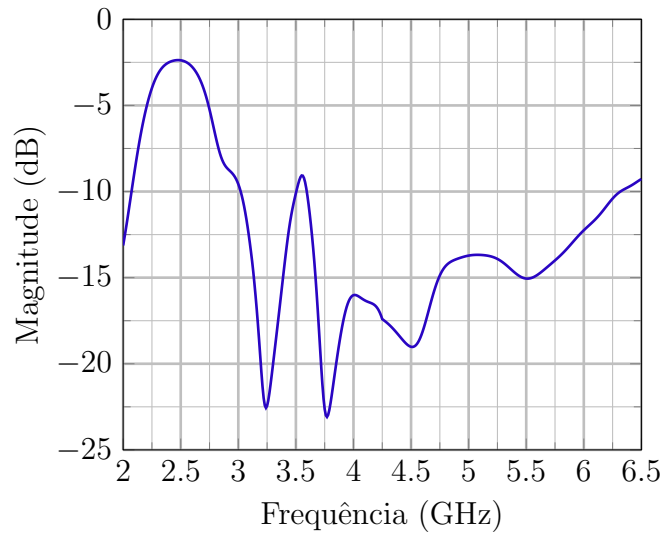


Figura 27 – Coeficiente de reflexão após a retirada do quinto dipolo da rede.

retirada do nono dipolo e as curvas obtidas estão apresentadas na Figura 29. Os dipolos foram deslocados de suas posições originais para se obter coeficiente de reflexão menor ou igual a -10 dB para as frequências específicas. A característica desejada foi obtida com a retirada do nono elemento. A curva em preto opera apenas nas frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz), obtendo coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB, e introduzindo alta rejeição fora destas faixas.

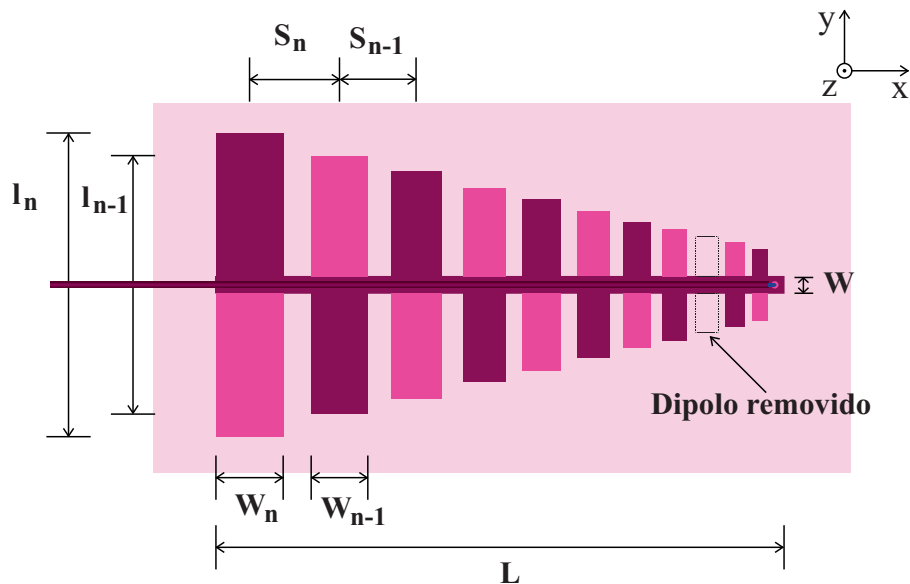


Figura 28 – Antena log-periódica sem o novo dipolo.

A Figura 30 apresenta o diagrama de irradiação para a frequência de WLAN (2,4 GHz), correspondente a 8,109 dBi e para a frequência de WiMAX (5,8 GHz), equivalente a 8,539 dBi, como mostrado na Figura 31. Para ambas as frequências, obteve-se o ganho das antenas acima de 8 dBi, com diretividade equivalente a 8,50 dBi para a frequência de

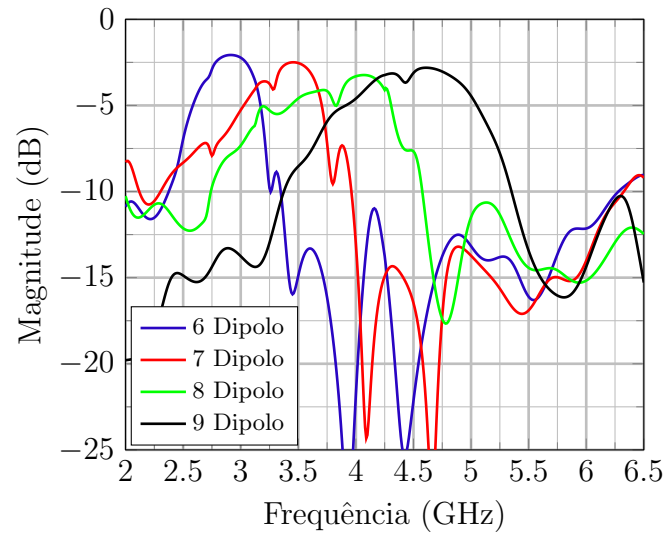


Figura 29 – Coeficiente de reflexão após a retirada de diferentes dipolos da rede.

2,4 GHz e 9,02 dBi para 5,8 GHz, sendo obtida através do *software* HFSS.

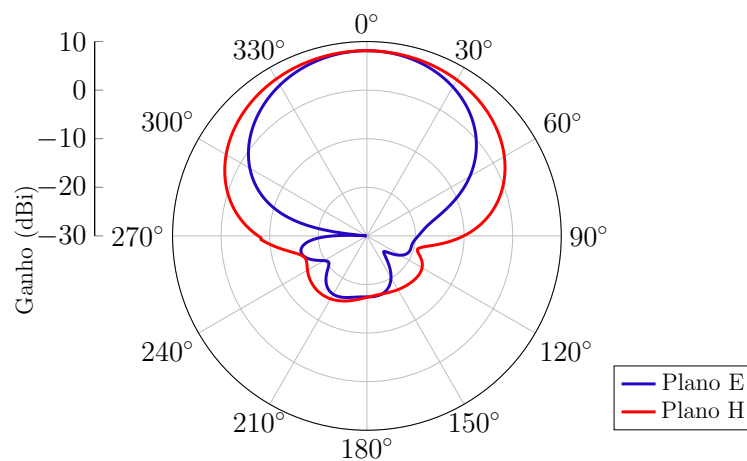


Figura 30 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 2,4 GHz.

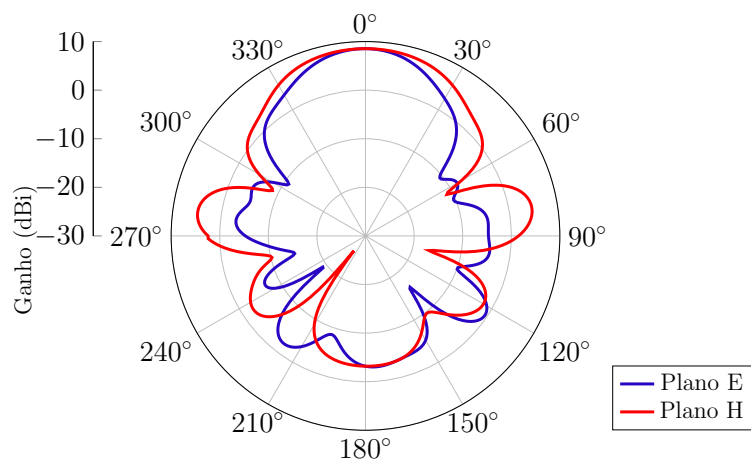


Figura 31 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 5,8 GHz.

4 Projeto de Antenas Log-Periódicas com Fractais de Koch

Os fractais permitem um maior preenchimento de espaço em antenas filamentosas ou impressas, possibilitando o projeto de antenas de maior comprimento elétrico em um espaço físico delimitado (WILDNER; VANTI, 2013) .

Os dipolos retos da antena log-periódica linear podem ser substituídos por uma geometria fractal formada por infinitas iterações, dependendo do tipo de fractal empregado. No caso deste trabalho, decidiu-se empregar a técnica de fractal de Koch nos dipolos da antena log-periódica projetada na seção anterior. Ao implementar este fractal nos dipolos da rede, obteve-se a redução do espaço físico total da antena.

4.1 Antena Log-Periódica Fractal de Primeira Iteração

Os mesmos procedimentos de cálculo dos parâmetros construtivos dos dipolos da antena log-periódica linear banda larga, são utilizados para a antena log-periódica fractal para n iterações. No entanto, os únicos parâmetros construtivos alterados da antena fractal para a linear são os comprimentos equivalentes de cada dipolo que compõe a rede, sendo estes apresentados na seção 2.3.3. A Equação (2.19) foi utilizada para o cálculo do comprimento equivalente de cada dipolo fractal, sendo que n corresponde ao número de iteração do fractal e l_n ao comprimento do dipolo linear. Para a primeira iteração ($n= 1$), obteve-se $l_{nf}= 48,912$ mm.

A seguir são listados os parâmetros construtivos e os fatores de espaçamento e escala que foram utilizados para o projeto de ambas as antenas log-periódica linear banda larga e fractal:

- Fator de escala de $\sigma= 0,157$;
- Fator de espaçamento de $\tau= 0,865$;
- Ângulo de abertura de $\alpha= 12,13^\circ$;
- Número de dipolos da rede $N= 11$;
- Comprimento total da estrutura $L= 118,516$ mm;
- Largura do dipolo inicial de $W_n= 14,236$ mm;
- Comprimento equivalente do maior dipolo $l_{nf}= 48,912$ mm;

- Espaçamento entre os dipolos iniciais de $S_n = 20,478$ mm.

A Tabela 2 contempla as dimensões totais de cada dipolo que compõe a antena. Primeiramente, são definidos os parâmetros construtivos do primeiro elemento que constitui a rede e posteriormente é utilizada a Equação (2.16) recursiva para determinar os demais parâmetros dos mesmos. A Figura 32 demonstra os parâmetros construtivos dos dipolos de primeira iteração. A largura do dipolo linear e fractal são os mesmos W_n , pois foram calculados de acordo com a impedância característica de 50Ω e comprimento físico do maior elemento $l_{máx}$, conforme a Equação (2.14) (TANL et al., 2013).

Tabela 2 – Parâmetros construtivos dos dipolos que compõem a rede fractal de primeira iteração

Dipolo n	W_n (mm)	l_{nf} (mm)	S_n (mm)
1	14,236	48,912	20,478
2	12,314	42,308	17,713
3	10,651	36,597	15,322
4	9,213	31,656	13,253
5	7,969	27,382	11,464
6	6,893	23,686	9,916
7	5,963	20,488	8,5779
8	5,158	17,722	7,419
9	4,461	15,330	6,418
10	3,859	13,260	5,551
11	3,338	11,470	4,80

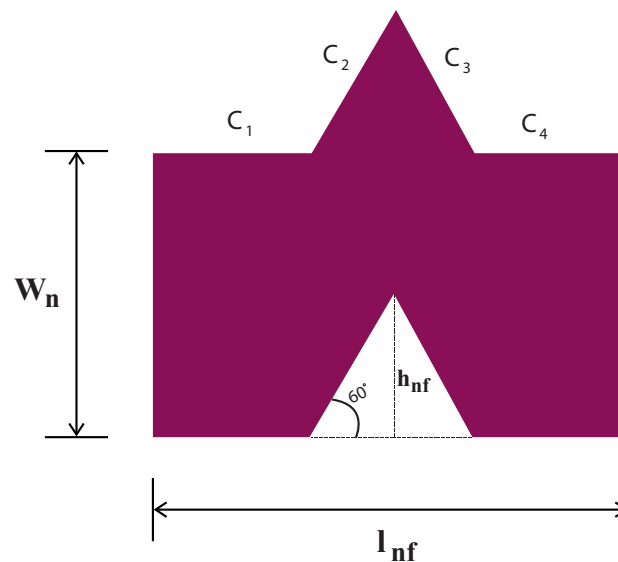


Figura 32 – Primeira iteração do dipolo de Koch.

Obteve-se comprimento total da antena de 157 mm e largura de 60 mm. A antena log-periódica fractal de primeira iteração apresentou redução de 25% para a antena log-periódica linear, sendo avaliado a área total da antena.

