

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós Graduação da Engenharia Elétrica

Mayk Alves Lamim

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE FRACTAIS EM TRANSFORMADOR DE
IMPEDÂNCIA DO TIPO KLOPFENSTEIN EM MICROFITA**

Juiz de Fora

2023

Mayk Alves Lamim

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE FRACTAIS EM TRANSFORMADOR DE
IMPEDÂNCIA DO TIPO KLOPFENSTEIN EM MICROFITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Álvaro Augusto Machado de Medeiros

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lamim, Mayk.

APLICAÇÃO DA TEORIA DE FRACTAIS EM TRANSFORMADOR
DE IMPEDÂNCIA DO TIPO KLOPFENSTEIN EM MICROFITA / Mayk
Alves Lamim. – 2023.

66 f. : il.

Orientador: Álvaro Augusto Machado de Medeiros

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação da Engenharia Elétrica, 2023.

1. Transformador de Impedância. 2. Geometria Fractal. 3. Radio-frequência. I. Medeiros, Álvaro A. M., orient. II. Título.

Mayk Alves Lamim

Aplicação da Teoria de Fractais em Transformador de Impedância do Tipo Klopfenstein em Microfita

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 18 de setembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Augusto Machado de Medeiros - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Daniel Discini Silveira

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Ulysses Roberto Chaves Vitor

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Juiz de Fora, 01/09/2023.



Documento assinado eletronicamente por **URSULA DO CARMO RESENDE RESENDE, Usuário Externo**, em 18/09/2023, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alvaro Augusto Machado de Medeiros, Professor(a)**, em 18/09/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Discini Silveira, Professor(a)**, em 18/09/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ulysses Roberto Chaves Vitor, Professor(a)**, em 18/09/2023, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uff (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1447654** e o código CRC **741A9F1E**.

AGRADECIMENTOS

Apreendi com o decorrer da caminhada que estamos vivendo temporadas da nossa grande série chamada vida, hoje mais uma temporada está se encerrando, em meio a uma pandemia e todos os desafios que ela trouxe para toda sociedade, eu encarei a jornada mais complicada dessa grande série. Mas cheguei até o final, graças as orações, ajudas e aconselhamentos que recebi. Logo quero agradecer primeiramente a Deus, sem Ele nada disso seria possível. Ele me ama de uma forma tão sobrenatural que mesmo a minha própria mente dizendo que não era capaz, Ele me mostrava o contrário. Jesus sempre foi o centro de tudo e a minha dependência nele só aumentou em toda essa etapa.

Quero agradecer a minha mãe Rosiléia, que nunca deixou de acreditar em mim, nunca deixou que eu desanimasse, mesmo que todas as circunstâncias mostrassem o contrario. Sou extremamente grato a minha avó, Aparecida que sempre acreditou em mim, muitas das vezes mais que eu mesmo. Não podia deixar de agradecer ao meu pai Joaquim que sempre foi a base para isso tudo acontecer, desde 2014 no início da minha graduação até o encerramento dessa fase.

Aos meus professores e orientadores Daniel Discini e Álvaro Medeiros que foram mais que excelentes em tudo o que fizeram neste tempo de mestrado. Muito obrigado por todos os direcionamentos acadêmicos nesse período. Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPEE)-UFJF, à Capes e à Fapemig.

Gostaria de agradecer ao meu irmão Gabriel que foi um dos maiores apoiadores desse sonho, sempre me vendo como um influenciador para ele. Agradecer também aos meus avós paternos que sempre se preocuparam comigo e estiveram presente em mais uma etapa da minha vida.

Agradecer também a toda a minha família que sempre me viu como um exemplo de superação e acreditou que esse dia chegaria. A Priscila e o Paulo, por serem amigos que ouviram as incertezas e medos durante esses últimos anos. Não poderia deixar de agradecer a Nayara Maria que sempre foi mais que uma amiga, uma irmã que a UFJF me deu, me colocando cada vez mais pra cima. Mostrando que com esforço e dedicação essa etapa seria concluída.

Agradecer a minha prima Ester que em tão pouco tempo acreditou que esse momento chegaria, me apoiando e sempre incentivando. Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos Rafael e Ruth que desde o ensino médio vibravam com todo esse sonho. Aos meus amigos da UFJF que sempre me ajudaram nos momentos difíceis dentro da Pós graduação, um ajudando o outro e confiando que no final tudo daria certo.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que foram e que serão meus alunos no futuro.

O ano de 2022 me confirmou através da vida de cada aluno, seja os do fundamental 1 e 2, educação infantil ou ensino médio de que esse enorme sonho de ser educador é cada vez mais real e possível.

Obrigado a todos que fizeram parte dessa temporada que está se encerrando na minha vida, que foi a continuidade do grande sonho da minha vida a se realizar. E com toda certeza estarão me apoiando na próxima etapa que irei escolher para trilhar.

Logo ama o seu amigo e na hora da angustia nasce um irmão - provérbios 17.17, humildade faz com que você venha crescer em todas as áreas da sua vida de forma simples e linda. Obrigado!

“Some legends are told, some turn to dust or to gold. But you will remember me,
remember me for centuries.”

- Fall Out Boy

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo da aplicação da teoria de fractais para analisar dois tipos de transformadores de impedância na frequência de operação de 7 GHz. Primeiro será analisado o transformador de impedância de quarto de onda com uma, duas e três seções. Juntamente a isso, será analisado também o transformador de Klopfenstein, aplicando uma suavização entre a entrada e a saída do mesmo. Após esse estudo inicial, esta dissertação apresenta a aplicação da teoria de fractais em um transformador de impedância do tipo Klopfenstein em microfitas para a faixa de frequências de 500 MHz, visando a redução do seu tamanho. Foi utilizado o substrato FR-4 de espessura de 1,6 mm. Uma introdução teórica sobre os tipos mais comuns de transformadores é realizada. Para validar o estudo, foram simulados através da versão profissional do software CST e construídos três transformadores de impedância em microfitas de 50 Ohms para 25 Ohms: um transformador ordinário de quarto de onda de três seções, um transformador do tipo Klopfenstein, e um transformador do tipo Klopfenstein com a aplicação da teoria de fractais. Os projetos foram projetados, simulados e construídos e os resultados das medidas são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Geometria Fractal, Klopfenstein, Sierpinski, Transformador de Impedância para RF.

ABSTRACT

This dissertation presents a study of the application of fractal theory to analyze two types of impedance transformers at the operating frequency of 7 GHz. First, the quarter-wave impedance transformer with one, two and three sections will be analyzed. Along with this, the Klopfenstein transformer will also be analyzed, applying a smoothing between its input and output. This work describes the application of the fractal theory to a microstrip Klopfenstein impedance transformer for the frequency of 500 MHz and above aiming size reduction. The substrate used for simulations in CST and practical implementation was the FR-4. After an initial theoretical introduction covering impedance transformers, three impedance transformers are analyzed in details: an ordinary quarter wave transformer with three sections, a Klopfenstein transformer, and a partitioned Klopfenstein transformer with the mentioned fractal theory. Simulated and practical results are presented and discussed.

Keywords - Fractal Geometry, Impedance Transformer, Klopfenstein, Sierpinski.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transformador de casamento de quarto de onda de seção única [5].	18
Figura 2 – Disposição do transformador de impedância em microfita [6].	19
Figura 3 – Parâmetros em microfita para a construção de projetos [7].	20
Figura 4 – Exemplo do modelo de transformador de Klopenstein.	20
Figura 5 – Cinco primeiros níveis de construção do Conjunto de Cantor [13].	22
Figura 6 – Os quatro primeiros níveis da Curva de Koch triangular [13].	23
Figura 7 – As seis primeiras iterações da Curva de Hilbert [14].	23
Figura 8 – Sequência do processo iterativo de construção do Tapete de Sierpinski [12].	24
Figura 9 – Sequência do processo iterativo de construção do Triângulo de Sierpinski.	25
Figura 10 – Fluxograma dos projetos desenvolvidos.	26
Figura 11 – Configurações iniciais para o projeto do transformador de impedância.	27
Figura 12 – Projeto do transformador de impedância retangular construído no <i>CST Studio Suite</i>	28
Figura 13 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{3}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.	28
Figura 14 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	29
Figura 15 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{5}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.	30
Figura 16 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	31
Figura 17 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{7}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.	32
Figura 18 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	33
Figura 19 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções construído no <i>CST Studio Suite</i>	33
Figura 20 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	34
Figura 21 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	35
Figura 22 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	35
Figura 23 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções construído no <i>CST Studio Suite</i>	36
Figura 24 – Projeto do transformador de impedância de três seções na frequência de operação de 500 MHz construído no <i>CST Studio Suite</i>	36

Figura 25 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	37
Figura 26 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	38
Figura 27 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	39
Figura 28 – Projeto do transformador de impedância Klopfenstein construído no <i>CST Studio Suite</i>	39
Figura 29 – Projeto do transformador de impedância Klopfenstein particionado com fator de aplicação do fractal de $\frac{1}{3}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	40
Figura 30 – Ajuste dos parâmetros para a análise dos projetos no <i>CST Studio Suite</i>	41
Figura 31 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular simulado no <i>CST Studio Suite</i>	42
Figura 32 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	42
Figura 33 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	43
Figura 34 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	43
Figura 35 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no <i>CST Studio Suite</i>	44
Figura 36 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções simulado no <i>CST Studio Suite</i>	45
Figura 37 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	45
Figura 38 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	46
Figura 39 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	46
Figura 40 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no <i>CST Studio Suite</i>	47

Figura 41 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções simulado no <i>CST Studio Suite</i>	48
Figura 42 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	48
Figura 43 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	49
Figura 44 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no <i>CST Studio Suite</i>	49
Figura 45 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no <i>CST Studio Suite</i>	50
Figura 46 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância retangular de três seções construído no <i>CST Studio Suite</i>	51
Figura 47 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância Klopfenstein construído no <i>CST Studio Suite</i>	51
Figura 48 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância Klopfenstein particionado com fator de aplicação do fractal de $\frac{1}{3}$ construído no <i>CST Studio Suite</i>	52
Figura 49 – Comparação das respostas em magnitudes (dB) dos três projetos propostos em 500 MHz.	53
Figura 50 – Protótipo dos três projetos propostos.	54
Figura 51 – Parâmetro S_{21} (dB) do transformador de quarto de onda de três estágios (2 transformadores).	55
Figura 52 – Parâmetro S_{21} (dB) do transformador de Klopfenstein (2 transformadores).	55
Figura 53 – Parâmetro S_{21} do transformador de Klopfenstein particionado com aplicação de fractal (2 transformadores).	56
Figura 54 – Medida do parâmetro S_{11} do transformador de três estágios.	56
Figura 55 – Medida do parâmetro S_{11} do transformador de Klopfenstein.	57
Figura 56 – Medida do parâmetros S_{11} do transformador de Klopfenstein particionado com aplicação de fractal.	57
Figura 57 – Setup inicial para o projeto dos transformadores de impedância.	62
Figura 58 – Cotas de uma seção do transformador de impedância de Klopfenstein com fractal de fator $1/3$ aplicado.	64
Figura 59 – Cotas de uma seção do transformador de impedância de Klopfentein com fratal de fator $1/5$ aplicado.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular. . .	27
Tabela 2	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{3}$	29
Tabela 3	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{5}$	30
Tabela 4	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{7}$	32
Tabela 5	–	Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular de duas seções.	33
Tabela 6	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{3}$	34
Tabela 7	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{5}$	34
Tabela 8	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{7}$	35
Tabela 9	–	Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular de duas seções.	36
Tabela 10	–	Dimensões do transformador de impedância de quarto de onda com três seções.	37
Tabela 11	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{3}$	37
Tabela 12	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{5}$	38
Tabela 13	–	Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{7}$	39
Tabela 14	–	Dimensões do transformador de impedância de Klopfenstein.	40
Tabela 15	–	Dimensões do transformador de impedância de Klopfenstein.	40
Tabela 16	–	Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - Retangular de seção única.	44
Tabela 17	–	Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - duas seções.	47
Tabela 18	–	Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - três seções.	50
Tabela 19	–	Comparação no tamanho dos transformadores.	53
Tabela 20	–	Valores medidos para 500 MHz, 1000 MHz e 1200 MHz.	58
Tabela 21	–	Dimensões da entrada e saída dos transformadores de impedância. . . .	62
Tabela 22	–	Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein.	63
Tabela 23	–	Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado. .	63

Tabela 24 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado aplicando fator de $\frac{1}{3}$ da teoria de fractal.	64
Tabela 25 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado aplicando fator de $\frac{1}{5}$ da teoria de fractal.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RF	Rádio Frequência
PG	Progressão Geométrica
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
FR4	Flame Retardant 4
dB	Decibéis

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de Onda
n	Número de Iterações
∞	Infinito
ϵ_0	Permissividade Elétrica do vácuo
ϵ_r	Permissividade relativa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
j	Número complexo
Γ	Coefficiente de reflexão
Δ	Variação/Delta
Ω	Ohms

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo	17
1.2	Organização da dissertação	17
2	TRANSFORMADORES DE IMPEDÂNCIA PARA RF	18
2.1	Transformador de Impedâncias de Quarto de Onda	18
2.2	Transformador de Klopfenstein	20
3	GEOMETRIA FRACTAL	22
3.1	Tapete de Sierpinski	24
3.2	Triângulo de Sierpinski	25
4	CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS	26
4.1	Transformador de Impedância Retangular	27
4.2	Transformador de Impedância Retangular de Duas Seções	33
4.3	Transformador de Impedância Retangular de Três Seções	35
4.4	Transformador de Klopfenstein	39
4.5	Transformador de Klopfenstein Particionado	40
5	DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES	41
5.1	Transformador de Impedância Retangular	41
5.2	Transformador de Impedância Retangular de Duas Seções	45
5.3	Transformador de Impedância Retangular de Três Seções	48
5.4	Transformador de Klopfenstein	51
5.5	Transformador de Klopfenstein Particionado	52
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
7	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – Construção dos Transformadores	62
A.1	Transformador de Impedância de Klopfenstein	63
A.2	Transformador de Impedância Particionado	63
A.3	Aplicação de Fractal do Fator de 1/3	63
A.4	Aplicação de Fractal do Fator de 1/5	65

1 INTRODUÇÃO

No mundo contemporâneo, a busca por soluções cada vez mais rápidas e desenvolvidas, com uma tecnologia mais aplicada e avançada, tem sido o grande ápice do século XXI. Já em telecomunicações, dispositivos cada vez mais avançados tecnologicamente e com um custo benefício cada vez melhor são buscados incessantemente.

Uma das áreas em telecomunicações é a radiofrequência (RF), que é uma parte do espectro eletromagnético que se encontra entre 3 kHz e 300 GHz, envolvendo transmissão de áudio, televisão, internet entre outros. Um dos elementos básicos em radiofrequência são as linhas de transmissão planares, utilizadas em placas de circuito integrado. Uma das operações básicas que pode ser realizada por linhas de transmissão é a transformação de impedância. As técnicas de transformação ou combinação de impedância exercem um papel importante, utilizadas em filtros, amplificadores e outros. O aumento da banda de transformadores de impedância possibilita também o aumento da banda de dispositivos que usam este elemento básico de circuitos de rádio-frequência. Entretanto, o aumento da banda destes dispositivos tem relação direta com o seu tamanho físico. Técnicas de diminuição do tamanho físico do transformador são então desejadas, a fim de minimizar seu tamanho nas placas de circuito impresso.

Existem alguns tipos de transformador de impedância, mas o mais empregado é o que possui um quarto do comprimento de onda, ou seja $\frac{\lambda}{4}$. Estes transformadores são amplamente empregados em projetos que trabalham na faixa de radiofrequência. São muito utilizados em casamento de impedância em linhas de transmissão que apresentam diferentes estruturas físicas. Entretanto, existem outras possibilidades quando é necessário um aumento da banda de frequência do transformador.

Os três tipos de transformadores de impedância mais usuais são transformador de quarto de onda ordinário, formado por uma ou mais seções de linha de quarto de onda [1], o transformador de linha afilada, que possui uma variação contínua na impedância característica da linha, sendo um dos mais conhecidos a linha Chebyshev [2], e o Klopfenstein, que visa uma transformação de impedância otimizada [3].

Para este tipo de transformador, é sempre levada em consideração a largura de banda, para que este não limite a atuação de um amplificador ou outro dispositivo. Sendo assim, surgiu como motivação desta dissertação a investigação de técnicas que diminuam o comprimento físico destes transformadores ou aumentem a sua largura de banda. Caso esta técnica propicie um transformador com comprimento físico menor, podem ser utilizadas mais seções no mesmo transformador e como consequência conseguir uma banda maior de operação.

A geometria fractal se trata em uma análise de um objeto que pode ser dividido em partes iguais e essas partes se assemelham do objeto original. Com o avanço tecnológico

e de métodos modernos de fabricação, a aplicação de geometria fractal se torna mais presente em estruturas de radiofrequência e microondas. Essa geometria surgiu para tratar objetos que a geometria euclidiana não descrevia. A geometria fractal mostrou o potencial de aumento de banda em algumas estruturas de RF como em [1]. Já existem estudos de antenas que quando aplicada a geometria fractal houve um aumento significativo na banda [4]. Então uma importância do estudo da mesma aplicada a telecomunicações tem sido visto com mais frequência nos últimos anos.

1.1 Objetivo

Devido ao grande avanço nos estudos de transformadores de impedância e também na aplicação de geometria fractal em estruturas de radiofrequência, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e análise de transformadores de impedância com aplicação de geometria fractal e a viabilidade de redução do tamanho destes transformadores pelo uso desta técnica.

Inicialmente foram determinados os tipos de transformadores a serem estudados. Foram selecionados os tipos: Retangular com até 3 seções, Klopfenstein e Klopfenstein particionado. Então, foram realizadas as simulações utilizando o software CST de cada um destes transformadores. Foi então realizada uma comparação da largura de banda dos diversos transformadores a fim de se determinar a eficácia do método. Após este procedimento, procedeu-se com a construção física dos transformadores e medidas em laboratório para a validação final.

1.2 Organização da dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma:

Os Capítulos 2 e 3 formam a introdução teórica. No Capítulo 2 serão mostrados os conceitos e a teoria principal de um transformador de quarto de onda e de Klopfenstein, os dois tipos de transformadores de impedância abordados nesta dissertação. Já no Capítulo 3 serão abordados estudos relacionados a geometria fractal, sua origem e sua aplicação em projetos.

Após essa abordagem teórica, o Capítulo 4 mostra as configurações propostas para cada um dos transformadores estudados. Em seguida, no Capítulo 5 serão desenvolvidas as simulações para cada projeto no *CST Studio Suite*. O Capítulo 6 aborda detalhes das construções dos protótipos e dos resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 7 serão apresentadas as conclusões finais.

2 TRANSFORMADORES DE IMPEDÂNCIA PARA RF

Neste Capítulo, serão abordados dois tipos de transformadores amplamente utilizados em RF, o transformador de quarto de onda e o Klopfenstein.

2.1 Transformador de Impedâncias de Quarto de Onda

O transformador de quarto de onda é um circuito simples e útil para casar uma impedância de carga real com uma linha de transmissão [5].

Na Figura 1 pode-se observar o transformador de quarto de onda, que possui a impedância característica como em (2.1).

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (2.1)$$

Em (2.1), Z_1 é a impedância característica, Z_L é a impedância da carga e Z_0 é a impedância da linha de transmissão.

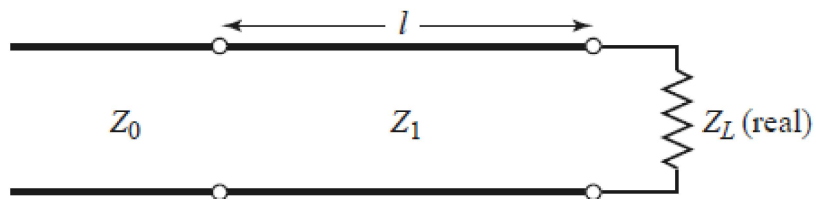


Figura 1 – Transformador de casamento de quarto de onda de seção única [5].

Para o projeto do transformador de impedância de quarto de onda, a frequência f_0 é a frequência de operação do projeto, e comprimento da linha está relacionado ao $\frac{\lambda_0}{4}$. Já em frequências diferentes o comprimento também varia, e com isso não possui uma correspondência necessária para a utilização do transformador. Para cada seção de transformação a impedância vista na entrada da mesma é dada por (2.2).

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_L + jZ_1 t}{Z_1 + jZ_L t} \quad (2.2)$$

A impedância de entrada Z_{in} também pode ser aplicada a impedâncias complexas, em que $t = \tan \beta l$, sendo $\beta l = \theta = \frac{\pi}{2}$ que está relacionado a frequência de operação do projeto. Esta transformação de impedância é dimensionada pelo quadrado da impedância característica da linha. Essa transformação ocorre também na direção inversa [6].

O transformador de impedância pode ser visto na Figura 2. Aplicado em uma placa de microfita possuindo a impedância característica do transformador de impedância de quarto de onda. É possível ver de forma clara as seções do transformador de impedância.



Figura 2 – Disposição do transformador de impedância em microfitas [6].

Quando se projeta um transformador de impedância em microfitas, surgem dois parâmetros importantes da geometria do dispositivo. O primeiro é o comprimento da seção do transformador, calculado como em (2.3).

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{1}{4f\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

Em (2.3), f é a frequência de corte do projeto, L é a indutância e C a capacitância, ambos do transformador de impedância.

O segundo parâmetro a ser observado e calculado é a largura da seção do transformador de impedância, calculado como em (2.4).

$$w = \frac{d}{Z_L} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (2.4)$$

Em (2.4), d é a largura relacionada ao comprimento de onda, μ_0 é permeabilidade magnética do vácuo, ϵ_0 é a permissividade do vácuo e ϵ_r é a permissividade relativa do meio. Ambos os parâmetros l e w são relativos a cada seção do transformador de impedância de quarto de onda.

Uma consideração importante é que a largura de banda um transformador de quarto de onda é inversamente proporcional à relação de resistência entre a fonte e a carga [1]. Assim, são desejáveis técnicas para aumentar a largura de banda deste transformador para transpor esta limitação.

Para a aplicação destes transformadores em *Microstrip* é necessário a utilização de uma fórmula para se encontrar a impedância de cada estágio, conforme a Equação (2.5) [5].

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon + 1,41}} \ln \left(\frac{5,98h}{0,8W + t} \right) \quad (2.5)$$

Em (2.5), ϵ é a permissividade elétrica do material, t é a espessura da linha de cobre, W é a largura da linha de cobre e h é a espessura do dielétrico. A Figura 3 mostra uma ilustração destes parâmetros.

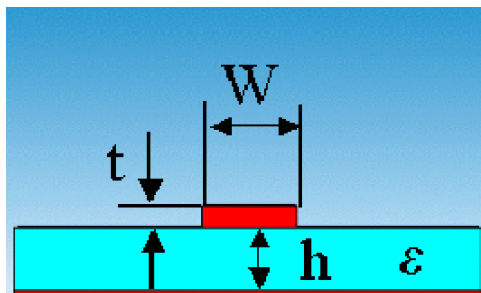


Figura 3 – Parâmetros em microfita para a construção de projetos [7].

2.2 Transformador de Klopfenstein

O transformador de Klopfenstein se baseia em um formato cônico, que em geral é de construção prática mais trabalhosa, porém funciona bem a altas frequências. O objetivo do transformador de Klopfenstein é mostrar uma construção de um transformador cônico de linha de transmissão com aspectos aprimorados. A figura 4 mostra um modelo para o formato do transformador de Klopfenstein que será trabalhado neste trabalho, tendo uma impedância de entrada maior que a impedância de saída, sendo interligadas por uma estrutura cônica desenvolvida por Klopfenstein.

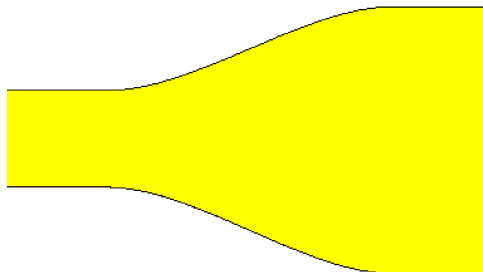


Figura 4 – Exemplo do modelo de transformador de Klopfenstein.

Segundo [8], a teoria dos projetos de arranjos ideais de transformadores em cascata pode ser transformada no projeto de cones contínuos de linha de transmissão. Logo, um transformador de impedância possuindo vários estágios se aproxima de uma estrutura cônica ligando a impedância de entrada e a impedância de saída da linha de transmissão.

Esse procedimento já foi utilizado a fim de melhorar a largura de banda operacional e alcançar um projeto compacto de uma antena combinada, utilizando o método de conicidade de Klopfenstein [4]. O cone de impedância de Klopfenstein provou ser ideal no sentido de que se encontra uma reflexão mínima sobre a largura de banda [9]. De acordo com Klopfenstein, há uma mudança descontínua da impedância característica em cada extremidade, bem como uma mudança contínua ao longo do comprimento do cone [8]. O transformador de impedância de Klopfenstein pode ser pensado como um caso limitante

do transformador de impedância Chebyshev [10], em que o comprimento da seção cônica pode ser calculada conforme (2.6).

$$L = 300 \frac{A}{2\pi f_0} \quad (2.6)$$

$$A = \cosh^{-1} \left(\frac{\Gamma_0}{\Gamma_m} \right) \quad (2.7)$$

Em (2.6), L é o comprimento da seção do transformador de Klopfenstein em milímetros e f_0 é a frequência de operação do projeto, já em (2.7), Γ_0 é o coeficiente de reflexão característico e Γ_m é o coeficiente de reflexão máximo, tem-se também que A é uma constante para o cálculo do comprimento.

Sendo assim, Klopfenstein afirmou que ao se reduzir a frequência pela metade o comprimento irá dobrar de tamanho. Em contrapartida uma suavidade baixa da conicidade se assemelha a um transformador de quarto de onda.

3 GEOMETRIA FRACTAL

A geometria fractal, vem se estruturando no decorrer dos anos, cada vez mais resolvendo os problemas que a geometria euclidiana muitas das vezes não consegue resolver. Benoît Mandelbrot em 1975 utilizou pela primeira vez o termo fractal, trazendo o sentido de alguma coisa diminuta, algo que fosse fragmentado.

No decorrer dos anos muitos matemáticos se dedicaram ao estudo de comportamentos naturais, trabalhando e criando formulações matemáticas para tornar a natureza simples e compreensível. A geometria fractal não foi diferente, vários matemáticos se dedicaram a estudar estruturas e objetos que muitas vezes não conseguiam ser estudados apenas pelas ferramentas matemáticas da época.

Os fractais são formas geométricas abstratas de uma grande beleza, com padrões complexos que se repetem indefinidamente, mesmo quando limitados a uma área finita [11]. Eles podem ser obtidos geometricamente ou aleatoriamente, através de processos recursivos apresentando determinadas características que por várias vezes são encontradas em formas da natureza [12].

Existem duas formas principais de se analisar e estudar a geometria fractal, a primeira é através da retirada, ou seja, remover partes da Figura inicial. Alguns exemplos famosos dessa forma de análise são:

- *Conjunto de Cantor* - também conhecido como *Poeira de Cantor* é um subconjunto infinito de pontos no intervalo unitário $[0,1]$. A sua construção numérica permite-nos obter a ideia de um subconjunto fechado de números reais [12]. Desenvolvido pelo matemático russo Geog Cantor (1945-1918).



Figura 5 – Cinco primeiros níveis de construção do Conjunto de Cantor [13].

- *Triângulo de Sierpinski* - desenvolvido pelo matemático polaco Waclaw Sierpinski (1882-1969) será estudado com mais detalhe neste trabalho.

Já a segunda forma de analisar a geometria fractal é através de processos que mudam a geometria da Figura inicial, ou seja, através de cada análise a Figura é alterada. Alguns exemplos famosos dessa forma de análise são:

- *A Curva de Koch* - foi estudado pelo matemático sueco Helge von Koch (1870-1924) o processo de construção do "Floco de neve de Koch", que parte da premissa da mudança dos lados de um triângulo equilátero, ou seja, a cada iteração do processo, cada lado do triângulo equilátero era substituído por um triângulo também equilátero em cima do ponto médio, porém 3 vezes menor. e assim o processo se repetia.

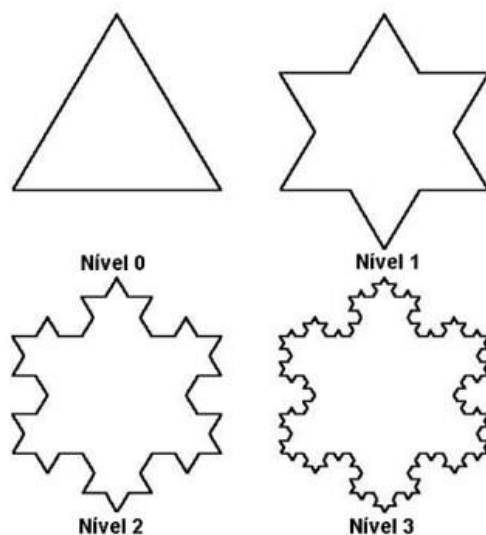


Figura 6 – Os quatro primeiros níveis da Curva de Koch triangular [13].

- *Curva de Hilbert* - Através de um quadrado era realizado um processo recursivo, onde esse quadrado era dividido em quatro partes iguais e seus centros eram interligados por segmentos de retas, repetindo esse processo a cada iteração. Foi desenvolvido pelo matemático alemão David Hilbert (1862-1943).