Após a obtenção de todos os parâmetros construtivos da antena, a mesma foi desenvolvida computacionalmente a partir do *software Ansys HFSS*. A Figura 33 apresenta a antena log-periódica fractal de primeira iteração, com todos os parâmetros construtivos definidos anteriormente.

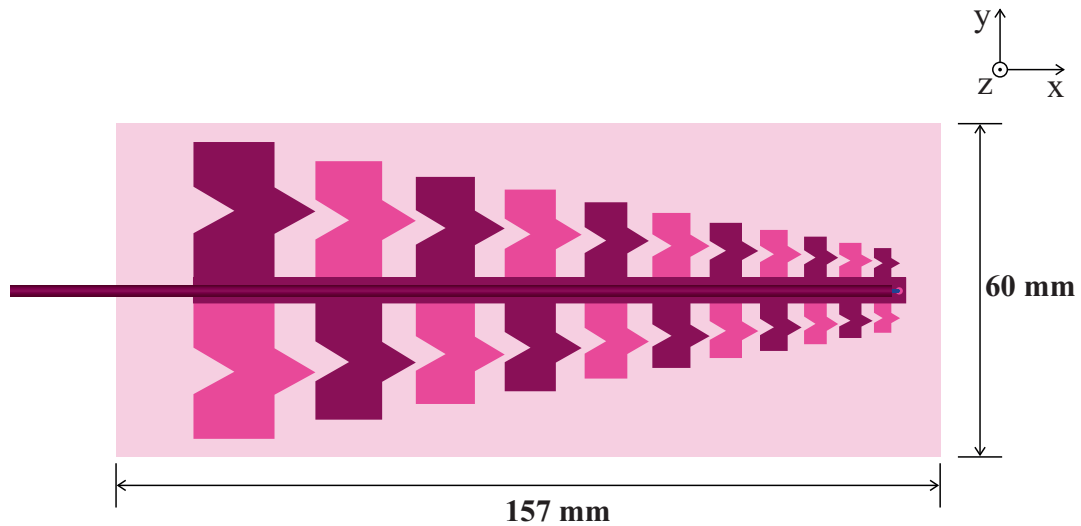


Figura 33 – Antena log-periódica fractal de primeira iteração simulada.

4.1.1 Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas

4.1.1.1 Posicionamento da Transição

Como foi realizado com a antena log-periódica linear, também foi variado o posicionamento da transição cabo coaxial à linha de fitas paralelas neste caso. A posição inicial é mostrada na Figura 34, sendo $L_c = 0,383$ mm, $L_s = 0,383$ mm e $R = 0,75$ mm.

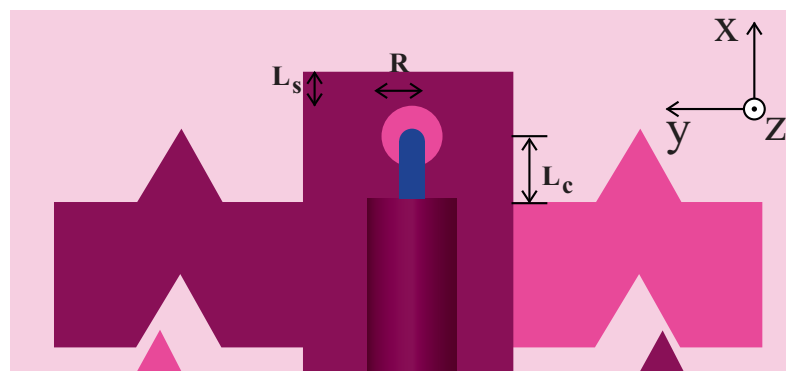


Figura 34 – Posição da transição cabo coaxial - linha de fitas paralelas da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

O coeficiente de reflexão da antena é mostrado na Figura 35. Verifica-se que parte da curva em vermelho ficou acima de -10 dB para as frequências superiores da banda de interesse. Como boa parte da curva ficou abaixo de -10 dB, optou-se em variar o

posicionamento da transição, pois este afeta diretamente no desempenho das frequências superiores da banda.

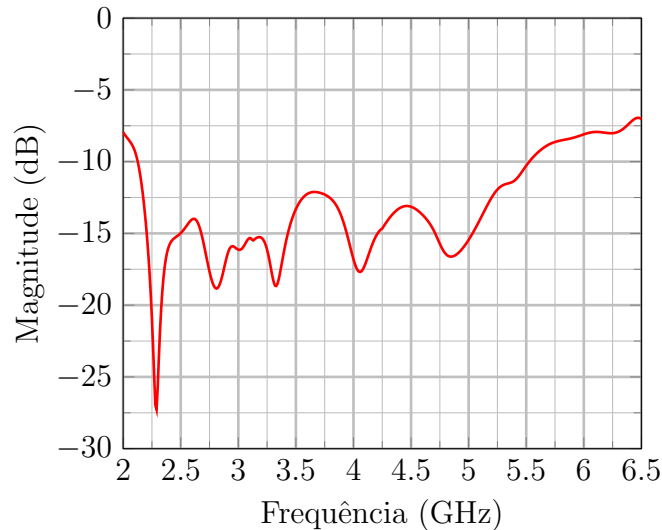


Figura 35 – Coeficiente de reflexão inicial da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

A fim de se obter coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB em toda faixa de operação da antena, variou-se o parâmetro L_c . A Figura 36 apresenta os resultados referentes aos coeficientes de reflexão obtidos. Como pode ser observado, a curva correspondente à variação da posição do cabo coaxial de $L_c = 7,383$ mm apresentou coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB em toda a faixa de frequência de 2,3 GHz a 6,0 GHz.

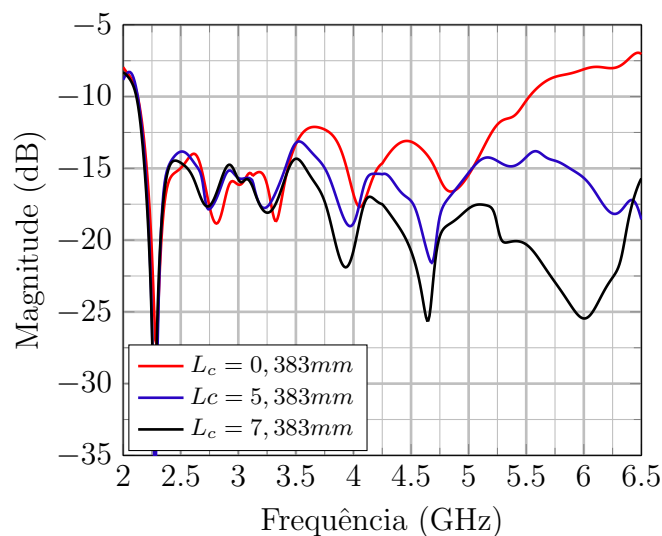


Figura 36 – Coeficiente de reflexão das posições da transição na antena log-periódica fractal de primeira iteração.

4.1.1.2 Influência do Toco em Aberto da Transição

A fim de melhorar o coeficiente de reflexão da antena, optou-se em variar o comprimento do toco L_s , apesar de a especificação já ter sido atendida em toda a faixa de interesse com a otimização de L_c , propõe-se otimizar também L_s para obter coeficientes de reflexão inferiores a -15 dB.

A Figura 37 mostra a variação do coeficiente de reflexão em função de L_s , sendo utilizado $L_c = 7,383$ mm. O toco possibilitou obter coeficiente de reflexão inferior a -15 dB em toda a faixa de interesse, sendo representada pela curva em azul para $L_s = 0,883$ mm.

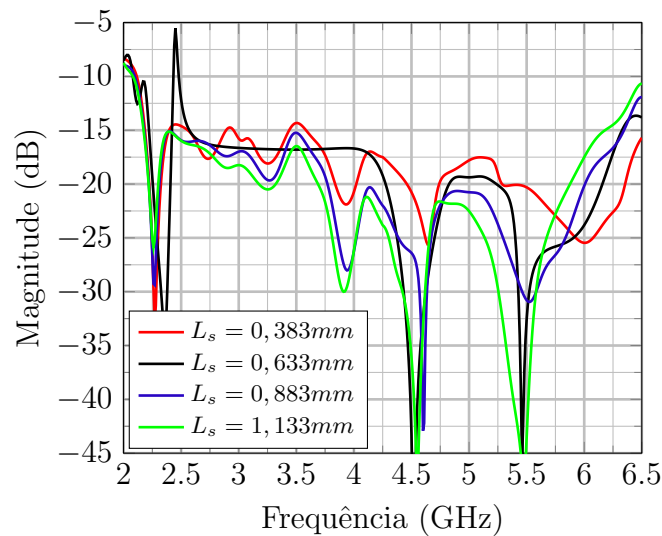


Figura 37 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

4.1.1.3 Influência do Raio de Desbaste

Ao desbastar o cobre da linha de alimentação na parte superior, representado na Figura 34, previne-se que ocorra um possível curto na antena, que afeta diretamente seu funcionamento. Assim, variou-se o raio de desbaste da linha de alimentação para se obter um melhor comportamento da antena em termos de coeficiente de reflexão.

A Figura 38 apresenta a variação do raio de desbaste do cobre. Verifica-se que, ao se aumentar o raio de desbaste, o coeficiente de reflexão da antena é afetado, ficando acima de -15 dB. Assim, definiu-se utilizar o raio de desbaste de $R = 0,75$ mm.

4.1.1.4 Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R

Definida a posição do cabo coaxial que apresenta coeficiente de reflexão abaixo de -15 dB, propõem-se realizar simulações de diversos parâmetros simultaneamente, a fim de possibilitar a melhora do coeficiente de reflexão na banda de interesse. Como simulado

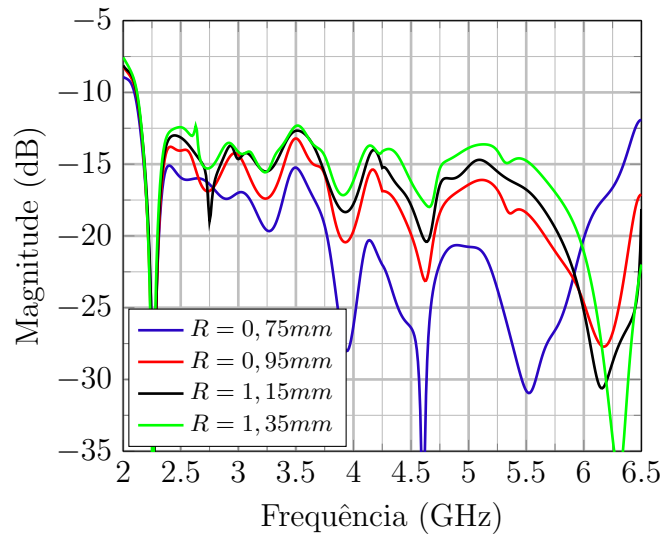


Figura 38 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

anteriormente optou-se em utilizar o raio de desbaste de $R = 0,75$ mm, pois, ao alterá-lo, o comportamento do coeficiente de reflexão da antena é afetado diretamente.

Assim, foi fixada inicialmente uma determinada posição para a transição e efetuada a variação do toco. A Figura 39 apresenta os melhores resultados obtidos referentes à variação de distintas posições da transição. Ao se variar ambos parâmetros L_c e L_s , obteve-se coeficiente de reflexão na banda de interesse acima de -15 dB. Assim, optou-se em permanecer com $L_c = 4,383$ mm e $L_s = 1,383$ mm.

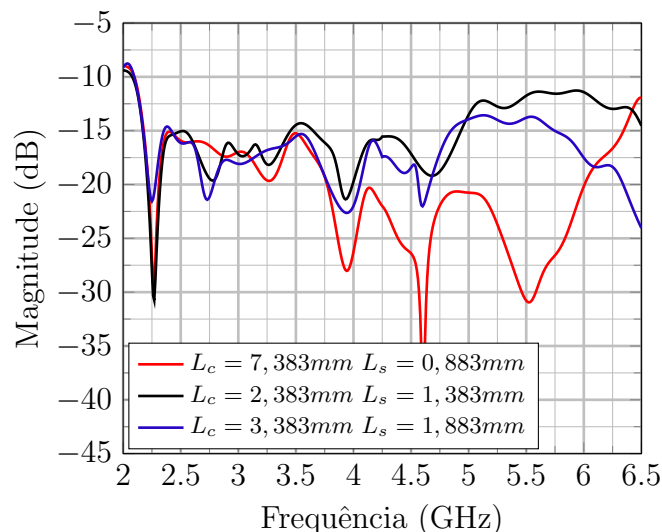


Figura 39 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

O diagrama de irradiação para a frequência WLAN (2,4 GHz) é apresentado na Figura 40 e para a frequência de WiMAX (5,8 GHz) na Figura 41. Para ambas as frequências centrais de operação da antena, adquiriu-se ganho um pouco abaixo de 8 dBi,

sendo que para a primeira obteve-se 7,165 dBi e para a segunda 7,615 dBi. A redução do ganho nas antenas fractais em relação à com dipolos lineares já era esperada, pois, ao se reduzir o comprimento efetivo dos dipolos, reduz-se, conseqüentemente, o ganho da antena. O comprimento elétrico dos dipolos lineares para os fractais é mantido o mesmo, para se ter operação igualitária as frequências de 2,3 GHz a 6,0 GHz.