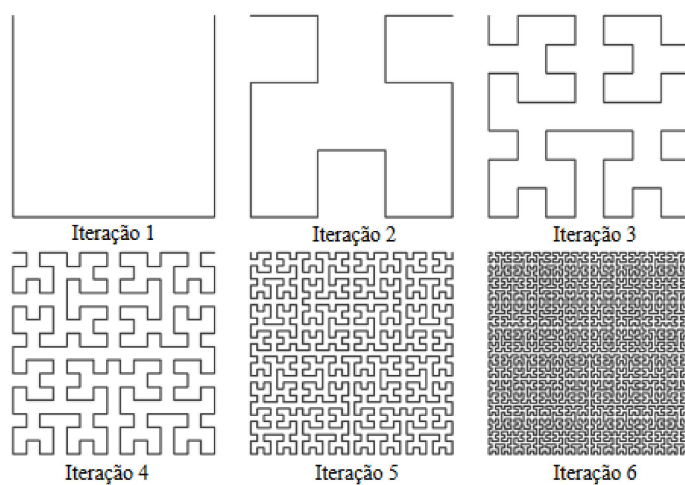


Figura 7 – As seis primeiras iterações da Curva de Hilbert [14].

Nesta Dissertação será aplicado no transformador de impedância os estudos de geometria fractal criados e estudados por Sierpinski, tanto o *Tapete de Sierpinski* quanto o

Triângulo de Sierpinski. Por isso, as Seções 3.1 e 3.2 trará uma visão mais a fundo desses estudos

3.1 Tapete de Sierpinski

O *Tapete de Sierpinski* se trata de um quadrado plano em que é aplicada a teoria de fractais citada acima, ou seja, são retiradas partes da Figura original.

Neste estudo de geometria fractal é usado o conceito matemático de auto-semelhança, que se trata da não alteração visual da Figura geométrica inicial, mesmo que aconteça uma ampliação ou redução do tamanho da Figura geométrica, neste caso do quadrado. Para o *Tapete de Sierpinski* é utilizado a auto-semelhança na divisão do quadrado em nove partes iguais e exatas, sendo assim um elemento importante do processo de criação do mesmo. Um fractal possui um número infinito de pequeninas cópias dele próprio, e esta propriedade se chama auto-semelhança [11].

Para se construir o *Tapete de Sierpinski* deve-se dividir o quadrado em nove quadrado iguais. Ao se retirar o quadrado central, será criada a Figura geradora. A cada iteração será reproduzido o mesmo processo para cada quadrado que não foi retirado. A construção da Figura geradora e duas iterações subsequentes é mostrada na Figura 8.

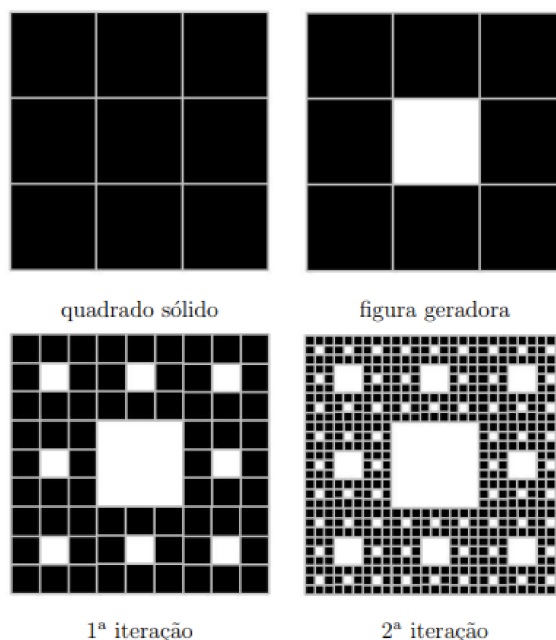


Figura 8 – Sequência do processo iterativo de construção do Tapete de Sierpinski [12].

Pode-se observar que a iteração atual está sendo feita aplicando um fator de $\frac{1}{3}$ da iteração anterior, ou seja, dividindo o quadrado anterior em nove quadrados. E como se sabe a iteração nada mais é que a repetição de um processo n vezes. Neste trabalho será

realizado a análise para fatores de $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$ para a aplicação dos fractais nos transformadores de impedância.

3.2 Triângulo de Sierpinski

Assim como no *Tapete de Sierpinski* o *Triângulo de Sierpinski* também é uma Figura geométrica obtida através de um processo recursivo, ou seja, é uma Figura geométrica que é obtida através da iteração de uma aplicação.

O *Triângulo de Sierpinski*, apresentado por Waclaw Sierpinski, é obtido removendo iteradamente triângulos equiláteros de um triângulo equilátero inicial de comprimento lateral unitário [11].

Esse estudo também possui a característica da auto-semelhança, ou seja, a cada interação são criados triângulos menores que não possuem alteração visual. E sua construção também é repetir o processo n vezes a partir de uma Figura geradora. Na Figura 9 pode-se observar o *Triângulo de Sierpinski* e algumas de suas iterações.



Figura 9 – Sequência do processo iterativo de construção do Triângulo de Sierpinski.

Visualizando o *Triângulo de Sierpinski* em três dimensões chega-se a *Pirâmide de Sierpinski* que deu origem ao jogo do Caos. Tanto no *Tapete de Sierpinski* como no *Triângulo de Sierpinski*, de acordo com que as interações tendem a um número muito grande, ou seja, $n \rightarrow \infty$ a área do triângulo se aproxima de zero, devido as várias remoções que são feitas em todo o processo.

Este exemplo tem propriedades semelhantes às mencionadas em relação ao conjunto de Cantor e a curva de Von Koch.

A partir do capítulo 4 será aplicado o conceito de ambas as estruturas de geometria fractal para a busca redução da dimensão de um transformador de impedância, aplicando os conceitos de *Tapete de Sierpinski* e *Triângulo de Sierpinski*.

4 CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS

A partir do que foi apresentado na abordagem teórica, o fluxograma da Figura 10 mostra os transformadores que foram criados e analisados neste trabalho.

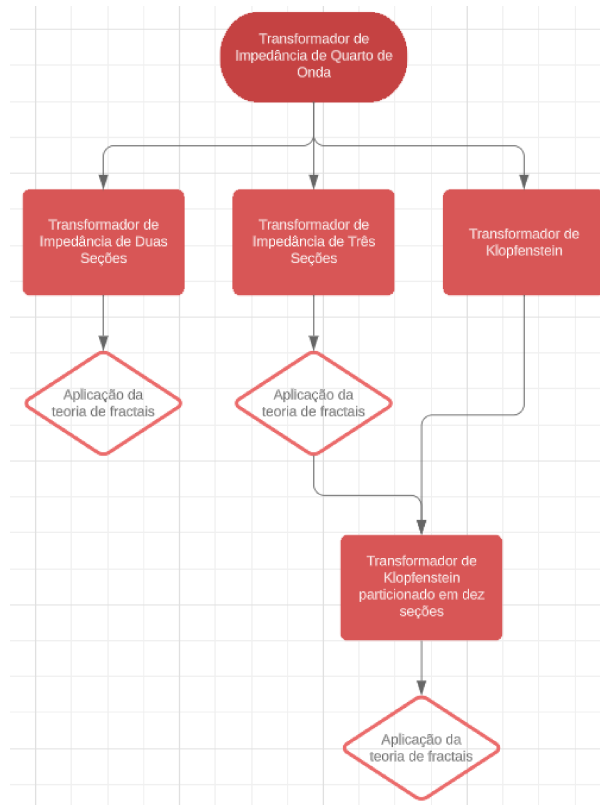


Figura 10 – Fluxograma dos projetos desenvolvidos.

De acordo com o fluxograma da Figura 10, inicialmente foi abordado o transformador de impedância de quarto de onda com uma única seção, e em seguida o transformador de Klopfenstein, juntamente com os transformadores de quarto de onda com duas e três seções. Nos transformadores de duas e três seções foi analisado o uso da teoria de fractais com o objetivo de redução do tamanho dos transformadores.

Por fim, pode-se perceber que a partir do transformador de Klopfenstein e do transformador de três seções, poderia-se construir um transformador particionado de dez seções.

O *CST Studio Suite* foi o software utilizado no desenvolvimento e análises desta dissertação. A construção do projeto no *CST Studio Suite* utilizou as configurações iniciais de projeto mostradas na Figura 11.

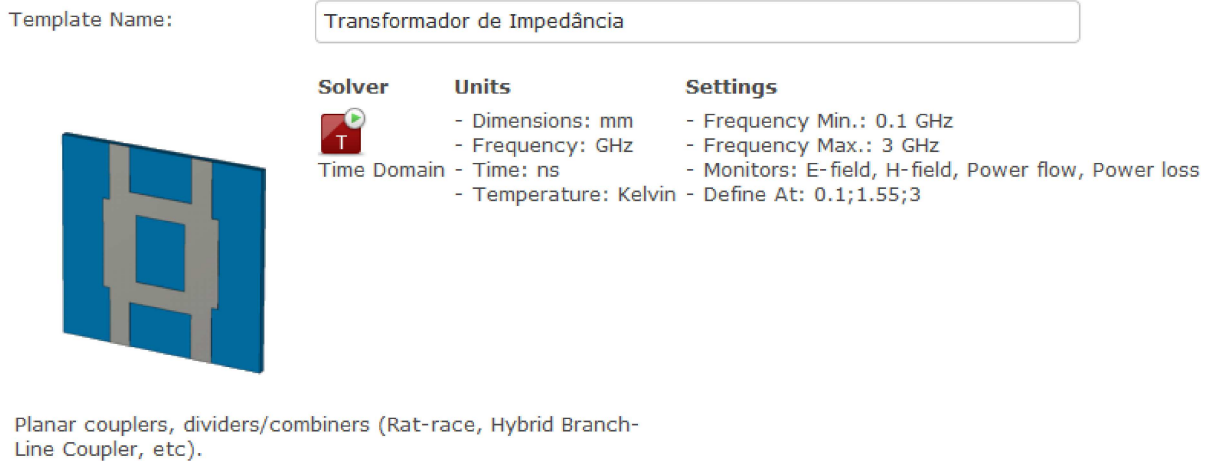


Figura 11 – Configurações iniciais para o projeto do transformador de impedância.

A configuração inicial utilizada na construção do projeto foi: Create a new project → MW & RF & Optical → Planar Couplers & Dividers → Time Domain → (E-field; H-field; Power flow; Power loss).

Após estas configurações, as frequências iniciais e finais de observação foram: $f_{min} = 4$ GHz e $f_{max} = 10$ GHz, utilizando uma acurácia de -50 dB e uma frequência de operação de 7 GHz.

Para a construção dos projetos dos transformadores de impedância foi utilizado como material condutor o *Copper (annealed)* - "Cobre" e como substrato o material *FR-4 (loss free)*, sem perdas, e $\epsilon_r = 4,3$ com uma tangente de perda diferente de zero.

4.1 Transformador de Impedância Retangular

Na Tabela 1 tem-se as dimensões do projeto para o transformador de impedância retangular com apenas uma única seção.

Tabela 1 – Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular.

-	Entrada (mm)	Seção (mm)	Saída (mm)
l	2,000	5,650	2,000
w	1,895	3,450	5,252

O transformador de impedância retangular foi construído e simulado como mostrado na Figura 12.

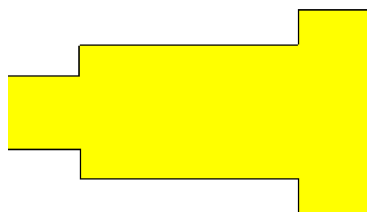


Figura 12 – Projeto do transformador de impedância retangular construído no *CST Studio Suite*.

A Figura 12 mostra um transformador com uma impedância de entrada de $Z_0 = 50\Omega$ e uma impedância de saída de $Z_l = 25\Omega$, sendo um projeto construído em microfita como discutido no Capítulo 2.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{3}$

Como visto no Capítulo 3, os estudos de Sierpinski abordam a retirada de partes da estrutura inicial para a aplicação da teoria de geometria fractal, e será aplicado essa mesma teoria no transformador de impedância retangular de seção única visto anteriormente.

A geometria fractal aplicada em um fator de $\frac{1}{3}$, é a divisão das seções em três partes idênticas, tanto na largura (w) como no comprimento l . Na Figura 13 tem-se um exemplo da divisão da Figura 12 para a marcação do fractal.

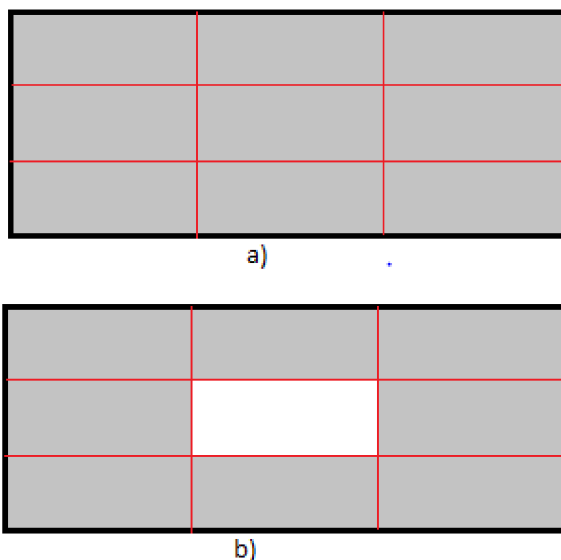


Figura 13 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{3}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.

Na parte (a) da Figura 13 está simbolizado o retângulo já particionado em três partes iguais, tanto na horizontal, quanto na vertical. As marcações seguiram a seguinte

expressão

$$\Delta w = \frac{w}{3}$$

e

$$\Delta l = \frac{l}{3}$$

em que Δw e Δl são os intervalos marcação para cada seção do transformador de impedância.

Na Tabela 2 estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância retangular do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 2 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{3}$.

-	Seção Única (mm)
Δl	1,883
Δw	1,150

Sendo assim, na parte (b) da Figura 13 pode-se observar o exemplo do retângulo já aplicado o conceito de fractal. Para a retirada escolheu-se sempre as partes pares tanto na horizontal como na vertical.

Visualizando-se como uma matriz foi retirada a linha 2 e coluna 2, outro exemplo seria a linha 2 e a coluna 4 e assim sucessivamente.

A Figura 14 mostra o projeto do transformador de impedância retangular com a aplicação da geometria fractal, que foi construído no *CST Studio Suite* através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

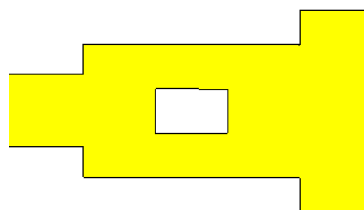


Figura 14 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5 será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{5}$

Será aplicado o mesmo conceito anteriormente descrito, porém com um fator de retirada diferente, para a análise da interferência da geometria fractal no projeto estudado.

A geometria fractal aplicada em um fator de $\frac{1}{5}$ trata da divisão das seções em cinco partes idênticas, tanto na largura (w) como no comprimento l . Na Figura 15 tem-se um exemplo da divisão da Figura 12 para a marcação do fractal.