A diretividade obtida para a antena log-periódica fractal é equivalente a 7,60 dBi para a frequência de 2,4 GHz e 7,977 dBi para 5,8 GHz.

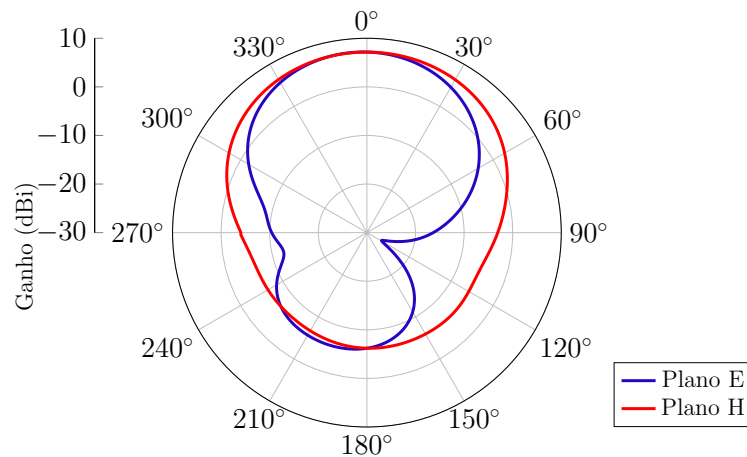


Figura 40 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica fractal de primeira iteração para a frequência de 2,4 GHz.

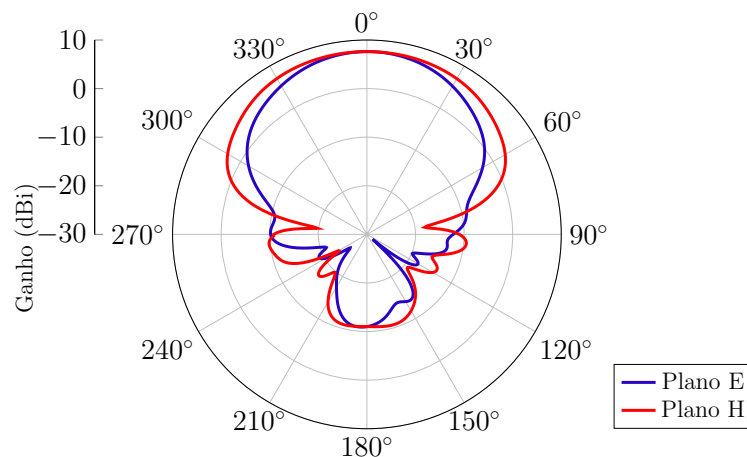


Figura 41 – Diagrama de irradiação da antena log-periódica fractal de primeira iteração para a frequência de 5,8 GHz.

4.1.1.5 Análise do Impacto de Possíveis Erros de Construção da Antena

Para o projeto da antena log-periódica fractal de primeira iteração, levaram-se em consideração os possíveis erros que possam vir a ocorrer no processo de fabricação. Assim, simulou-se a antena no *software* de simulação eletromagnética *Ansys HFSS* variando-se a posição do furo da transição cabo coaxial - linha de fitas paralelas. A alimentação

implementada no projeto é realizada por meio da perfuração do substrato; no entanto, tratando-se da implementação prática, não se consegue a reprodução original da alimentação simulada, devido a pequenos desvios mecânicos que possam ocorrer na estrutura.

Visto que a parte em que se encontra a alimentação está presente os dipolos de frequências maiores e a maior concentração de campo da antena, a alimentação neste ponto é crucial e não pode sofrer grandes alterações da antena simulada inicialmente. Pois qualquer desvio que ocorra no ponto de alimentação impacta diretamente no coeficiente de reflexão da antena. Assim, possíveis desvios no ponto de alimentação foram simulados. A Figura 42 apresenta o deslocamento horizontal do cabo para a direção esquerda e a Figura 43 o deslocamento para a direita direita. O desvio do cabo coaxial para ambas direções horizontais apresentou pouca variação no coeficiente de reflexão na faixa de operação da antena.

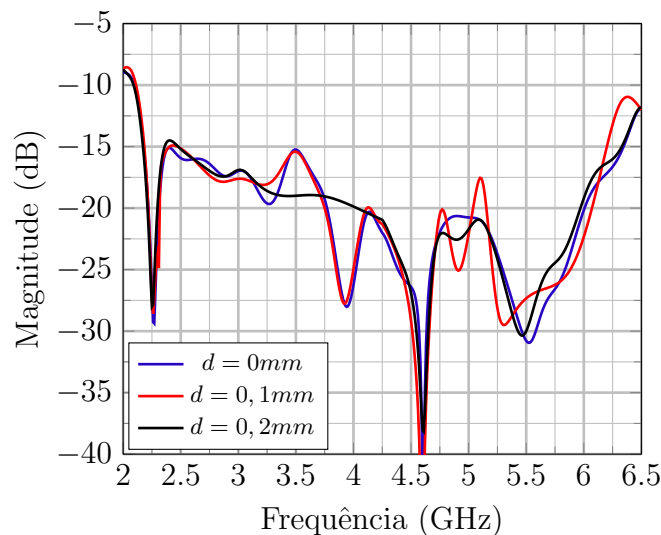


Figura 42 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a esquerda da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

Tendo em vista que possam ocorrer desvios em todas as direções, simulou-se o deslocamento na direção vertical. A Figura 45 apresenta os resultados para o deslocamento para cima e a Figura 44 para baixo. Também neste caso, obteve-se pouca alteração.

Ao efetuar as simulações dos possíveis deslocamentos que possam ocorrer no condutor central do cabo coaxial, pôde-se prever a alteração dos resultados simulados e medidos da antena. Com os resultados obtidos dos deslocamentos horizontal e vertical do ponto de alimentação, percebe-se que ambos não apresentam impacto direto nos resultados práticos da antena. Assim garante-se que a implementação prática da mesma terá comportamento semelhante ao simulado.

A posição do cabo coaxial à linha de alimentação é realizado manualmente na prática, sendo que, deve-se posicioná-lo de acordo com as simulações realizadas. Assim, foram realizadas simulações com o distanciamento do cabo coaxial ao raio de desbaste. A

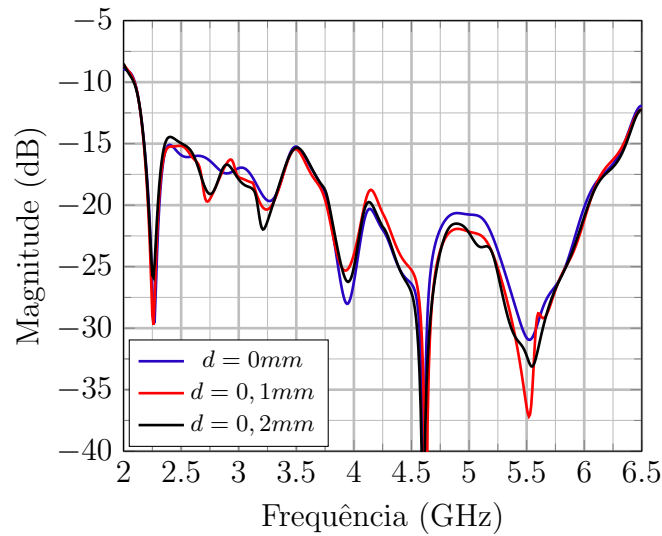


Figura 43 – Coeficiente de reflexão do deslocamento horizontal para a direita da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

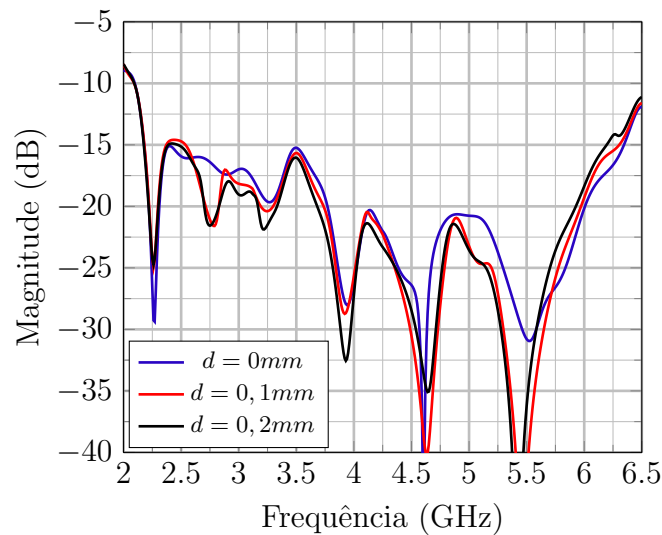


Figura 44 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical inferior da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

Figura 46 apresenta as curvas obtidas através do distanciamento de ambos, sendo que, com seu aumento o coeficiente de reflexão da antena é afetado, ficando acima de -10 dB. Dessa forma, deve-se ter cuidado com a posição do cabo coaxial à linha de alimentação da antena.

4.2 Antena Log-Periódica Fractal de Segunda Iteração

Os parâmetros construtivos da antena log-periódica fractal de segunda iteração são apresentados na Tabela 3. Definem-se primeiramente os parâmetros construtivos do primeiro dipolo, correspondente à frequência mais baixa da banda. Posteriormente, suas

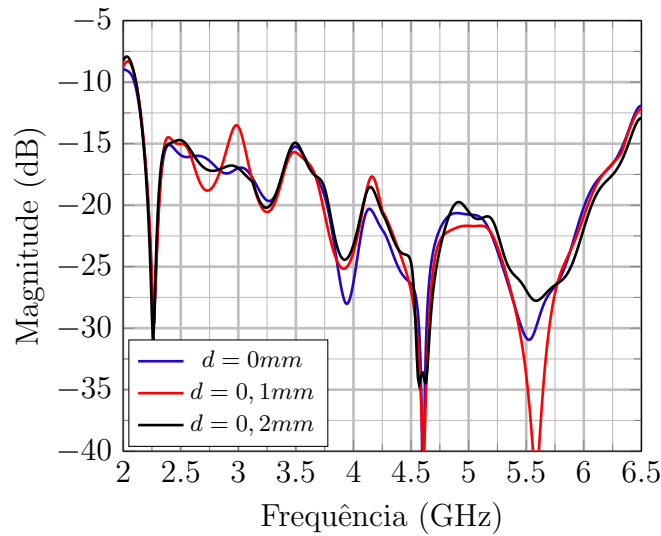


Figura 45 – Coeficiente de reflexão do deslocamento vertical superior da antena log-periódica fractal de primeira iteração.

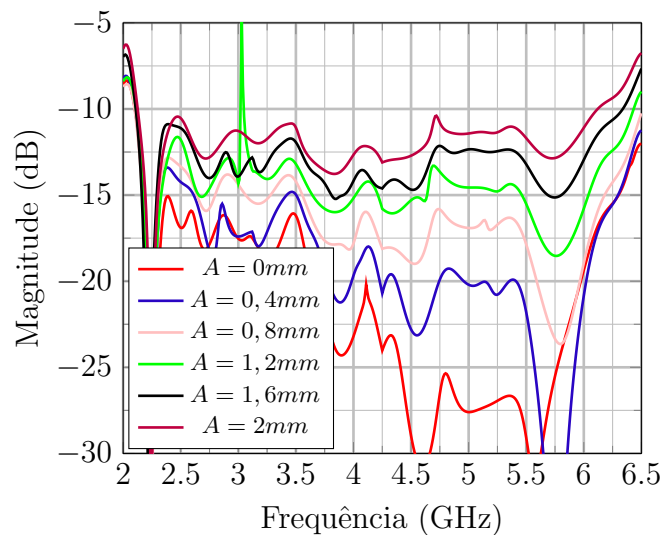


Figura 46 – Aumento da distância entre raio de desbaste e posição do cabo coaxial.

dimensões construtivas são aplicadas na Equação (2.16) recursiva, juntamente com o fator de espaçamento de $\tau = 0,865$.

Para a definição do comprimento total de cada dipolo, é utilizada a Equação (2.19) sendo que n corresponde ao número de iteração de fractal. Para a segunda iteração desta antena utilizou-se $n = 2$, obtendo-se $l_{nf} = 36,684$ mm. O dipolo de segunda iteração da antena log-periódica é demonstrado na Figura 47, sendo que a largura do dipolo W_n calculada por meio da Equação (2.14) é a mesma utilizada nos dipolos lineares e de primeira iteração (TANL et al., 2013).

Aplicando a técnica de fractais nas antenas log-periódicas lineares, obtém-se a miniaturização da mesma. No caso da fractal de segunda iteração, a antena apresenta

Tabela 3 – Parâmetros construtivos dos dipolos que compõem a rede fractal de segunda iteração

Dipolo n	$W_n(\text{mm})$	$l_{nf}(\text{mm})$	$S_n(\text{mm})$
1	14,236	36,684	20,478
2	12,314	31,732	17,713
3	10,651	27,448	15,322
4	9,213	23,742	13,253
5	7,969	20,537	11,464
6	6,893	17,764	9,916
7	5,963	15,366	8,5779
8	5,158	13,292	7,419
9	4,461	11,497	6,418
10	3,859	9,945	5,551
11	3,338	8,602	4,80

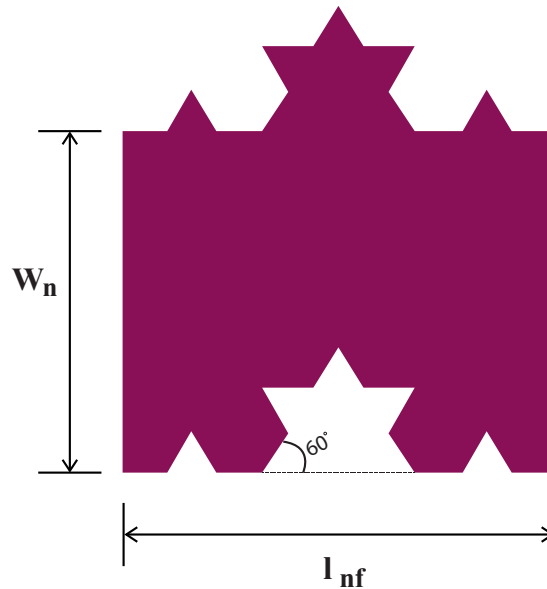


Figura 47 – Segunda iteração do dipolo de Koch.

a redução de largura de 40% em relação à antena de dipolos lineares, tendo largura equivalente a 45 mm.

A antena projetada foi modelada no *software Ansys HFSS*, sendo esta apresentada na Figura 48. Na seção seguinte, são expostos os resultados obtidos através da simulação eletromagnética da estrutura.

4.2.1 Análise da Transição Entre o Cabo Coaxial e a Linha de Fitas Paralelas

4.2.1.1 Posicionamento da Transição

A posição inicial da transição segue a convenção mostrada na Figura 49, como posição inicial os seguintes valores foram considerados $L_c = 0,383$ mm, $L_s = 0,383$ mm e

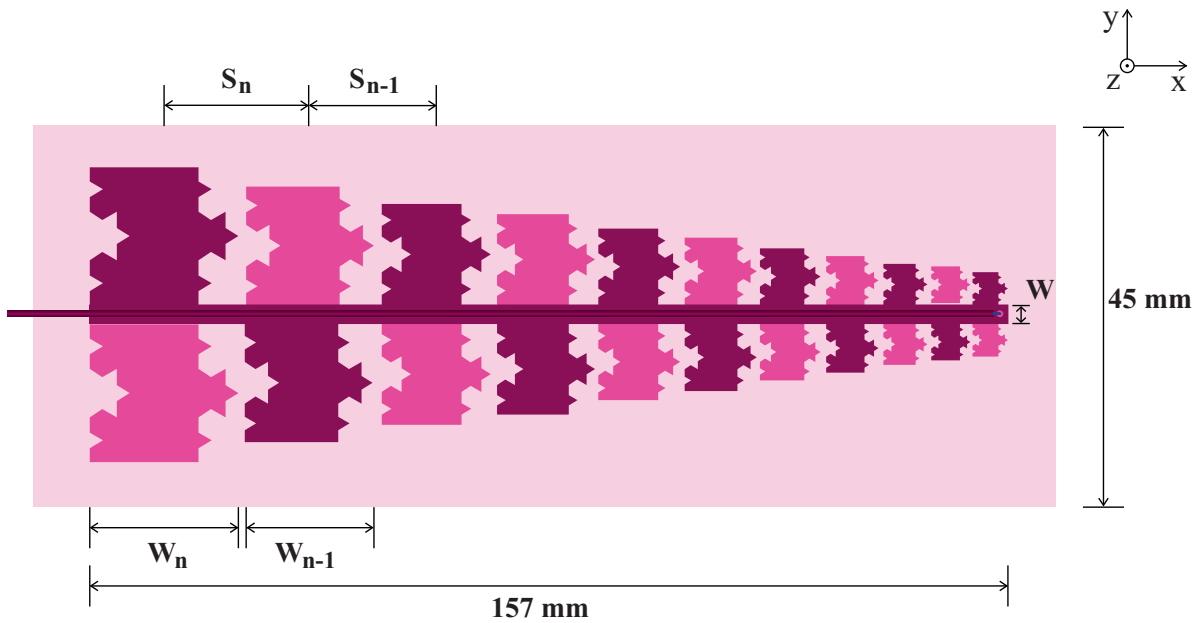


Figura 48 – Antena log-periódica fractal de segunda iteração.

$R = 0,75$ mm.

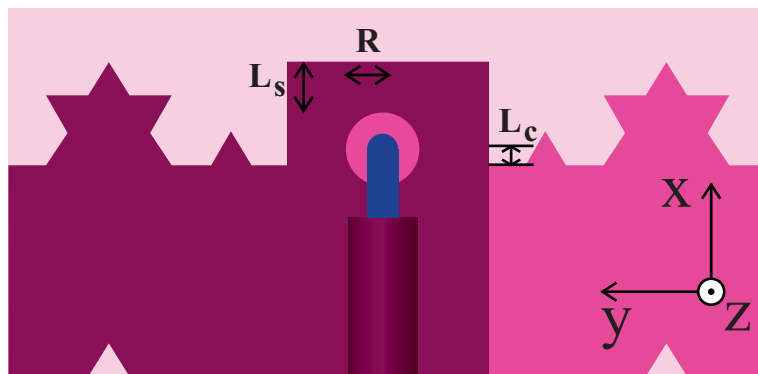


Figura 49 – Posição do cabo coaxial na antena log-periódica fractal de segunda iteração.

Os resultados para variação da posição da transição são apresentados na Figura 50, sendo que a curva com melhor comportamento é a preta ($L_c = 6,3835$ mm), apesar de o coeficiente de reflexão ter ficado acima de -10 dB.

4.2.1.2 Influência do Toco em Aberto da Transição

Após o estudo da posição da transição, optou-se em variar o comprimento do toco L_s . Iniciou-se o estudo com $L_s = 0,383$ mm. O aumento de L_s não acarretou na redução do coeficiente de reflexão da antena, como mostrado na Figura 51. Assim, optou-se em permanecer com a distância mínima estipulada de $L_s = 0,383$ mm.

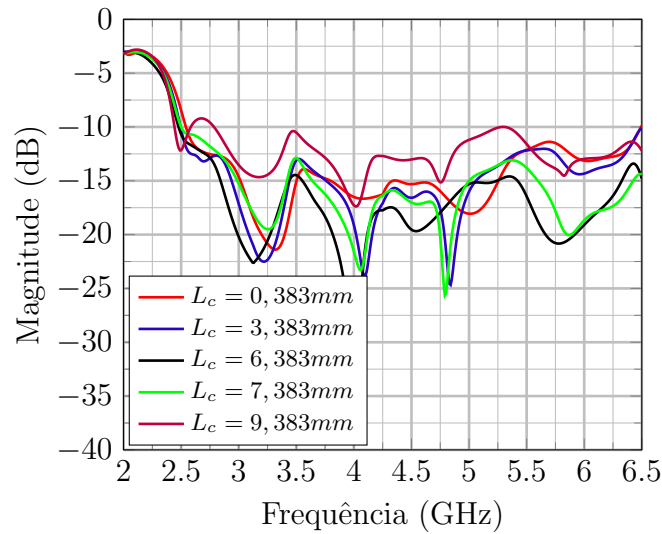


Figura 50 – Coeficiente de reflexão das posições da transição na antena log-periódica fractal de segunda iteração.

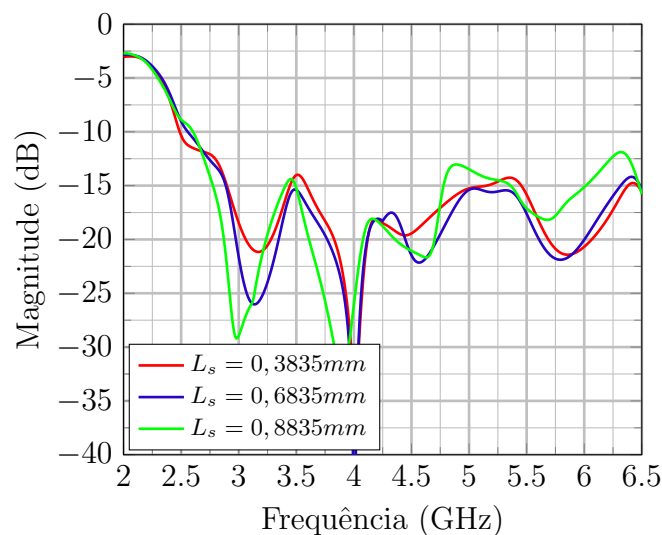


Figura 51 – Coeficiente de reflexão do comprimento do toco em aberto após o desbaste da antena log-periódica fractal de segunda iteração.

4.2.1.3 Influência do Raio de Desbaste

O raio de desbaste R também foi variado, a fim de o coeficiente de reflexão menor ou igual a -10 dB, como mostrado na Figura 52. O coeficiente de reflexão ficou acima de -10 dB na faixa de interesse; assim, optou-se em realizar simulações simultâneas de distintos parâmetros, conforme será descrito na seção 4.2.1.4.

Boa parte da faixa de frequência da antena apresentou coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB. No entanto, devem-se realizar novas simulações para reduzir o coeficiente nas baixas frequências.

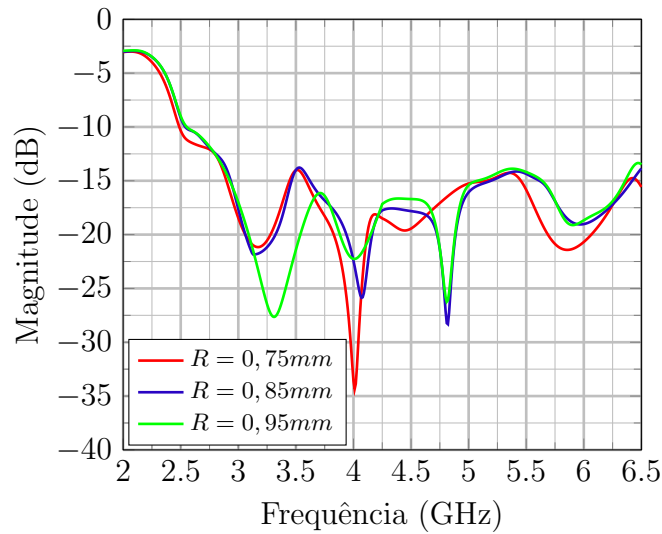


Figura 52 – Coeficiente de reflexão dos raios de desbaste da antena log-periódica fractal de segunda iteração.