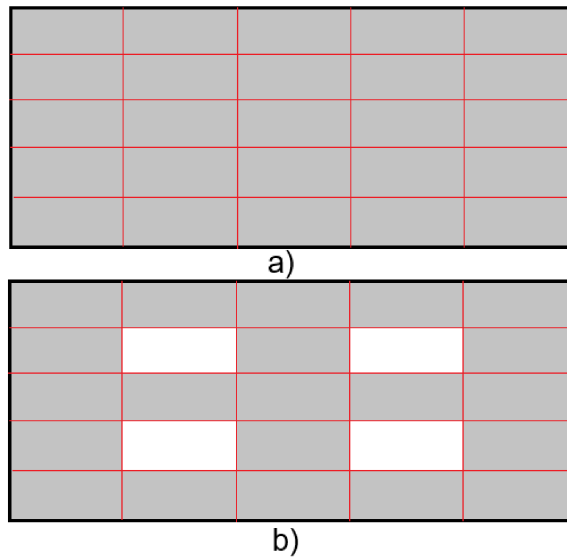


Figura 15 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{5}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.

Na parte (a) da Figura 15 está simbolizado o retângulo já particionado em cinco partes iguais, tanto na horizontal, quanto na vertical. As marcações seguiram a seguinte expressão

$$\Delta w = \frac{w}{5}$$

e

$$\Delta l = \frac{l}{5}$$

em que Δw e Δl são os intervalos marcação para cada seção do transformador de impedância.

Na Tabela 3, estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância retangular para a seção única do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 3 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{5}$.

-	Seção Única (mm)
Δl	1,130
Δw	0,690

Sendo assim, na parte (b) da Figura 15 pode-se observar o exemplo do retângulo já aplicado o conceito de fractal. Para a retirada se escolheu-se sempre as partes pares tanto na horizontal como na vertical.

Visualizando-se como uma matriz foi retirada a linha 2 e coluna 2, outro exemplo seria a linha 2 e a coluna 4 e assim sucessivamente.

A Figura 16 mostra o projeto do transformador de impedância retangular com a aplicação da geometria fractal, que foi construído no *CST Studio Suite* através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

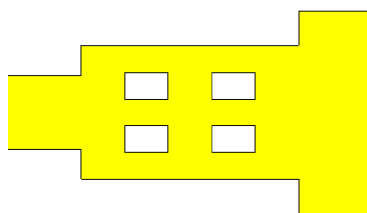


Figura 16 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{7}$

Será aplicado o mesmo conceito anteriormente descrito no transformador de impedância, porém com um fator de retirada diferente, para a análise da interferência da geometria fractal no projeto estudado.

A geometria fractal aplicada em um fator de $\frac{1}{7}$, se trata da divisão das seções em sete partes idênticas, tanto na largura (w) como no comprimento l . Na Figura 17 tem-se um exemplo da divisão da Figura 12 para a marcação do fractal.

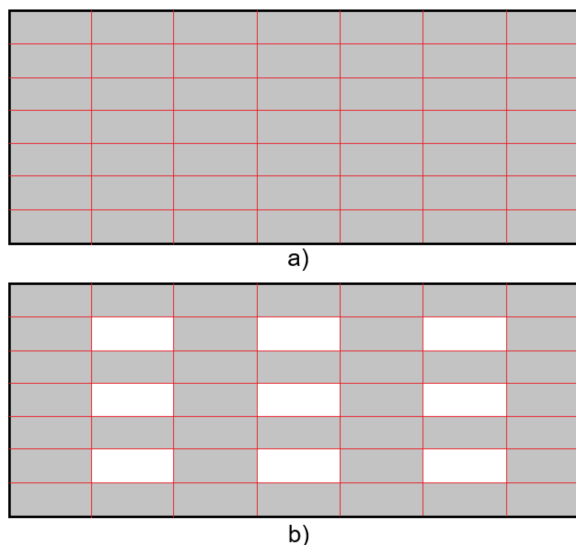


Figura 17 – Exemplo da divisão de $\frac{1}{7}$ em w e l para a retirada de parte da Figura inicial (a) retângulo completo. (b) retângulo com a parte retirada.

Na parte (a) da Figura 17 está simbolizado o retângulo já particionado em sete partes iguais, tanto na horizontal, quanto na vertical. As marcações seguiram a seguinte expressão

$$\Delta w = \frac{w}{7}$$

e

$$\Delta l = \frac{l}{7}$$

em que Δw e Δl são os intervalos marcação para cada seção do transformador de impedância.

Na Tabela 4 estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância retangular para a seção única do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na 1.

Tabela 4 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{7}$.

-	Seção Única (mm)
Δl	0,807
Δw	0,493

Sendo assim, na parte (b) da Figura 17 pode-se observar o exemplo do retângulo já aplicado o conceito de fractal. Para a retirada se escolheu-se sempre as partes pares tanto na horizontal como na vertical.

Visualizando-se como uma matriz foi retirada a linha 2 e coluna 2, outro exemplo seria a linha 2 e a coluna 4, e assim sucessivamente.

A Figura 18 mostra o projeto do transformador de impedância retangular com a aplicação da geometria fractal, que foi construído no *CST Studio Suite* através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

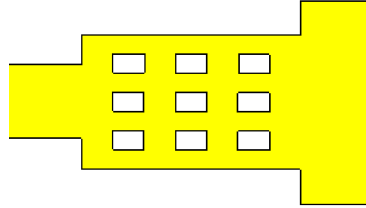


Figura 18 – Projeto do transformador de impedância retangular aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

4.2 Transformador de Impedância Retangular de Duas Seções

Na Tabela 5, são mostradas as dimensões do dispositivo projetado:

Tabela 5 – Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular de duas seções.

-	Entrada (mm)	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Saída (mm)
l	2,000	5,700	5,600	2,000
w	1,895	2,600	4,300	5,252

O transformador de impedância de duas seções foi construído e simulado como mostrado na Figura 19.

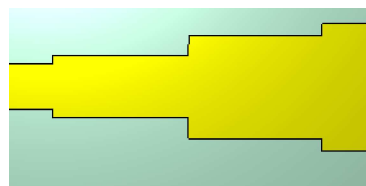


Figura 19 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções construído no *CST Studio Suite*.

A Figura 19, mostra um transformador com uma impedância de entrada de $Z_0 = 50\Omega$ e uma impedância de saída de $Z_l = 25\Omega$, sendo um projeto construído em microfita como discutido no Capítulo 2.

Com as simulações destes transformadores bem sucedida, procedeu-se com o uso da geometria fractal no transformador de impedância de duas seções, aplicando os fatores de $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$ para a retirada de partes da Figura inicial do projeto.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{3}$

Na Tabela 6, estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância para as duas seções do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 6 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{3}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)
Δl	1,900	1,867
Δw	0,867	1,430

A Figura 20 mostra o projeto do transformador de impedância de duas seções que foi construído no *CST Studio Suite* através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

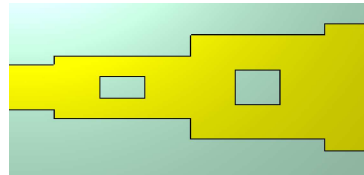


Figura 20 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{5}$

Na Tabela 7, estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância para as duas seções do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 7 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{5}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)
Δl	1,140	1,120
Δw	0,520	0,860

A Figura 21 mostra o projeto do transformador de impedância de duas seções que foi construído no *CST Studio Suite*, através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

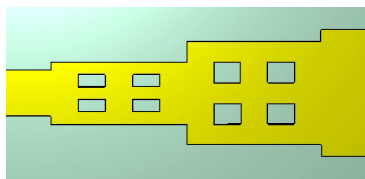


Figura 21 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{7}$

Na Tabela 8, estão os valores para os intervalos de marcação do transformador de impedância para as duas seções do mesmo, sendo calculados a partir dos valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 8 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de duas seções - fator $\frac{1}{7}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)
Δl	0,814	0,800
Δw	0,371	0,614

A Figura 22 mostra o projeto do transformador de impedância de duas seções que foi construído no *CST Studio Suite*, através do exemplo e dos valores calculados anteriormente, visando uma aplicação em microfita.

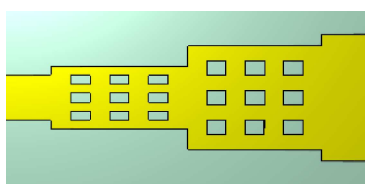


Figura 22 – Projeto do transformador de impedância retangular de duas seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5 será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

4.3 Transformador de Impedância Retangular de Três Seções

A maioria dos conceitos e cálculos utilizados anteriormente no transformador de impedância com duas seções, também pode ser aplicado no transformador de impedância com três seções.

Foram utilizados retângulos como Figura geométrica para a construção do transformador de impedância com três seções. Na Tabela 9 tem-se as dimensões do projeto.

Tabela 9 – Dimensões do projeto do transformador de impedância retangular de duas seções.

-	Entrada (mm)	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)	Saída (mm)
l	2,000	5,800	5,700	5,600	2,000
w	1,895	2,300	3,300	4,700	5,252

A partir das dimensões citadas acima e os materiais proposto para a criação do projeto, foi então construído o transformador de impedância de três seções, como mostrado na Figura 23.

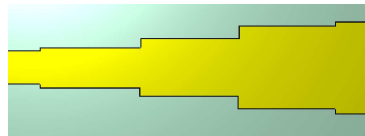


Figura 23 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções construído no *CST Studio Suite*.

A Figura 19 mostra um transformador que possui na entrada uma impedância de $Z_0 = 50\Omega$ e uma impedância de saída de $Z_l = 25\Omega$, sendo um projeto construído em microfita como discutido no Capítulo 2.

- Transformador de três seções para 500 MHz

Foi construído também o transformador de três seções para a frequência de 500 MHz, utilizando os conceitos de microfita e aplicando a equação (2.5), pode-se observar o projeto deste transformador na Figura 24. A comparação de suas simulação e também da análise do protótipo serão abordadas no Capítulo 5 e 6.



Figura 24 – Projeto do transformador de impedância de três seções na frequência de operação de 500 MHz construído no *CST Studio Suite*.

Na Tabela 10, estão as medidas em milímetros e a impedância característica em ohms utilizadas para cada um dos estágios do transformador de três seções de quarto de onda.

Tabela 10 – Dimensões do transformador de impedância de quarto de onda com três seções.

-	Entrada	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Saída
Z(Ω)	50,00	43,00	33,80	26,10	25,00
l(mm)	10,00	69,60	68,40	67,20	10,00
w(mm)	3,12	3,79	5,44	7,75	8,44

Através da Tabela 10 é observado que o transformador de impedância de três estágios possui o tamanho de 225,20 milímetros.

A partir de agora será aplicado a geometria fractal no transformador de impedância de três seções, aplicando os fatores de $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$ para a retirada de partes da Figura inicial do projeto.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{3}$

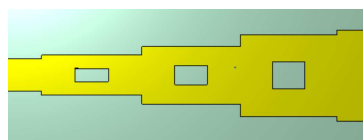
Da mesma forma que utilizou-se um grande braço da geometria fractal para o transformador de impedância de duas seções, baseado na retirada de partes da Figura inicial, para o transformador de impedância de três seções também será utilizado esse conceito.

Como mostrado na Figura 13, a marcação dos fractais e já mostrado anteriormente toda a sua aplicação, a Tabela 11 mostra os intervalos que serão aplicados nas três seções do transformador.

Tabela 11 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{3}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)
Δl	1,933	1,900	1,867
Δw	0,767	1,100	1,567

Logo para construir o transformador de impedância de três seções, foi utilizado a mesma analogia feita para o de duas seções. Aplicando esses conceitos a Figura 25 traz o transformador construído no *CST Studio Suite*.

Figura 25 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{3}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{5}$

Da mesma forma que utilizou-se um grande braço da geometria fractal para o transformador de impedância de duas seções, baseado na retirada de partes da Figura inicial, para o transformador de impedância de três seções também será utilizado esse conceito.

Como mostrado na Figura 15 a marcação dos fractais e já mostrado anteriormente toda a sua aplicação, a Tabela 12 mostra os intervalos que serão aplicados nas três seções do transformador.

Tabela 12 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{5}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)
Δl	1,160	1,140	1,120
Δw	0,460	0,660	0,940

Logo para construir o transformador de impedância de três seções, foi utilizado a mesma analogia feita para o de duas seções. Aplicando esses conceitos a Figura 26 traz o transformador construído no *CST Studio Suite*.

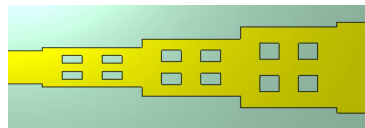


Figura 26 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{5}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{7}$

Da mesma forma que utilizou-se um grande braço da geometria fractal para o transformador de impedância de duas seções, baseado na retirada de partes da figura inicial, para o transformador de impedância de três seções também será utilizado esse conceito.

Como mostrado na Figura 17 a marcação dos fractais e já mostrado anteriormente toda a sua aplicação, a Tabela 13 mostra os intervalos que serão aplicados nas três seções do transformador.

Tabela 13 – Valores dos intervalos de marcação dos fractais no transformador de três seções - fator $\frac{1}{7}$.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)
Δl	0,829	0,814	0,800
Δw	0,329	0,471	0,671

Logo para construir o transformador de impedância de três seções, foi utilizado a mesma analogia feita para o de duas seções. Aplicando esses conceitos a Figura 27 traz o transformador construído no *CST Studio Suite*.

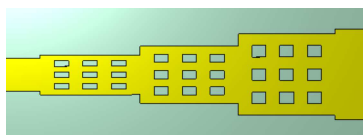


Figura 27 – Projeto do transformador de impedância retangular de três seções aplicando o fractal de fator $\frac{1}{7}$ construído no *CST Studio Suite*.

No Capítulo 5, será analisado e discutido a resposta da configuração proposta acima, explorando o software *CST Studio Suite*.

4.4 Transformador de Klopfenstein

Para a construção do transformador de Klopfenstein foram utilizadas as Equações (2.6) e (2.7) e assim construído o referido transformador em 10 GHz. Após isto, utilizando o escalonamento citado por Klopfenstein, o transformador foi redimensionado para a frequência de 500 MHz, e a resposta em frequência do parâmetro S_{11} é apresentada na Figura 28.



Figura 28 – Projeto do transformador de impedância Klopfenstein construído no *CST Studio Suite*.

Esse transformador possui um estágio cônico interligando a entrada e a saída através de um sólido formado por uma curva com suavidade baixa de 0,1 que se aproxima de uma linha retilínea na seção cônica. A Tabela 14 mostra as medidas em milímetros para a construção do transformador de Klopfenstein, e as impedâncias características para cada estágio em ohms.

Tabela 14 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfenstein.

-	Entrada	Estágio Cônico	Saída
Z (Ω)	50,00	nula	25,00
l (mm)	10,00	192,10	10,00
w (mm)	3,12	-	8,44

4.5 Transformador de Klopfenstein Particionado

Por último foi construído o transformador de Klopfenstein particionado em 10 estágios sendo aplicando a teoria de fractal com um fator de $\frac{1}{3}$ como mostrado na Fig. 29. Como relatado anteriormente, foi utilizando o conceito do tapete de Sierpinski em cada um dos 10 estágios do transformador.



Figura 29 – Projeto do transformador de impedância Klopfenstein particionado com fator de aplicação do fractal de $\frac{1}{3}$ construído no *CST Studio Suite*.

Para a construção dos fractais foi dividido tanto a largura, quanto o comprimento de cada estágio por 3 para que fosse aplicado a geometria fractal, retirando a divisão central de cada estágio. As medidas e impedâncias características de cada estágio estão sendo mostradas na Tabela 15.