4.2.1.4 Simulações Paramétricas com Combinação dos Parâmetros L_c , L_s e R

Nas seções anteriores, os parâmetros L_c , L_s e R foram variados de maneira independente. No entanto, esta estratégia não resultou em um coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB na faixa de frequência de 2,3 GHz a 6,0 GHz. Visto que estes parâmetros afetam diretamente o desempenho em frequências maiores, como apresentado nas seções anteriores, propõe-se variar diferentes parâmetros simultaneamente para atingir o coeficiente esperado nas baixas frequências.

Simulações paralelas foram realizadas e os resultados são apresentados na Figura 53. Apesar da tentativa de variar distintos parâmetros para reduzir o coeficiente de reflexão nas baixas frequências, não se obteve sucesso com este procedimento.

A única variação que pode ser feita na estrutura da antena log-periódica é a variação da posição do cabo coaxial e afins, pois os demais parâmetros construtivos da antena não podem ser alterados. Caso sejam alterados espaçamento, largura e comprimento dos dipolos da rede, modifica-se toda a sua estrutura, de forma que a característica log-periódica não ficará mantida.

O comportamento do coeficiente de reflexão acima de -10 dB para as frequências próximas de 2,3 GHz, pode estar relacionado à redução do comprimento efetivo dos dipolos da rede. Para o caso destas antenas log-periódicas, cada dipolo inicia-se na metade da largura da linha de alimentação e o mesmo é unido a esta. Ao realizar a união para o caso da antena linear, parte do comprimento físico é unido à linha de alimentação, mas o comprimento físico do dipolo não é reduzido. No caso das antenas fractais, os dipolos da rede apresentam comprimento físico igual à da linear; no entanto ao apresentar diversas curvas, parte do comprimento do dipolo é unido a linha. Em consequência, o comprimento

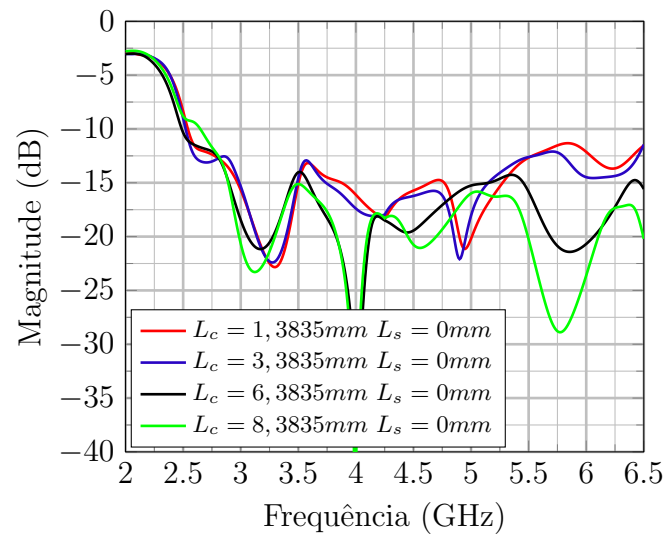


Figura 53 – Coeficiente de reflexão das combinações dos parâmetros da antena log-periódica fractal de segunda iteração.

físico deste dipolo é reduzido. Assim, ocorre um deslocamento na faixa de atuação para as antenas fractais, sendo que os dipolos iniciais começam a operar em frequências maiores.

Deste modo, propõe-se alterar a faixa de frequência inicial de projeto para a antena log-periódica fractal de segunda iteração, iniciando em frequências inferiores a 2,3 GHz, para ter operação final na faixa de 2,3 GHz a 6,0 GHz.

5 Resultados Finais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da implementação prática das antenas log-periódicas linear banda larga e dupla-faixa, e da antena log-periódica fractal de primeira iteração. Os resultados obtidos através das simulações eletromagnéticas serão comparados com resultados experimentais.

5.1 Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Linear Banda Larga

A Figura 54 apresenta a antena log-periódica construída, sendo que o cabo coaxial foi fixado na linha de alimentação da antena por meio de solda.

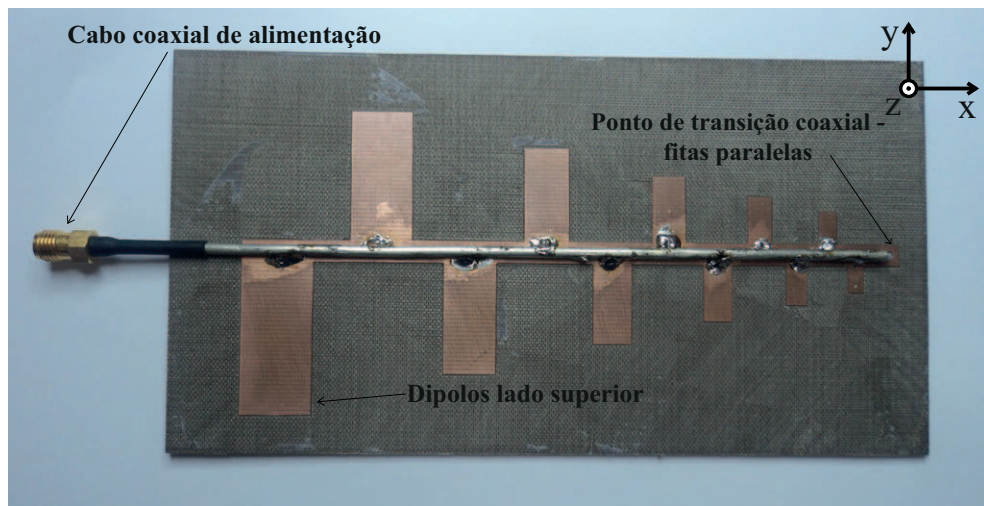


Figura 54 – Antena log-periódica linear banda larga construída.

A comparação entre os resultados simulados e medidos do coeficiente de reflexão na entrada da antena é apresentada na Figura 55. Verifica-se que o coeficiente de reflexão da antena medida apresentou variação ao longo da faixa de operação, comparado com o resultado simulado.

A mudança do comportamento do coeficiente de reflexão da antena medida para a simulada, deve-se a um problema de construção que ocorreu na implementação prática da antena. Ao executar o procedimento de fresagem do cobre com a prototipadora presente na universidade, o furo pelo qual deve passar o condutor central do cabo coaxial para a alimentação da linha de fitas paralelas, conforme mostrado na Figura 12, não foi executado de maneira automática. Assim, teve-se que efetuar o furo central manualmente, afetando o coeficiente de reflexão. Apesar deste empecilho, validou-se a antena e garantiu-se o seu

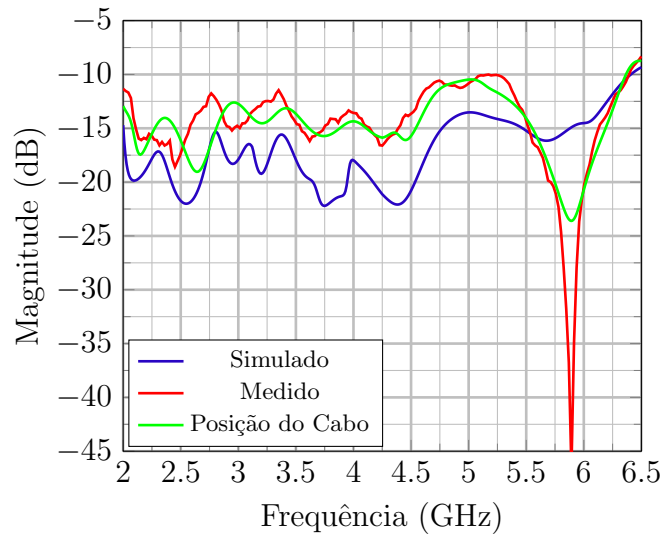


Figura 55 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica linear banda larga simulada e construída.

devido funcionamento com coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB na banda de interesse de 2,3 GHz a 6,0 GHz.

Verificou-se através do microscópio e paquímetro que a distância entre a posição do cabo coaxial e do raio de desbaste, ficou distante da posição simulada de 0,383 mm. Isso deve-se ao processo de fixação do cabo à linha de fitas paralelas, sendo este fixado através da solda e a posição estipulada manualmente com o auxílio do paquímetro. Comparando o posicionamento do cabo da antena linear na Figura 56 para a dupla-faixa na Figura 57, percebe-se o distanciamento obtido no caso da antena linear, impactando, diretamente no coeficiente de reflexão da antena. Os resultados obtidos da antena dupla-faixa são apresentados na seção seguinte.

A curva em verde apresentada na Figura 55 correspondente a simulação do aumento da distância entre a posição do cabo coaxial e raio de desbaste, comprovando a diferença dos resultados simulado para o medido. A posição simulada inicialmente deve ser igual a construída, caso seja variado a posição do cabo coaxial, o casamento de impedância da antena é comprometido. Apesar desta variação, ambos os resultados desta antena ficaram abaixo de -10 dB, como requerido no projeto inicial.

Além de comparar os coeficientes de reflexão simulado e medido, deve-se também realizar testes de campo a fim de validar a antena em termos de diagrama de irradiação. Para obter o diagrama de irradiação da antena construída, deve-se montar um sistema para tal medição, sendo composto por gerador de sinais, antena transmissora, antena receptora, posicionador e analisador de espectro, segundo (??).

Tal sistema para medição de região de campo distante foi montado na área de campo da UNIPAMPA, sendo que inicialmente transmitiu-se uma determinada potência

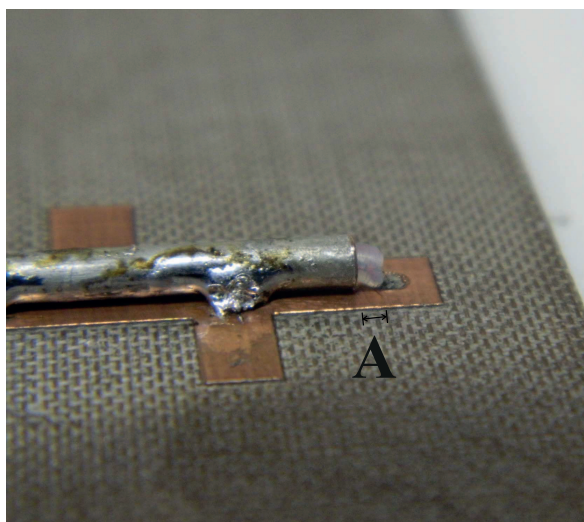


Figura 56 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica linear construída.

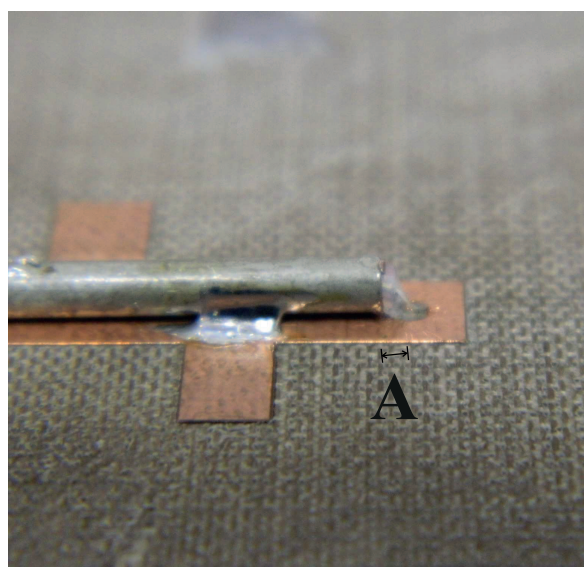


Figura 57 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica dupla-faixa construída.

através de uma antena transmissora e recebeu-se o sinal por meio da antena projetada. Ambas as antenas estavam no mesmo plano de polarização, sendo que estas apresentam polarização linear e estavam posicionadas em visada direta, como mostrado na Figura 58a.

Na Figura 58, pode-se perceber que as antenas encontram-se em visada direta, neste caso foi posicionado ambas no plano E, para realizar a medição do diagrama. A Figura 59 apresenta a medição da antena projetada no plano de polarização E e H, sendo obtido o diagrama de irradiação na prática e comparado este com o adquirido através de simulações. Ambos os diagramas foram normalizados, pois o simulado corresponde ao diagrama de ganho e o medido ao diagrama normalizado. Caso, tivesse conhecimento do ganho da antena transmissora, poderia se obter o diagrama de ganho medido da antena. Os diagramas normalizados medidos são condizente aos simulados, apresentando pouca variação em sua forma no caso do plano H, para a frequência de WLAN (2,4GHz).

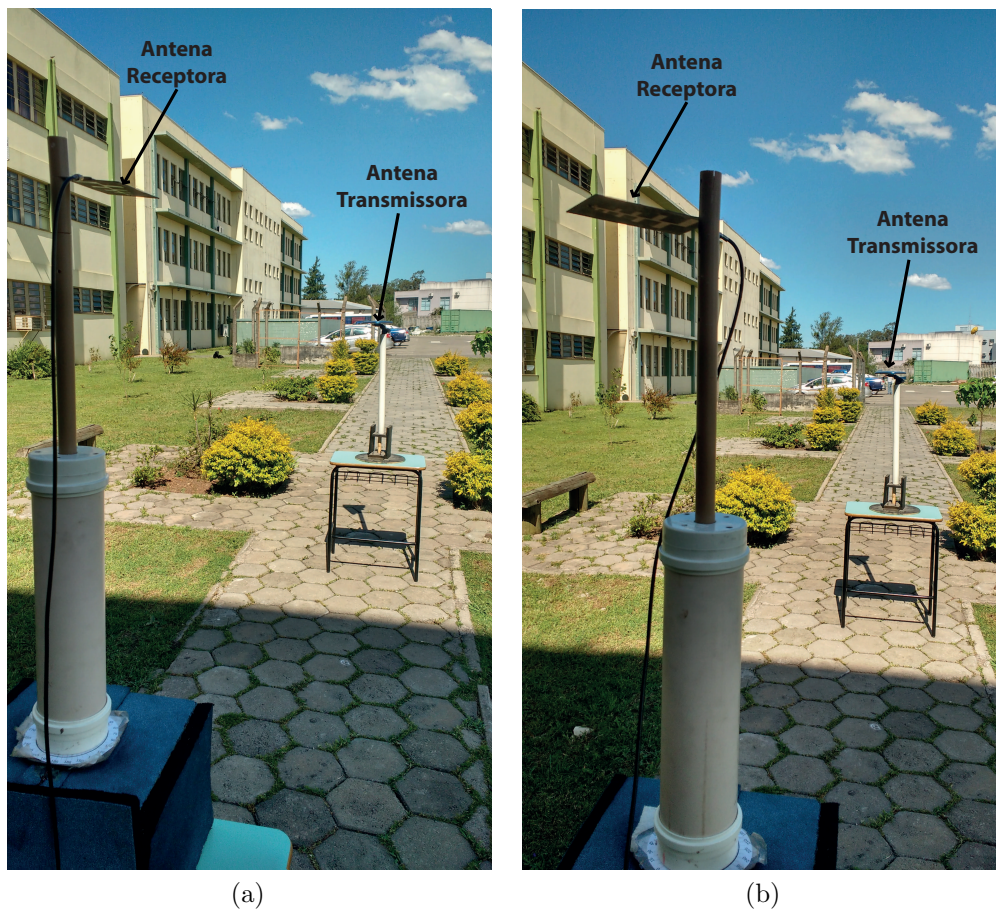


Figura 58 – Medição do plano E (a) antenas em visada direta, (b) rotação da antena receptora de 180° a 360°

O diagrama correspondente ao plano E apresentou uma variação considerável quando rotacionada a antena receptora de 180° a 360° . Isso deve-se ao posicionamento da antena conectada ao cano. Como mostrado na Figura 58b, ao rotacionar a antena em 180° a 360° , a antena transmissora encontra-se em visada direta com o cano de suporte, obstruindo o sinal a ser recebido pela antena receptora. Por isso, obteve-se a variação do diagrama medido. Apesar deste inconveniente, outro fator podem ter influenciado na medição do diagrama de campo, como desnível do solo.

A Figura 60, apresenta a medição da antena para o plano de polarização H, sendo que neste caso, percebe-se que, ao rotacionar a antena receptora, o cano de suporte não obstruí no sinal a ser recepcionado.

A fim de validar as principais frequências de operação da antena, foi medido o diagrama H normalizado para a frequência de WiMAX (5,8GHz). A Figura 61 consta os diagramas medidos para os planos E e H, sendo que obteve-se também a variação do plano E da antena.

Apesar da variação considerável medida para as frequências WLAN (2,4GHz) e WiMAX (5,8GHz) no plano de polarização E da antena, considera-se que os resultados

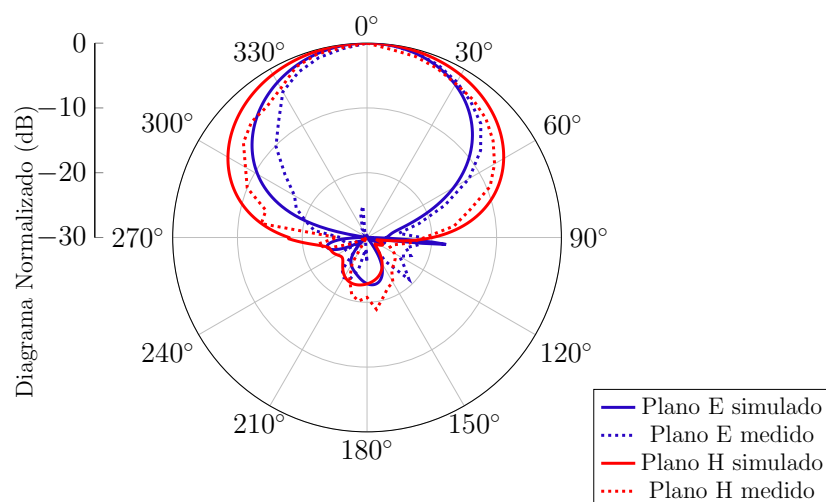


Figura 59 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear para a frequência de 2,4 GHz.



Figura 60 – Medição do plano H (a) antenas em visada direta, (b) rotação da antena receptora de 180° a 360°

obtidos são condizentes em termos de formato de diagrama de irradiação simulado e medido. As medidas de campo se não realizadas em locais adequados e ao uso devido dos equipamentos, podem representar discrepância no diagrama final da antena.

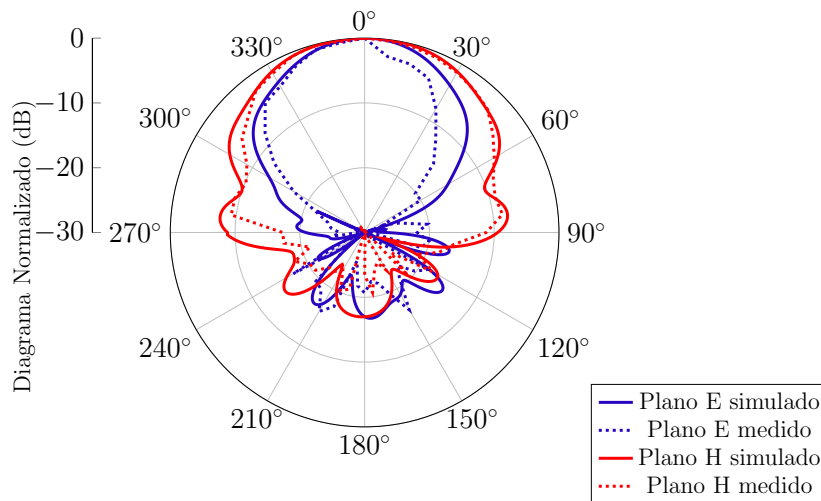


Figura 61 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear para a frequência de 5,8 GHz.

5.2 Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Linear Dupla-Faixa

A antena log-periódica linear dupla-faixa foi fabricada, sendo esta demonstrada na Figura 62. Na implementação do projeto prático, não ocorreram problemas estruturais durante o processo de construção. A posição exata do cabo coaxial à linha de fitas paralelas é apresentada na Figura 57.

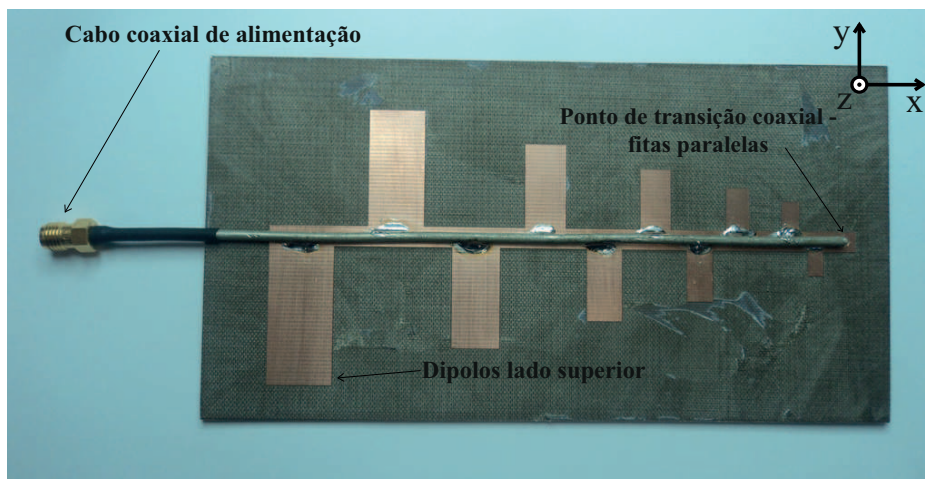


Figura 62 – Antena log-periódica linear dupla-faixa prototipada.

A Figura 63 apresenta o coeficiente de reflexão da antena simulado e medido, sendo que ambos resultados encontram-se abaixo de -10 dB. Percebe-se que não há grande variação entre as curvas, isso se deve a precisão na montagem do protótipo. Para a frequência de 2,4 GHz obteve-se largura de banda de 1,35 GHz e para a frequência de 5,8 GHz o total de 0,85 GHz.

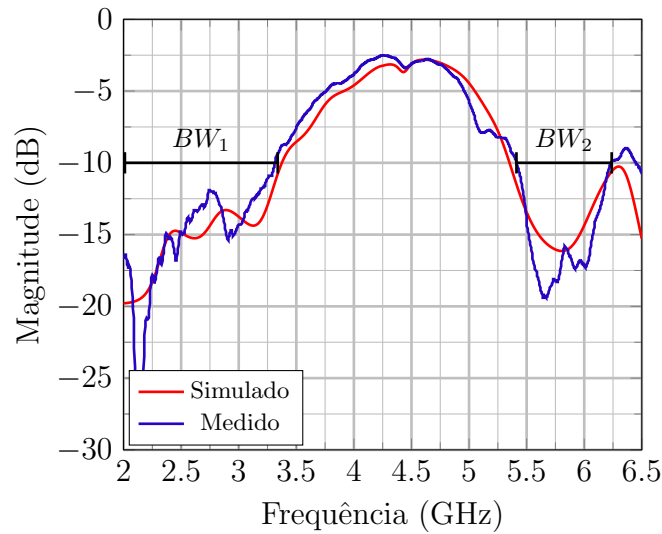


Figura 63 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica linear dupla-faixa simulada e construída.

A fim de validar a antena construída na prática, mediu-se o diagrama de irradiação da antena para as frequências principais de operação de WLAN (2,4GHz) e WiMAX (5,8GHz). O mesmo procedimento de medição de região de campo distante efetuado para a antena log-periódica linear foi executado para a medição da antena dupla-faixa.

A Figura 64 apresenta a medição da antena no plano de polarização E e H da antena, sendo que na primeira medição efetuada foi considerada a frequência de WLAN (2,4GHz). Os diagramas normalizados obtidos através de simulação e medição de campo, apresentam pequena variação em seu formato. Esta pequena variação no diagrama deve-se a imprecisões que podem ocorrer nas medições. O mesmo caso aconteceu com os diagramas apresentado na Figura 65 para a frequência de WiMAX (5,8GHz).