Tabela 15 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfenstein.

-	Entrada	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Z(Ω)	50,00	44,01	40,62	37,73
l(mm)	10,00	12,43	12,43	12,43
w(mm)	3,12	3,61	4,09	4,57
-	Seção 4	Seção 5	Seção 6	Seção 7
Z(Ω)	35,18	33,02	31,11	29,38
l(mm)	12,43	12,43	12,43	12,43
w(mm)	5,06	5,54	6,02	6,51
-	Seção 8	Seção 9	Seção 10	Saída
Z(Ω)	27,87	26,51	25,65	25,00
l(mm)	12,43	12,43	12,43	10,00
w(mm)	6,99	7,47	7,96	8,44

As análises pertinentes a Tabela 15 serão discutidas no próximo capítulo deste trabalho.

5 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES

Neste Capítulo serão discutidos os resultados das simulações dos transformadores de impedância construídos no Capítulo anterior.

Para se obter o resultado da simulação no *CST Studio Suite* foi feito o ajuste dos parâmetros de acordo com Figura 30.

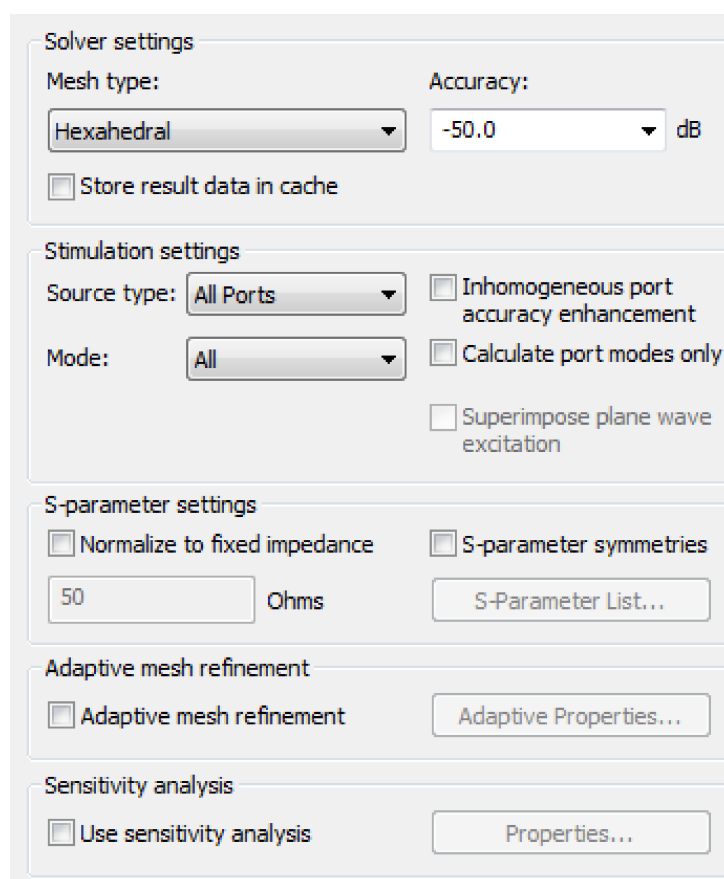


Figura 30 – Ajuste dos parâmetros para a análise dos projetos no *CST Studio Suite*.

Como mostrado na Figura a acurácia, ou seja, a precisão da simulação, foi ajustada para -50 dB visando um melhor resultado. Também não normalizou-se a impedância para que fosse possível a análise real do transformador de impedância.

5.1 Transformador de Impedância Retangular

Após todas as configurações e ajustes feitos, a Figura 31 mostra da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular de seção única.

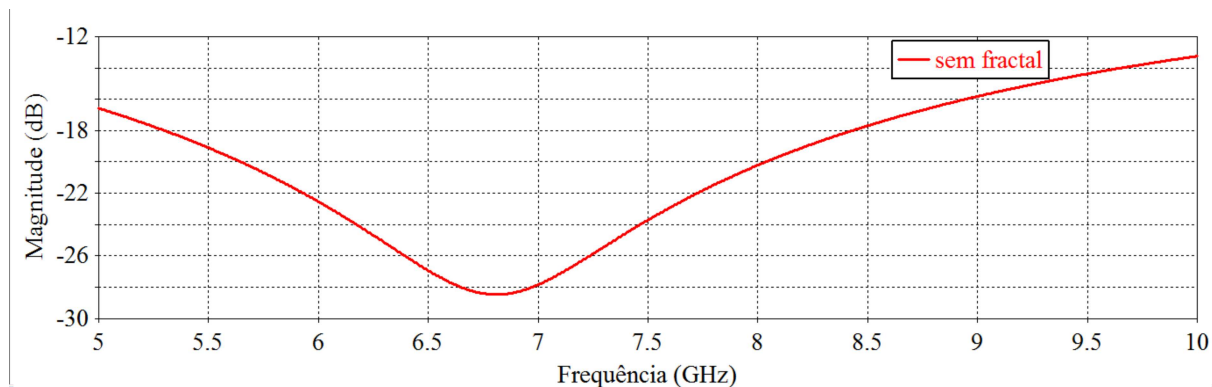


Figura 31 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular simulado no *CST Studio Suite*.

Adotando-se um limite de -20 dB como largura de banda para o S_{11} , a largura de banda abaixo desse limiar foi definida como aproximadamente 2,39 GHz, de 5,65 GHz até 8,04 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{3}$

Pode-se observar na Figura 32 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância retangular com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{3}$.

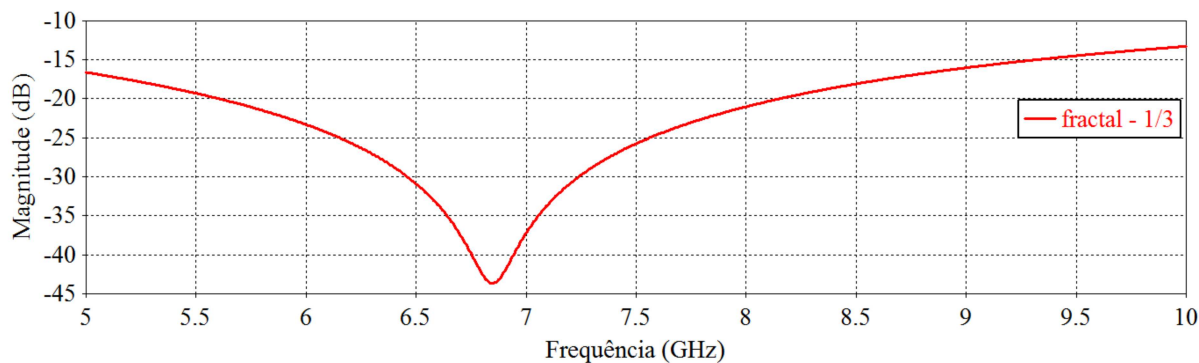


Figura 32 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 32 foi de aproximadamente 2,54 GHz, de 5,60 GHz até 8,14 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{5}$

Pode-se observar na Figura 33 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância retangular com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{5}$.

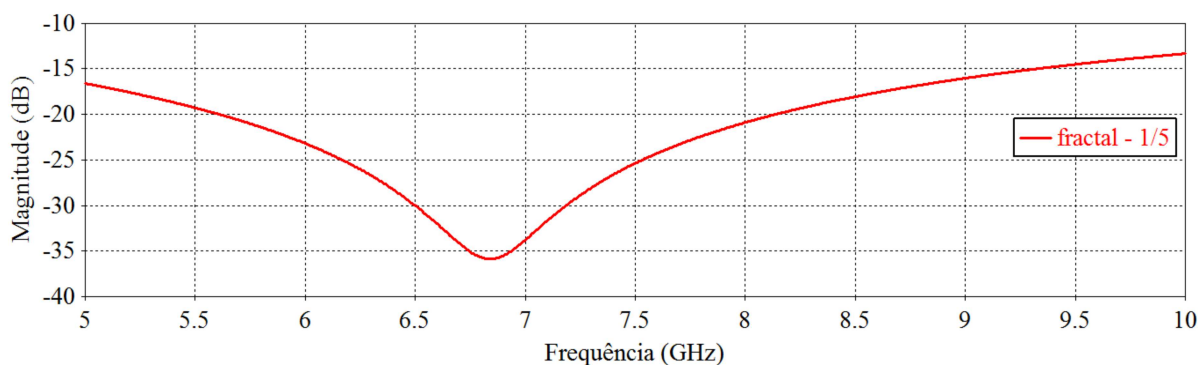


Figura 33 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 33 foi de aproximadamente 2,53 GHz, de 5,62 GHz até 8,15 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{7}$

Pode-se observar na Figura 34 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância retangular com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{7}$.

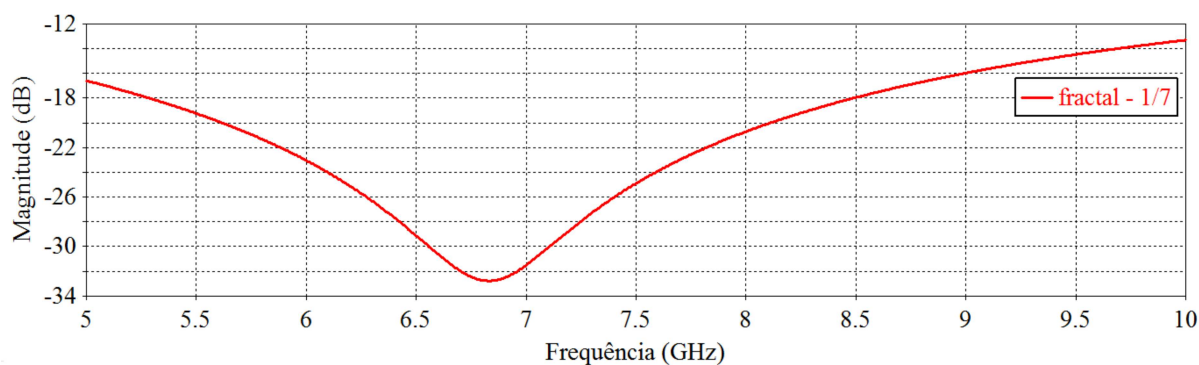


Figura 34 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância retangular com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 32 foi de aproximadamente 2,51 GHz, de 5,61 GHz até 8,12 GHz, a seguir será realizado a comparação dos fatores de fractal aplicados.

- Comparação dos Fatores Aplicados

Uma comparação feita foi a largura de banda de cada um dos transformadores de impedância retangular, construídos no Capítulo 4. A Figura 35 mostra a sobreposição das respostas de magnitude em dB de cada um dos projetos.

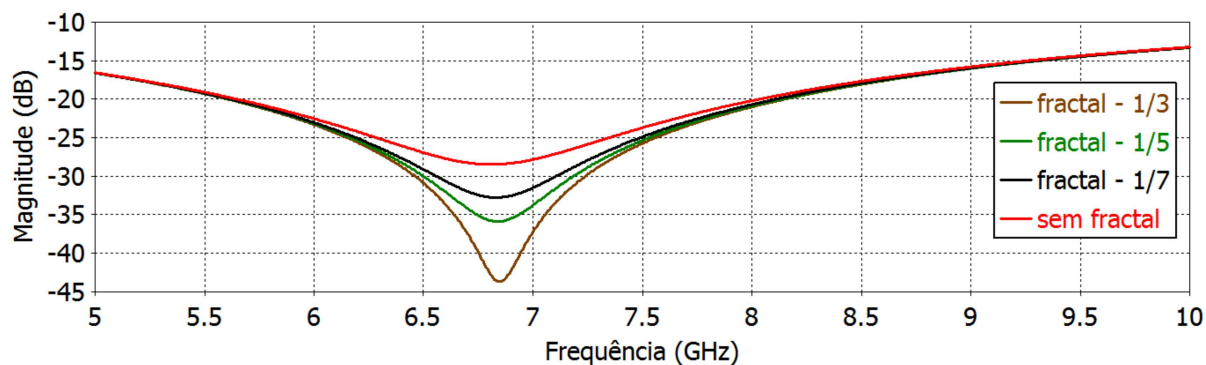


Figura 35 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no *CST Studio Suite*.

A Tabela 16 mostra os valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas para o transformador de impedância retangular.

Tabela 16 – Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - Retangular de seção única.

Fator	Frequência Mínima (GHz)	Frequência Máxima (GHz)	Largura de Banda (GHz)
sem	5,65	8,04	2,39
$\frac{1}{3}$	5,60	8,14	2,54
$\frac{1}{5}$	5,62	8,15	2,53
$\frac{1}{7}$	5,61	8,12	2,51

Pode-se observar que para as três aplicações do fator de fractal, o aumento da largura de banda foi semelhante. Com o transformador de impedância com fractal de fator $\frac{1}{3}$, um aumento aproximadamente 0,15 GHz na banda com relação ao transformador retangular de seção única.

Pode-se também notar através dos gráficos e Tabelas que um aumento adicional de largura de banda com relação ao fator de $\frac{1}{3}$ não foi verificado para os fatores de $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$, indicando um limite para o uso desta técnica.

Buscando-se um aumento ainda maior na largura de banda, foram feitas simulações para o transformador retangular de duas seções.

5.2 Transformador de Impedância Retangular de Duas Seções

Após todas as configurações e ajustes feitos, a Figura 36 traz a resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância com duas seções.

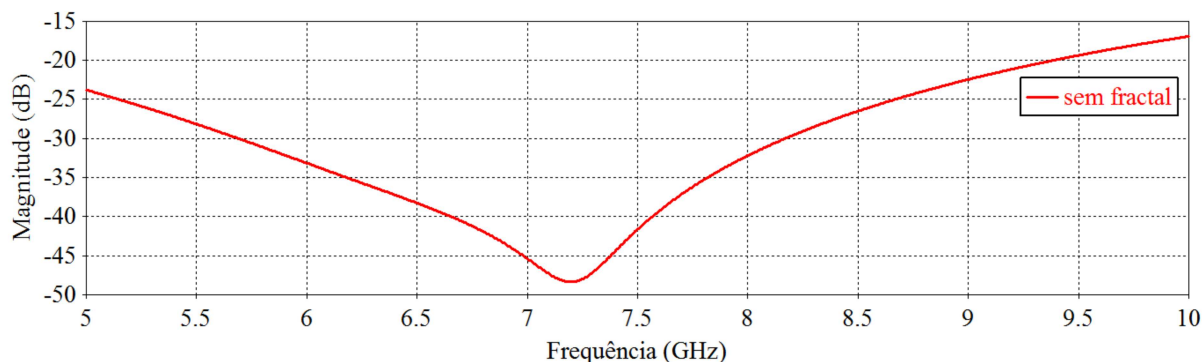


Figura 36 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções simulado no *CST Studio Suite*.

Adotando-se um limite de -30 dB como largura de banda para o S_{11} , a largura de banda abaixo desse limiar foi definida como aproximadamente 2,5 GHz, de 5,68 GHz até 8,17 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{3}$

Pode-se observar na Figura 37 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de duas seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{3}$.