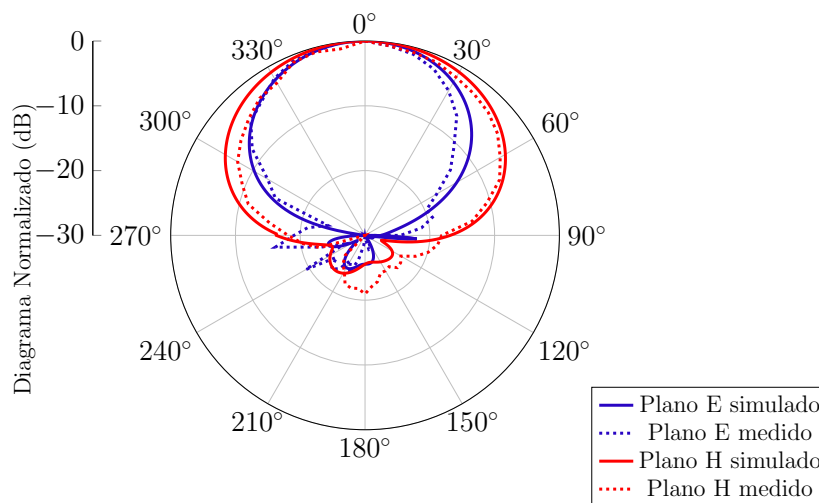


Figura 64 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 2,4 GHz.

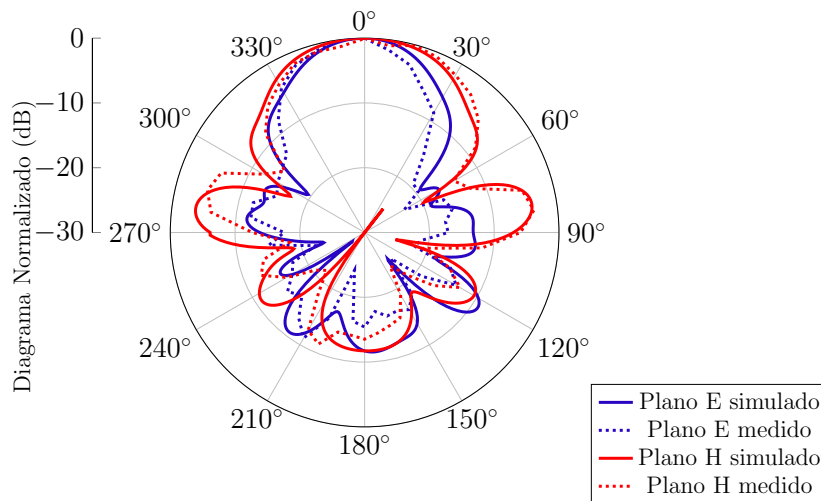


Figura 65 – Diagramas normalizados da antena log-periódica linear dupla-faixa para a frequência de 5,8 GHz.

5.3 Validação de Resultados da Antena Log-Periódica Fractal de Primeira Iteração

A antena log-periódica fractal de primeira iteração construída na prática é demonstrada na Figura 66.

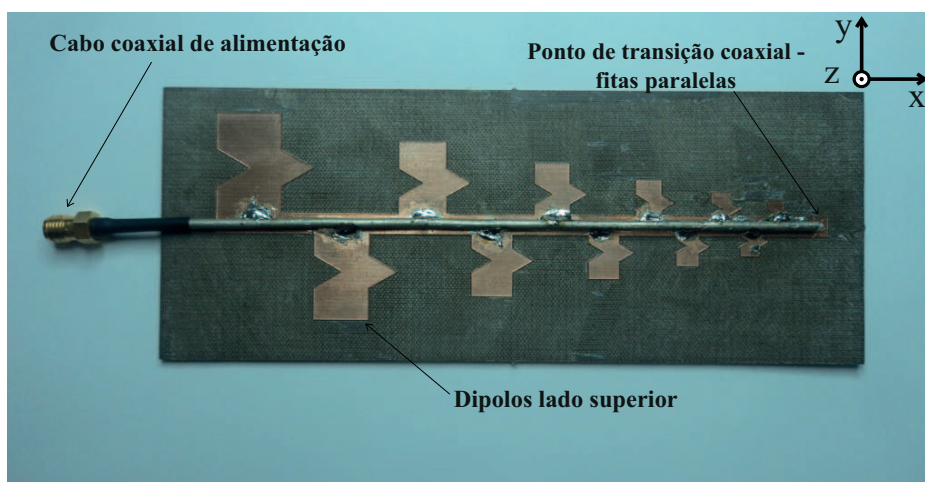


Figura 66 – Antena log-periódica fractal de primeira iteração prototipada.

A fim de validar a antena log-periódica fractal de primeira iteração projetada computacionalmente, construiu-se a antena com a prototipadora presente na universidade. A Figura 67 apresenta as curvas referentes aos coeficientes de reflexão simulado e medido, sendo que obteve-se ambos menores ou igual a -10 dB. Percebe-se que o coeficiente medido apresentou comportamento distinto em toda a faixa de frequências em relação à antena simulada. Esta variação no coeficiente de reflexão deve-se ao processo de construção. A fresa utilizada na prototipadora não conseguiu desenhar adequadamente todos os dipolos

que compõem a rede fractal, afetando diretamente nos resultados práticos da antena. A Figura 68 demonstra um dos dipolos da rede da antena log-periódica linear e a Figura 69 o dipolo da rede fractal. Nota-se que, na antena linear, a fresa desenhou adequadamente os dipolos da rede, enquanto que na antena fractal o mesmo não ocorreu. Entretanto, como se obteve coeficiente de reflexão menor ou igual a -10 dB, considerou-se que a antena construída está validada.

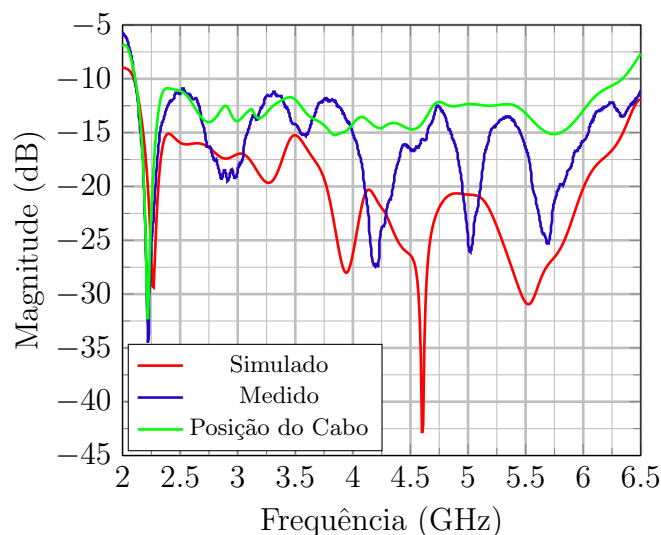


Figura 67 – Coeficiente de reflexão da antena log-periódica fractal de primeira iteração simulada e construída.

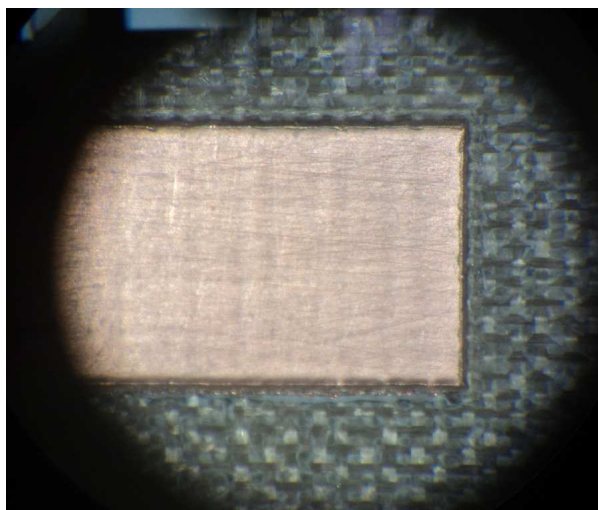


Figura 68 – Dipolo da rede linear.

A distância entre a posição do cabo coaxial e do raio de desbaste da antena, influenciou no coeficiente de reflexão medido, como mostrado da Figura 67. Através do microscópio, analisou-se a posição do cabo coaxial, constatando que o mesmo se distanciou da posição estipulada de $0,383$ mm. Percebe-se, a diferença de posicionamento do cabo na antena fractal apresentada na Figura 70 para a dupla-faixa na Figura 57.

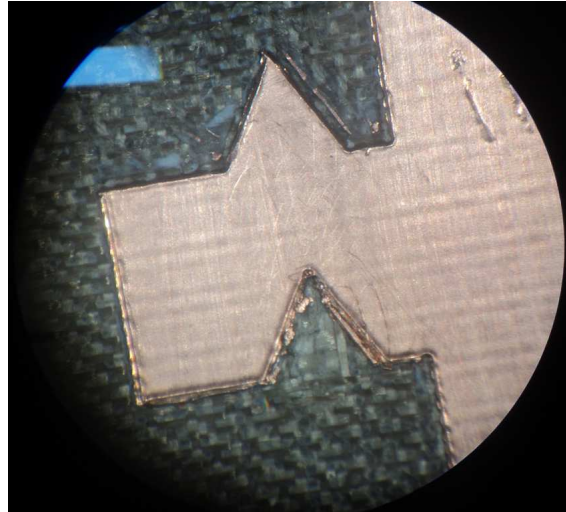


Figura 69 – Dipolo da rede fractal.

Esta variação teve impacto no coeficiente de reflexão da antena, como mostrado na curva em verde da Figura 67. No entanto, como ambos os resultados ficaram abaixo de -10 dB como requerido no projeto, os mesmos foram validados.

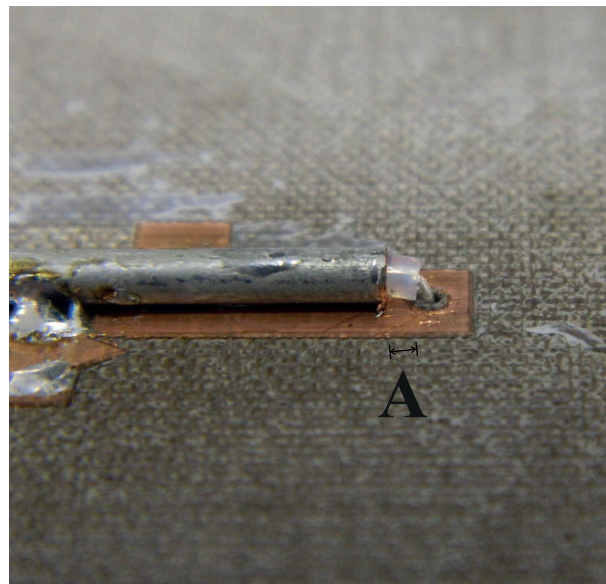


Figura 70 – Posição do cabo coaxial da antena log-periódica fractal construída.

Analisando a Figura 71 pode-se observar a diferença de tamanho obtido da antena log-periódica fractal de primeira iteração em comparação com a antena log-periódica linear banda larga. Além de reduzir o tamanho total da antena em 25%, obteve-se coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB, tornando o projeto da antena consideravelmente rentável, pois reduz a quantidade de subtrato e tamanho da mesma com o mesmo desempenho em termos de coeficiente de reflexão da antena linear. Esta redução torna-se interessante especialmente para produção em massa.

Foram realizadas medidas da região de campo distante da antena log-periódica

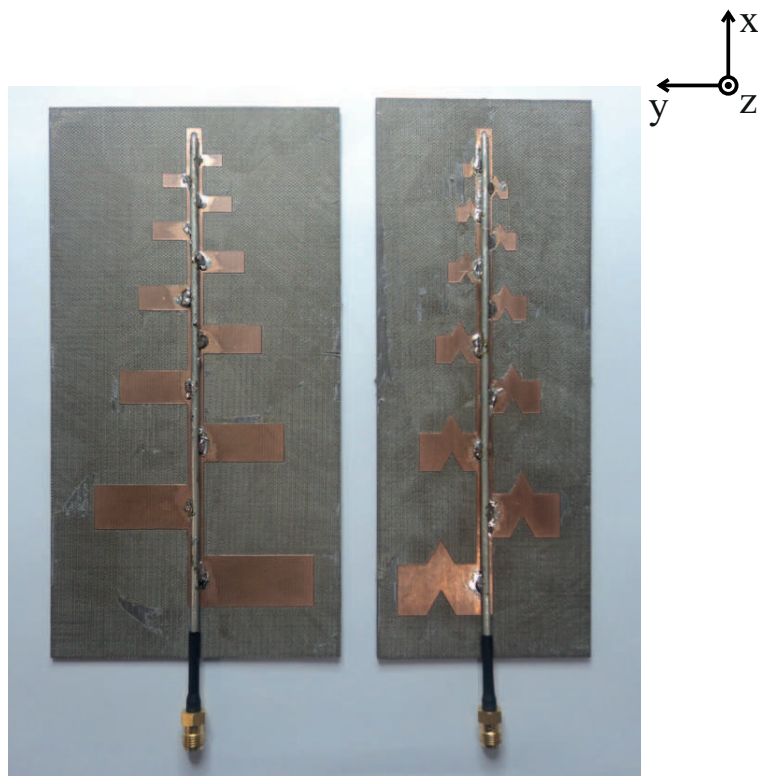


Figura 71 – Comparação das antenas log-periódicas linear banda larga e fractal de primeira iteração prototipadas.

fractal a fim de validar o diagrama de irradiação obtido nas simulações e na prática. Posicionadas as antenas transmissora e receptora em visada direta, foi medido o diagrama da antena receptora nos planos de polarização E e H para a frequência inicial de WLAN (2,4GHz). A Figura 72, apresenta os diagramas normalizados da antena, sendo que estes apresentaram pequena variação entre os diagramas medido e simulado.