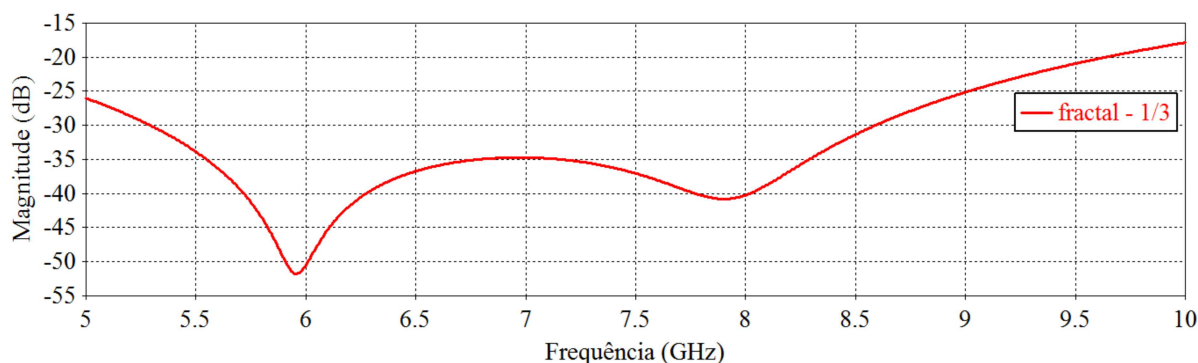


Figura 37 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 37 foi de aproximadamente 3,32 GHz, de 5,28 GHz até 8,60 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{5}$

Pode-se observar na Figura 38 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de duas seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{5}$.

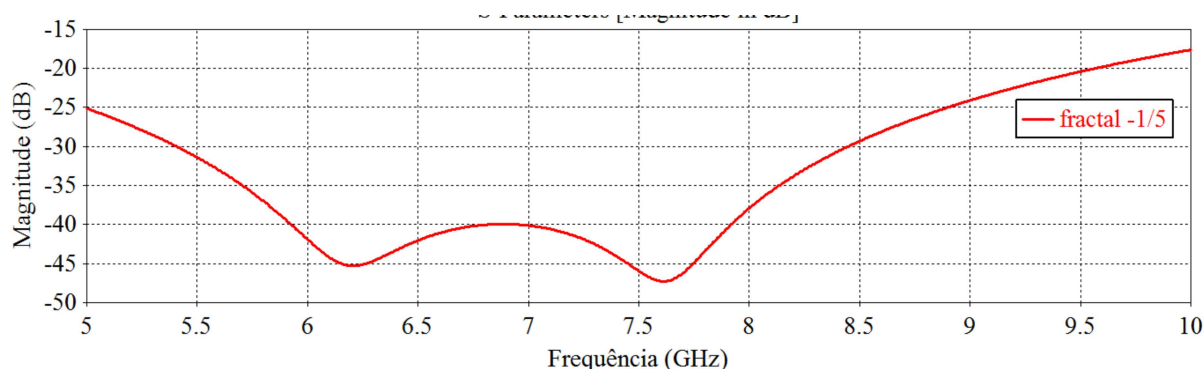


Figura 38 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 38 foi de aproximadamente 3,04 GHz, de 5,40 GHz até 8,44 GHz.

- Fator de Aplicação da Geometria Fractal em $\frac{1}{7}$

Pode-se observar na Figura 39 a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de duas seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{7}$.

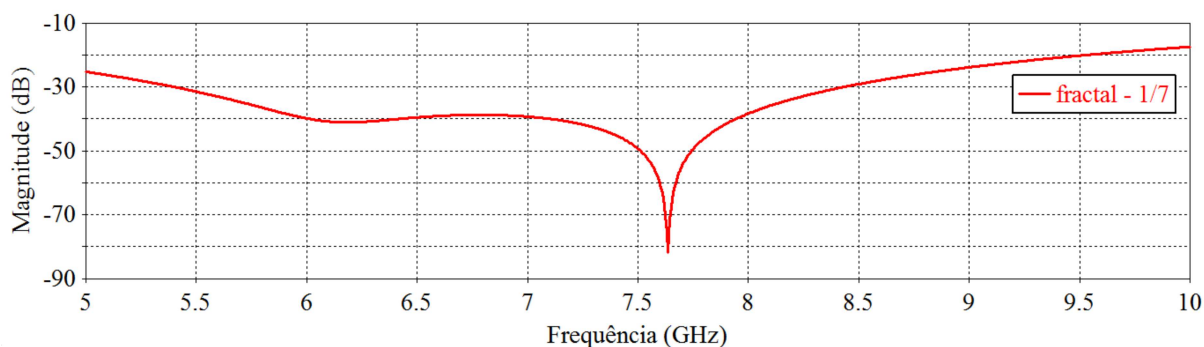


Figura 39 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de duas seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no *CST Studio Suite*.

Para este caso a largura de banda na Figura 39 foi de aproximadamente 3,04 GHz, de 5,40 GHz até 8,44 GHz.

- Comparação dos Fatores Aplicados

Uma comparação feita foi a largura de banda de cada um dos transformadores de impedância de duas seções, construídos no Capítulo 4. A Figura 40 mostra a sobreposição das respostas de magnitude em dB de cada um dos projetos.

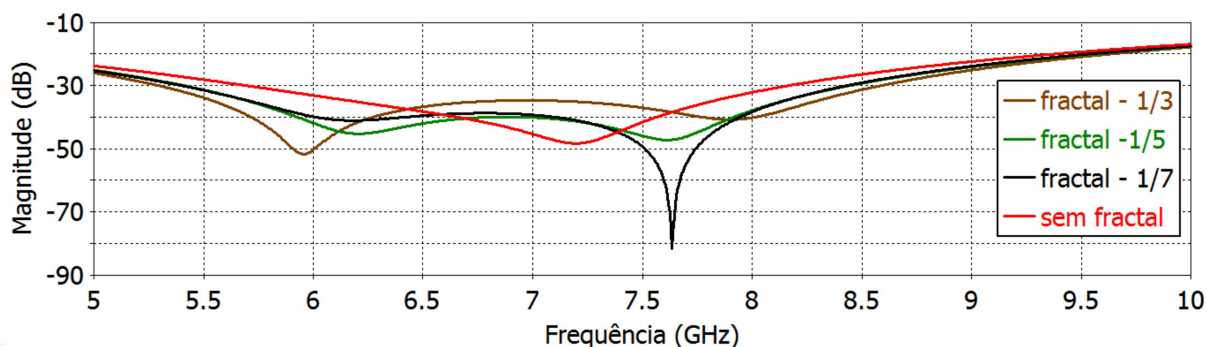


Figura 40 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no *CST Studio Suite*.

A Tabela 17 mostra os valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas para o transformador de impedância.

Tabela 17 – Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - duas seções.

Fator	Frequência Mínima (GHz)	Frequência Máxima (GHz)	Largura de Banda (GHz)
sem	5,68	8,17	2,49
$\frac{1}{3}$	5,28	8,60	3,32
$\frac{1}{5}$	5,40	8,44	3,04
$\frac{1}{7}$	5,40	8,44	3,04

A maior largura de banda foi verificada para o transformador de impedância com fractal de fator $\frac{1}{3}$, um aumento de aproximadamente 0,83 GHz na banda com relação ao transformador de duas seções sem nenhum fractal aplicado.

Pode-se também notar através dos gráficos e Tabelas que um aumento adicional de largura de banda com relação ao fator de $\frac{1}{3}$ não foi verificado para os fatores de $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$, indicando um limite para o uso desta técnica.

Buscando-se um aumento ainda maior na largura de banda, foram feitas simulações para o transformador retangular de três seções.

5.3 Transformador de Impedância Retangular de Três Seções

Analogamente ao transformador de duas seções, os ajuste e configurações foram feitos para o transformador de três seções. Foi alterada a frequência mínima de 5 GHz para 4 GHz, para uma melhor visualização das respostas de cada projeto construído, uma vez que um aumento na largura de banda era esperado.

A Figura 41 mostra a resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de três seções; a Figura 42 traz a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de três seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{3}$; a Figura 43 traz a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de três seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{5}$; a Figura 44 traz a resposta de magnitude em dB do transformador de impedância de três seções com o fator de aplicação da geometria fractal em $\frac{1}{7}$.

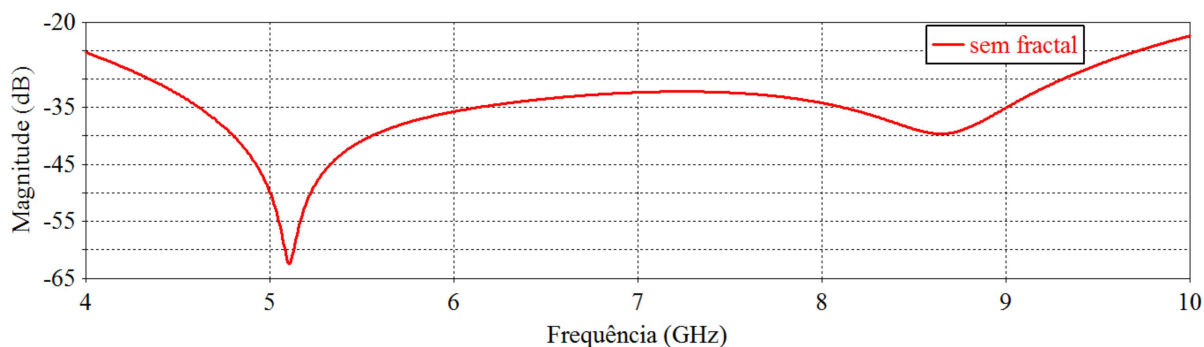


Figura 41 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções simulado no *CST Studio Suite*.

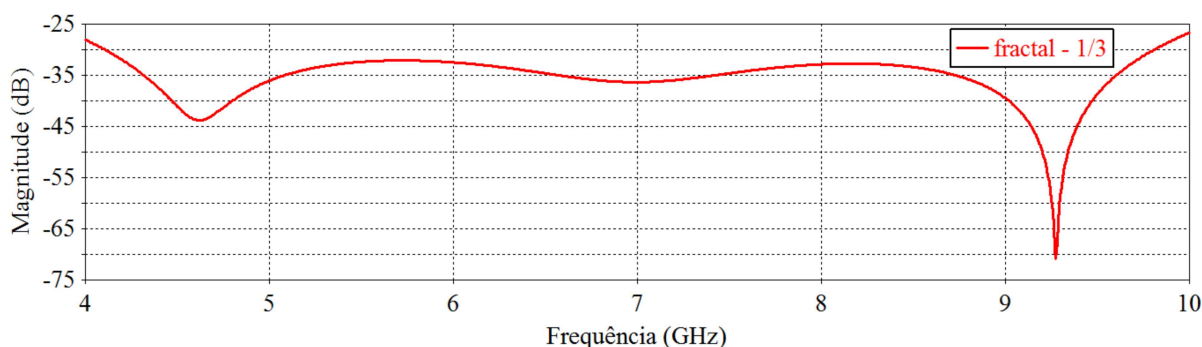


Figura 42 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{3}$ simulado no *CST Studio Suite*.

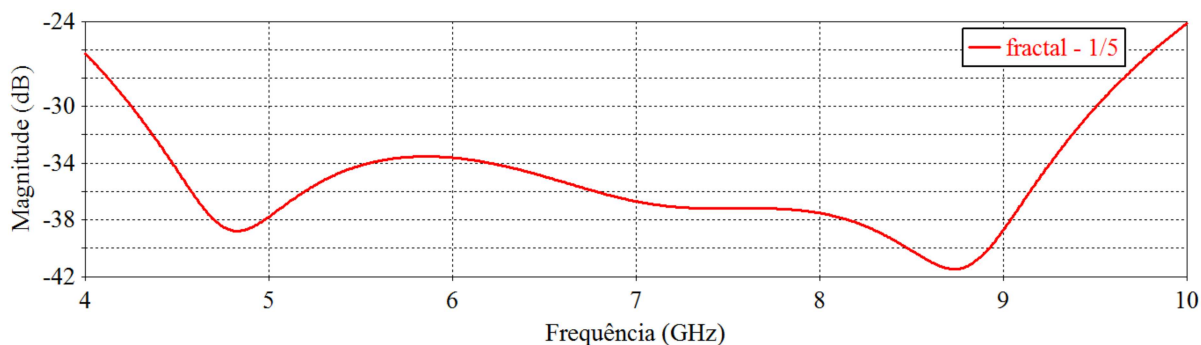


Figura 43 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{5}$ simulado no *CST Studio Suite*.

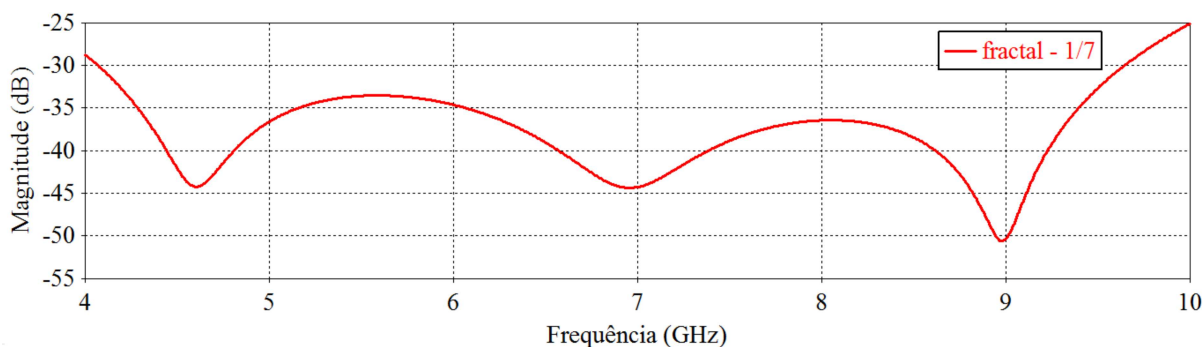


Figura 44 – Resposta da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para o transformador de impedância de três seções com a aplicação do fractal de fator $\frac{1}{7}$ simulado no *CST Studio Suite*.

- Comparação dos Fatores Aplicados

A Figura 45 mostra a sobreposição das respostas de magnitude em dB de cada um dos projetos. Pode-se observar que a curva relacionada ao projeto que aplica a geometria fractal com fator de $\frac{1}{3}$ tem a melhor largura banda em comparação com o restante dos projetos sobrepostos.

Uma segunda análise que se pode observar é os três vales que aparecem na curva do projeto do transformador com aplicação do fator de $\frac{1}{7}$ de fractal, sendo que os outros projetos aparecem somente dois vales.

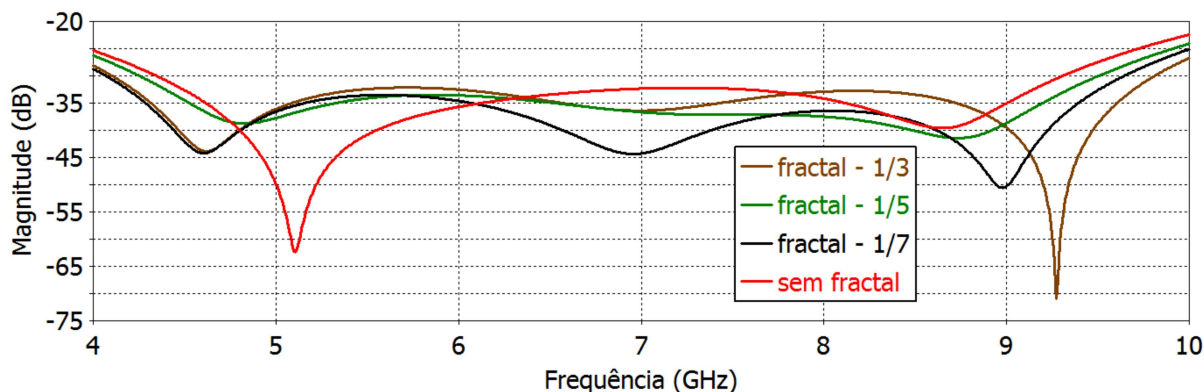


Figura 45 – Gráfico que mostra as curvas da magnitude em dB do parâmetro S_{11} para a comparação da aplicação do fractal para os diferentes fatores simulados no *CST Studio Suite*.

A Tabela 18 mostra os valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas para o transformador de impedância.

Tabela 18 – Valores da largura de banda para cada uma das configurações propostas - três seções.

Fator	Frequência Mínima (GHz)	Frequência Máxima (GHz)	Largura de Banda (GHz)
sem	4,33	9,32	4,99
$\frac{1}{3}$	4,09	9,82	5,73
$\frac{1}{5}$	4,25	9,51	5,26
$\frac{1}{7}$	4,07	9,65	5,58

A maior largura de banda foi verificada para o transformador de impedância com fractal de fator $\frac{1}{3}$, um aumento de aproximadamente 0,74 GHz na banda com relação ao transformador de três seções sem nenhum fractal aplicado.

Pode-se também notar novamente através dos gráficos e Tabelas que um aumento adicional de largura de banda com relação ao fator de $\frac{1}{3}$ não foi verificado para os fatores de $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$, indicando um limite para o uso desta técnica.

- Transformador de três seções para 500 MHz

Como visto no Capítulo anterior, para prototipação dos projetos, foi construído um transformador de três seções para operar na frequência de 500 MHz. A resposta do parâmetro S_{11} em dB deste transformador é mostrada na Figura 46.

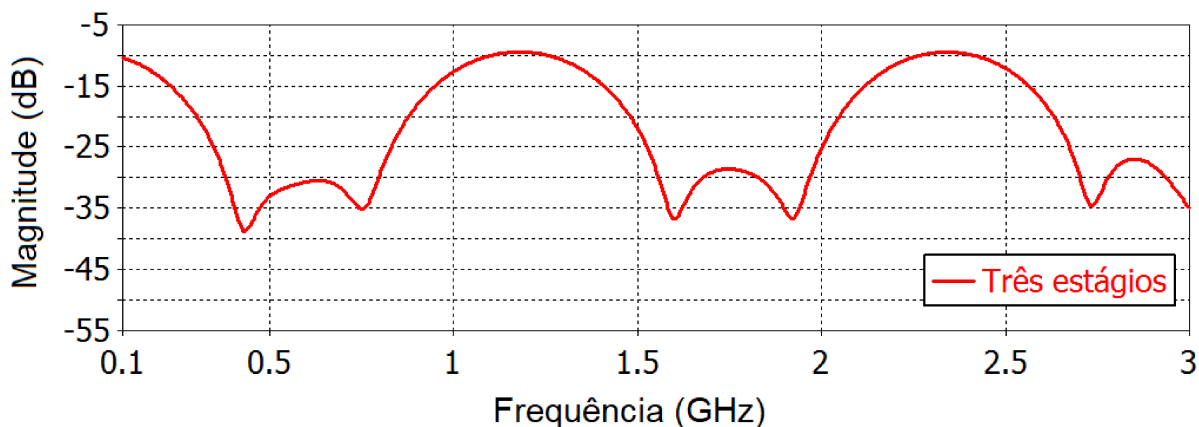


Figura 46 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância retangular de três seções construído no *CST Studio Suite*.

Foi considerado o limiar de -20 dB como um limite aceitável para largura de banda, observa-se através da Figura 46 uma largura de banda de aproximadamente 575 MHz. Pode-se observar através do gráfico a repetição do comportamento para frequências mais altas, como esperado neste tipo de transformador de quarto de onda.

5.4 Transformador de Klopfenstein

A largura de banda deste transformador é apresentada na Figura 47.

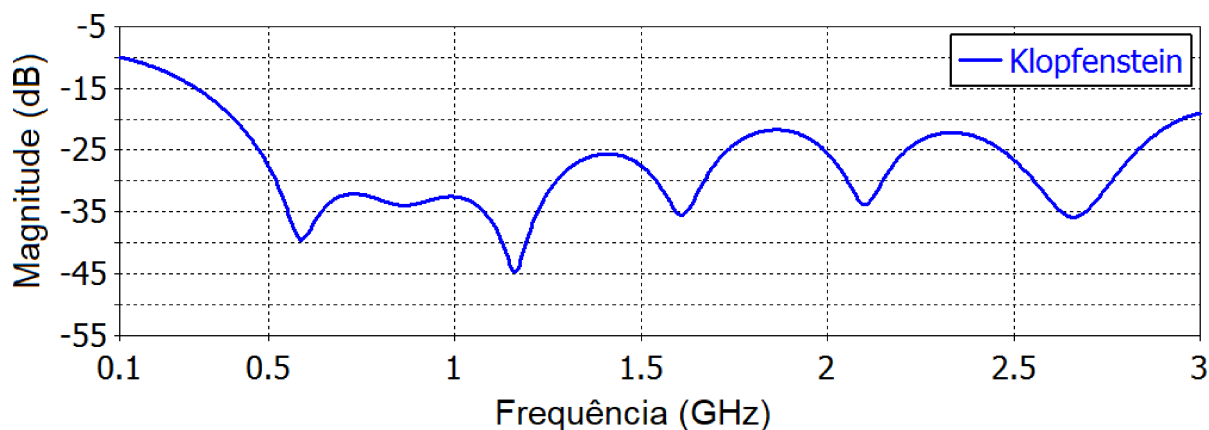


Figura 47 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância Klopfenstein construído no *CST Studio Suite*.

Pode-se também perceber uma melhora significativa na banda do projeto. O gráfico da Figura 47 nos mostra que o transformador de Klopfenstein atinge o limiar de -20 dB na frequência de 408 MHz e permanece abaixo desse limiar até quase 3 GHz.

5.5 Transformador de Klopfenstein Particionado

A Figura 48 mostra a resposta em magnitude do parâmetro S_{11} (dB) do projeto do transformador de Klopfenstein particionado em dez seções, e aplicado o fator de $\frac{1}{3}$ da teoria de fractal. Através da geometria fractal foi possível reduzir significativamente o tamanho do projeto, mantendo aproximadamente as mesmas características do parâmetro S_{11} do transformador de Klopfenstein anterior.

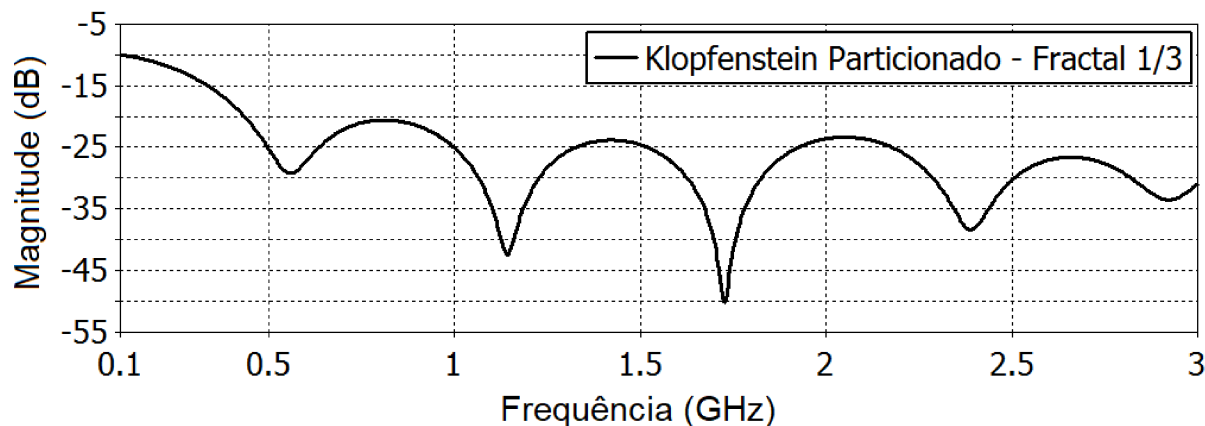


Figura 48 – Resposta do parâmetro S_{11} (dB) do transformador de impedância Klopfenstein particionado com fator de aplicação do fractal de $\frac{1}{3}$ construído no *CST Studio Suite*.

A partir da Tabela 15 observa-se que o transformador particionado apresentou o menor tamanho do comprimento em microfita para as mesmas características de operação dos transformadores analisados anteriormente, 114,30 milímetros. Comparando ao transformador de impedâncias de três estágios, foi observada uma redução de aproximadamente 50 % do comprimento total do projeto. A resposta em magnitude apresentada na Figura 48 mostra que o transformador atinge o limiar de -20 dB na frequência de 433 MHz e se mantém abaixo desse limiar.

- Comparação das respostas em 500 MHz

Após a construção dos três projetos para a frequência de operação de 500 MHz, foi proposto uma comparação entre o transformador de impedância de três estágios, o transformador de Klopfenstein e o transformador de Klopfenstein particionado. A Figura 49 mostra as três curvas de resposta superpostas, evidenciando a largura de banda de cada um dos transformadores de impedância.

A curva 1 apresentada na Figura 49 refere-se à resposta do transformador de impedância de quarto de onda com três estágios, a curva 2 é a resposta do transformador de impedância de Klopfenstein e a curva 3 é a resposta do transformador de Klopfenstein

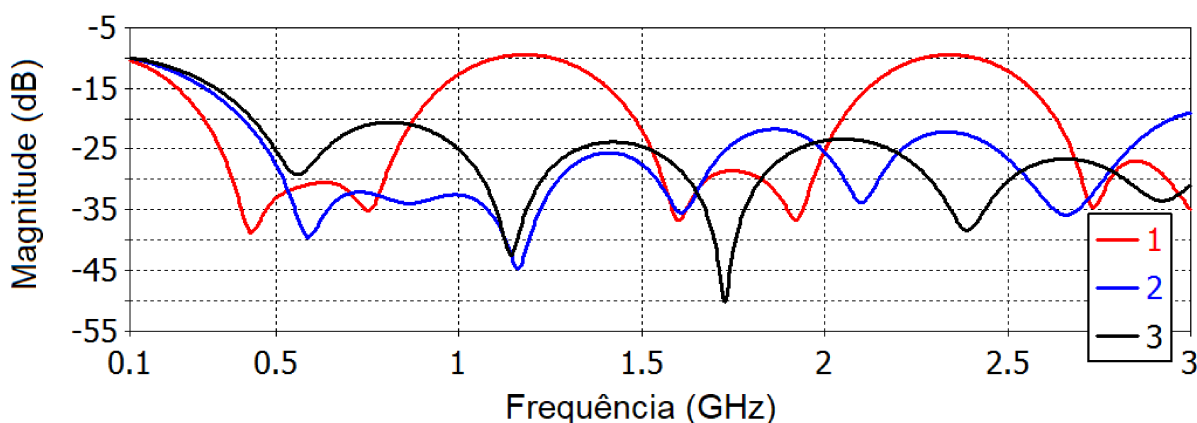


Figura 49 – Comparação das respostas em magnitudes (dB) dos três projetos propostos em 500 MHz.

particionado em dez estágios, com geometria fractal, com um fator de $\frac{1}{3}$. Esse fator da geometria de fractal foi escolhido por ter apresentado a melhor resposta em relação à largura de banda. Pode-se então observar que a metodologia aplicada aproximou o comportamento do transformador de tamanho reduzido utilizando a teoria de geometria de fractais ao Klopfenstein original. A Tabela 19 traz a comparação das dimensões físicas dos projetos.

Tabela 19 – Comparação no tamanho dos transformadores.

Transformador	Comprimento (mm)	Redução
Três estágios	225,20	-
Klopfenstein	212,10	5 %
Particionado	114,30	50%

Pode-se observar uma redução de 50% no transformador particionado em relação ao transformador de três estágios.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as simulações e o desenvolvimento dos projetos foram construídos protótipos dos três transformadores em uma placa de circuito impresso (FR4), de acordo com as medidas mostradas nas Tabelas 10, 14 e 15. A Figura 50 mostra os protótipos construídos, em que ambos os projetos estão operando na frequência de 500 MHz.

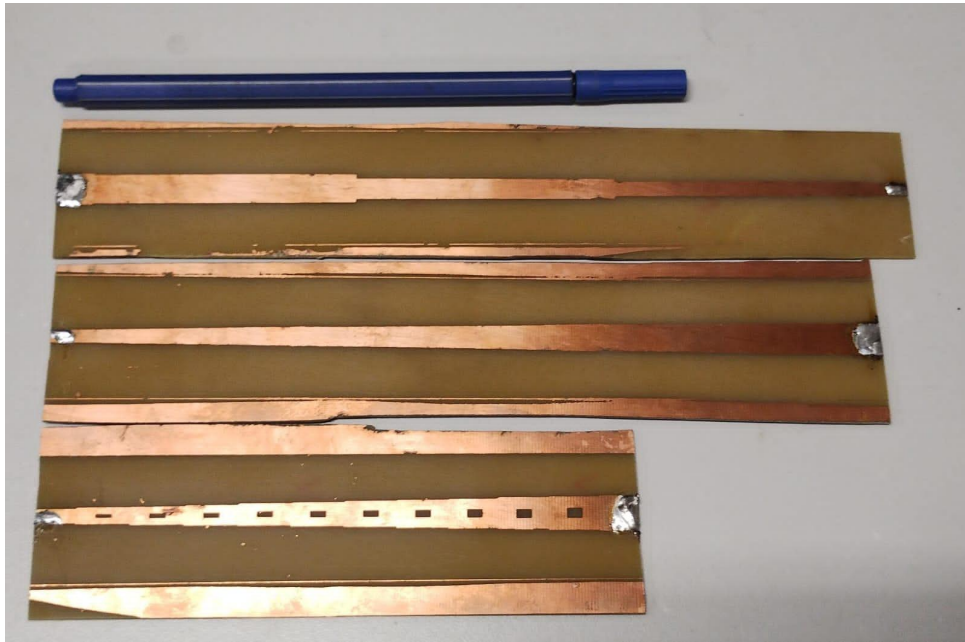


Figura 50 – Protótipo dos três projetos propostos.

Em um primeiro momento foram construídos dois transformadores iguais de cada tipo e foi feita a união dos dois pelo lado de 25Ω para se verificar a perda por inserção, medida pelo parâmetro S_{21} . Dividindo essa perda em dB por dois é possível quantificar as perdas de cada um dos transformadores em dB.