Para os diagramas obtidos na frequência de WiMAX (5,8GHz), mostrados na Figura 73, ocorreu uma variação no diagrama normalizado da medição para o simulado no plano de polarização E. Esta pequena variação pode ser considerada irrisória, pois os formatos dos diagramas são similares.

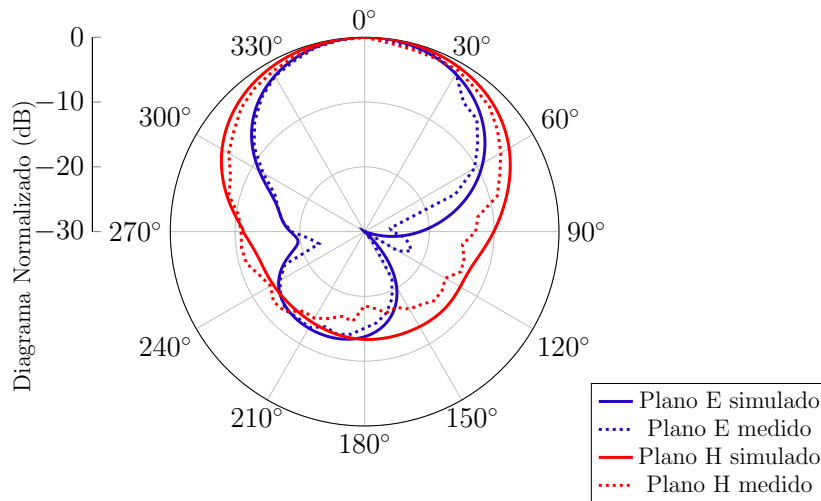


Figura 72 – Diagramas normalizados da antena log-periódica fractal para a frequência de 2,4 GHz.

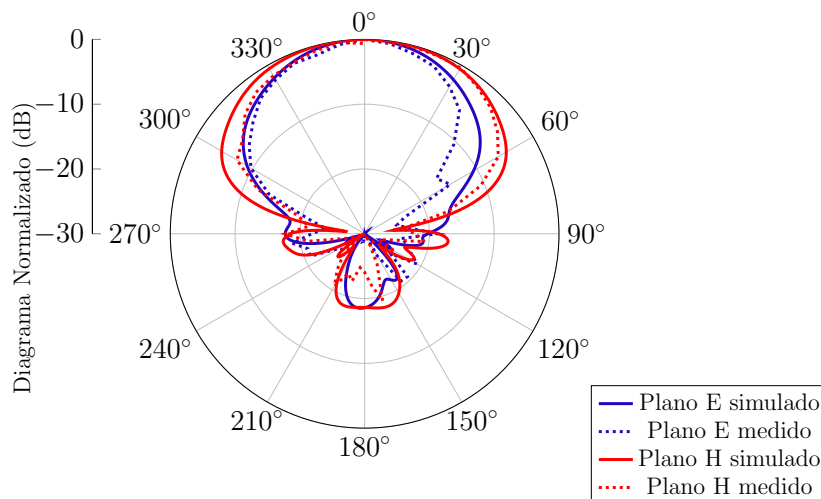


Figura 73 – Diagramas normalizados da antena log-periódica fractal para a frequência de 5,8 GHz.

6 Considerações finais

Este trabalho abordou a implementação da técnica de fractal de Koch para miniaturizar antenas log-periódicas lineares banda larga que contemplam as frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz). Além disso, uma antena log-periódica linear dupla-faixa foi estudada. Os projetos desenvolvidos neste trabalho tiveram como base os trabalhos de (WELKE, 2014) e (WILDNER, 2015).

A relevância deste trabalho está relacionada à miniaturização de antenas, sendo que, se reduzir o tamanho, reduzem-se também os custos de produção em larga escala e a estrutura torna-se mais compacta, oferecendo resultados práticos semelhantes aos da antena linear. Atualmente, a busca por equipamentos mais compactos que apresentem as mesmas funcionalidades de equipamentos convencionais se tornou um importante tema de pesquisa (MORAIS, 2012).

As antenas implementadas neste trabalho apontam distintas particularidades entre a antena linear para a fractal, podendo ser observados nos diversos estudos paramétricos apresentados neste trabalho. Ao reduzir o comprimento total de cada dipolo que compõe a rede fractal, reduz-se também, o ganho da antena. No entanto, o coeficiente de reflexão obtido encontra-se abaixo de -10 dB. No caso da antena log-periódica fractal de segunda iteração, deve-se alterar a faixa de frequência de projeto, para apresentar operação final na banda desejada. No caso de (WILDNER, 2015), as antenas log-periódicas fractais projetadas de primeira e segunda iteração apresentaram coeficiente de reflexão acima de -10 dB na faixa de projeto, não sendo propostas soluções que contornem esta limitação.

Ao implementar a técnica de fractais nas antenas log-periódicas linear banda larga, obteve-se a redução da estrutura linear de 25% para a primeira iteração e 40% para a segunda redução. Através da miniaturização das antenas, reduz-se a quantidade de material utilizada e custo de produção.

A partir dos resultados encontrados através do estudo paramétrico das possíveis posições do cabo coaxial à antena, aumento da linha após desbaste e raio de desbaste da linha de alimentação, observou-se que estes parâmetros afetam diretamente no coeficiente de reflexão das antenas log-periódicas impressas. O estudo paramétrico realizado pode ser aplicado a todas as antenas log-periódicas presentes neste trabalho.

Este trabalho também demonstrou que, ao se efetuar a retirada de um dipolo da rede log-periódica, obtém-se atuação dupla-faixa a partir da antena banda larga. Ao se retirar um determinado dipolo da rede, previne-se a recepção de frequências indesejadas. Assim, uma faixa de frequências da rede não apresenta operação. Em vista disso, foram efetuadas diversas simulações da antena log-periódica linear, sendo retirados distintos

dipolos da rede, com o propósito de obter a operação dupla-faixa. Considerando-se que se deseja separar a banda total de atuação em duas faixas que contemplem as frequências de WLAN (2,4 GHz) e WiMAX (5,8 GHz), pressupõe-se que, ao retirar o dipolo central, separa-se a banda de atuação em duas partes como em (WELKE, 2014). No entanto, esta consideração não foi verificada. Assim, estudou-se a retirada de distintos dipolos da rede, sendo que, ao se retirar o nono dipolo, obteve-se a operação dupla-faixa nas frequências de interesse, além de coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB e ganho de 8 dBi. Além disso, a distância entre o décimo e o décimo primeiro dipolo foi otimizada, sendo que o valor final foi de 2 mm.

Foram projetadas e construídas as antenas log-periódicas lineares banda larga e dupla-faixa, a fim de validação de seus resultados. Ambos os projetos apresentam coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB e ganho de 8 dBi. Ao utilizar a antena banda larga para as frequências de 2,4 GHz e 5,8 GHz, pode ocasionar a recepção de sinais indesejados.

Finalmente, este trabalho apresenta as diretrizes de projeto de antenas log-periódicas linear e fractais, sendo composta pelo estudo paramétrico do posicionamento ideal do cabo coaxial à linha de alimentação da antena. Diversos fatores tem impacto considerável nos resultados, seja a posição do cabo coaxial, aumento do toco após desbaste, raio de desbaste, escolha do substrato utilizado, técnica de miniaturização e quantidade de iterações do fractal de Koch.

Como trabalhos futuros, propõe-se aprofundar o estudo de antenas log-periódicas fractais de primeira e segunda iteração, apontando soluções para o deslocamento em frequência da antena, além de um estudo de possíveis alterações que possam ser executadas para a redução do coeficiente de reflexão da antena. Esta modificação da faixa de projeto da antena log-periódica fractal de segunda iteração não foi efetuada neste trabalho, devido ao tempo limitado de trabalho.

Através destes trabalhos futuros, a atual abordagem ficará completa, podendo ser publicada em diversos eventos e revistas científicas da área de radiofrequência, além da continuação deste trabalho na pós-graduação.

Referências

- BALANIS, C. A. *Antenna Theory - Analysis and Design*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 6 vezes nas páginas 30, 31, 33, 35, 37 e 42.
- BEHZAD, A. *Wireless Lan Radios - System Definition to Transistor Design*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 25.
- CHAULOUX, A.; COLOMBEL, F. *Low-return-Loss Printed Log-Periodic Dipolo Antenna*. Dissertação de Mestrado. Citado na página 41.
- FELBER, P. *Fractal Antennas*. 2000. Citado na página 37.
- FILHO, V. A. de A. *Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch*. Natal- RN: [s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 41.
- GANGULY, D. H. W. S. An overview of fractal antenna engineering research. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 45, p. 57, February 2003. Citado na página 37.
- JUSTINO, R. J. A. *Engenharia de antenas: fundamentos, projetos e aplicações*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 30.
- MANDELBROT, B. B. Fractal Geometry: What is it, and what does it do ?. In: *Printed Great Britain*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 436. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 35 e 37.
- MORAIS, L. B. *Antenas Impressas Compactas para Sistemas WIMAX*. Alegrete - RS: [s.n.], 2012. Citado 4 vezes nas páginas 25, 35, 37 e 83.
- OLIVEIRA, E. E. C. et al. Antenas de Microfita Utilizando a Curva de Fractal de Minkowski. In: *Anais do XI Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação*. Alagoas: [s.n.], 2010. p. 3. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 35.
- PEITGEN, H. O.; JURGEN, H.; SAUPE, D. *Chaos and Fractal*. [S.l.]: New Fronties of Science, 2003. Citado na página 36.
- PINHEIRO, H. C. D. Trabalho de Conclusão de Curso, *Caracterização de Antenas Multibanda com Geometria Fractal de Sierpinski*. 2014. Citado na página 36.
- POOLE, I. 2017. Disponível em: <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/log_p/log-periodic-array-feeder-arrangements.php>. Citado na página 41.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. Third. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 31.
- TACONIC. 2017. Disponível em: <https://www.4taconic.com/uploads/ADD%20Data%20Sheets/1450203760_tlc%20specialty%20products%20Technical%20Data%20Sheet.pdf>. Citado na página 41.
- TANL, L. et al. A small and wideband second order koch-fractal log-periodic antenna. *IEEE Xplore - Digital Library*, p. 273 – 275, November 2013. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 64.

VINOY, K. J.; ABRAHAM, J. K.; VARADAN, V. K. On the relationship between fractal dimension and the performance of multi-resonant dipole antenna using koch curves. *IEEE Trans. Antennas and Propagat*, v. 51, p. 2303, September 2003. Citado na página 37.

WELKE, F. *Antena Dupla-Faixa para Telefonia Móvel Celular*. Alegrete - RS: [s.n.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 30, 33, 34, 51, 83 e 84.

WILDNER, V. S. *Desenvolvimento de Antenas Dipolos de Koch Fractais e da Antena Log-Periódica de Koch Fractal para TV Digital: Simulações e Medições*. Blumenau - SC: [s.n.], 2015. Citado 5 vezes nas páginas 26, 33, 37, 39 e 83.

WILDNER, V. S.; VANTI, M. G. A Antena Dipolo de Koch Fractal. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Mico-Ondas e Optoeletrônica - MOMAG*. João Pessoa - PA: [s.n.], 2012. Citado na página 37.

WILDNER, V. S.; VANTI, M. G. Projeto de Antena Log-Periódica de Koch Fractal com Três Iterações de Koch para TV Digital. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Telecomunicações- SBrT*. Fortaleza - CE: [s.n.], 2013. Citado na página 55.