As medidas para a construção dos transformadores de impedância que foram construídos está sendo detalhada no apêndice A, de acordo com os projetos simulados de cada um dos três transformadores no *CST Studio Suite*. A Figura 51 mostra a perda por inserção do transformador de impedância de quarto de onda retangular de três estágios construído.

Sabe-se que a perda por inserção em radiofrequência pode ser calculada pela seguinte expressão.

$$Il = -20\log_{10}(S_{21})$$

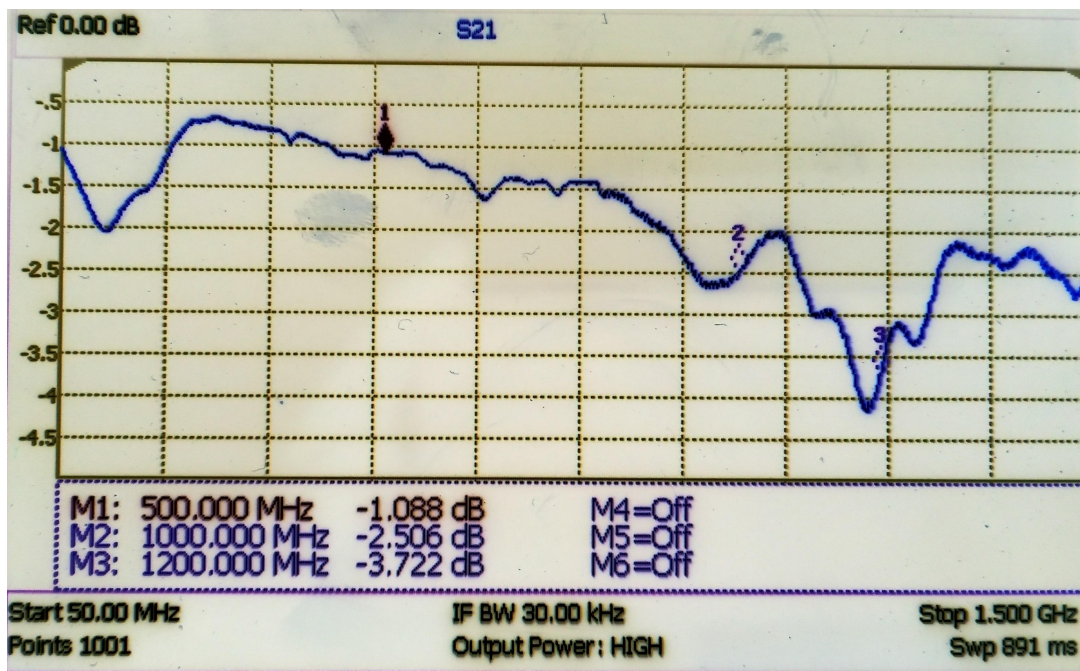


Figura 51 – Parâmetro S_{21} (dB) do transformador de quarto de onda de três estágios (2 transformadores).

A Figura 52 mostra a perda por inserção do transformador de Klopfenstein.

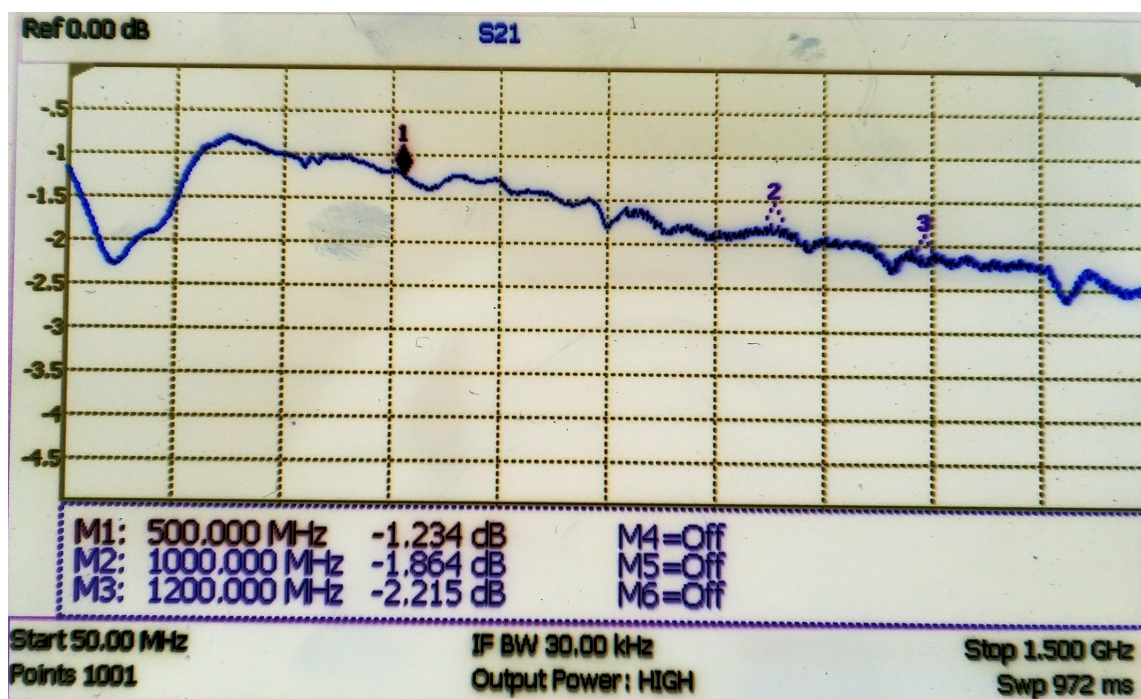


Figura 52 – Parâmetro S_{21} (dB) do transformador de Klopfenstein (2 transformadores).

A Figura 53 mostra a perda por inserção do transformador de Klopfenstein particionado com um fator de $\frac{1}{3}$ de fractal aplicado.

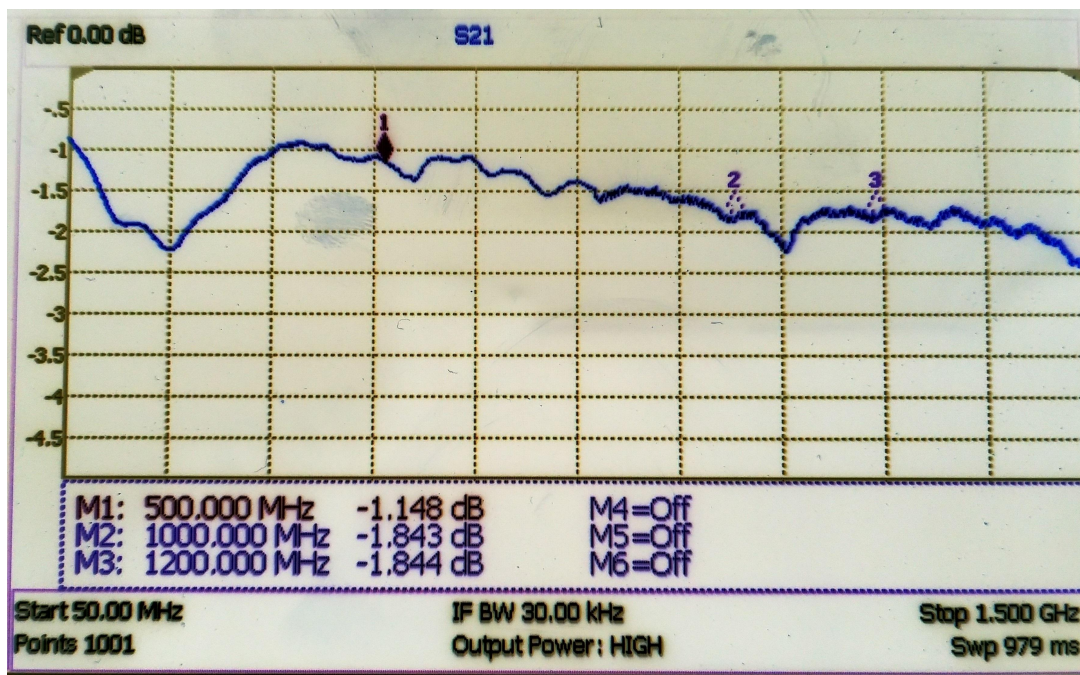


Figura 53 – Parâmetro S_{21} do transformador de Klopfenstein particionado com aplicação de fractal (2 transformadores).

Os resultados do parâmetro S_{11} dos transformadores são apresentados nas Figs. 54, 55 e 56, sendo respectivamente a resposta para o transformador de quarto de onda de três estágios, para o transformador de Klopfenstein e para o transformador de Klopfenstein particionado.

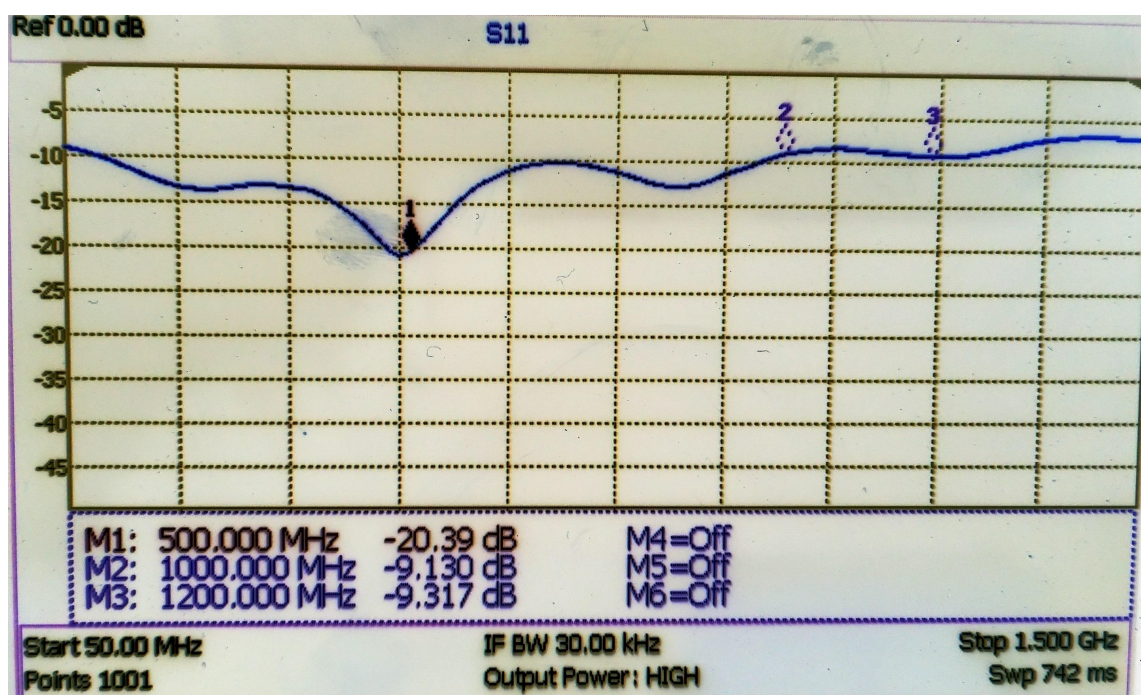


Figura 54 – Medida do parâmetro S_{11} do transformador de três estágios.



Figura 55 – Medida do parâmetro S_{11} do transformador de Klopfenstein.

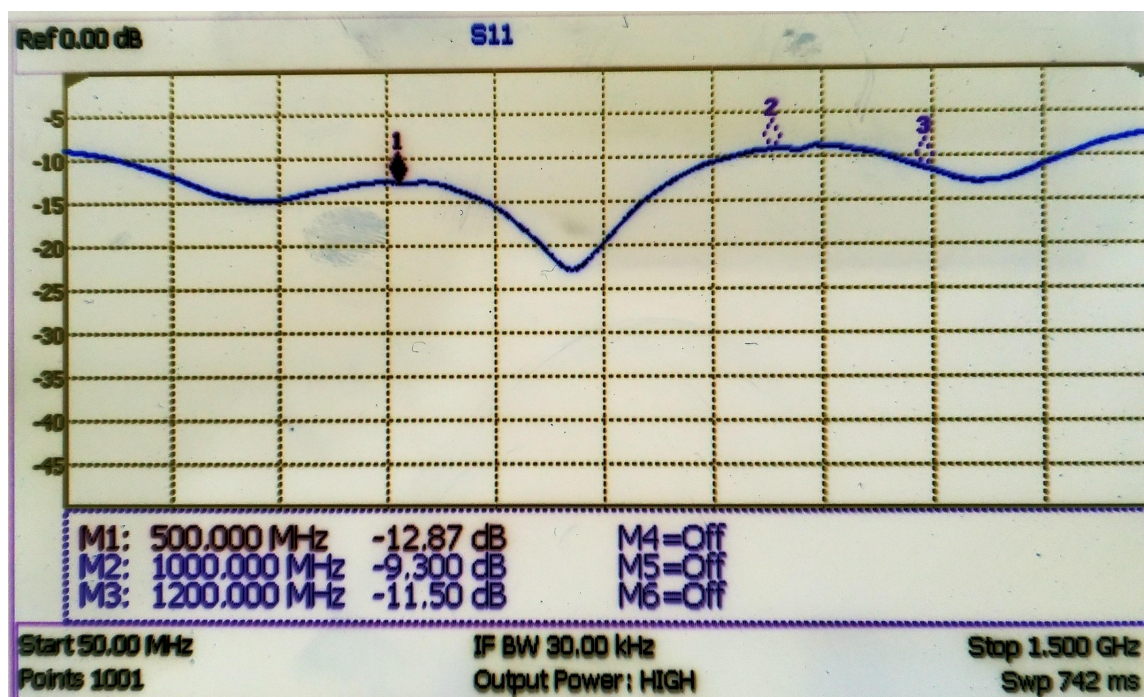


Figura 56 – Medida do parâmetros S_{11} do transformador de Klopfenstein particionado com aplicação de fractal.

A Tabela 20 mostra um resumo das medidas realizadas dos parâmetros S_{11} e S_{21} , com medições realizadas em 500 MHz, 1000 MHz e 1500 MHz em todos os projetos.

Tabela 20 – Valores medidos para 500 MHz, 1000 MHz e 1200 MHz.

Três Estágios	500 MHz	1000 MHz	1200 MHz
S_{11} (dB)	-15,49	-7,70	-18,42
S_{21} (dB)	-1,09	-2,51	-3,72
Klopfenstein	500 MHz	1000 MHz	1200 MHz
S_{11} (dB)	-20,39	-9,13	-9,32
S_{21} (dB)	-1,23	-1,86	-2,22
Particionado	500 MHz	1000 MHz	1200 MHz
S_{11} (dB)	- 12,87	-9,30	-11,50
S_{21} (dB)	-1,15	-1,84	-1,84

Observa-se que embora possa ter apresentado uma perda ligeiramente maior, a técnica de redução de tamanho do transformador de Klopfenstein apresentou um resultado satisfatório, aproximando o seu comportamento ao transformador de Klopfenstein original. Evidenciando o pressuposto visto no capítulo 5 através das simulações no *CST Studio Suite*.

7 CONCLUSÃO

Em síntese, a proposta da aplicação da geometria fractal para reduzir o tamanho do transformador de Klopfenstein mantendo uma resposta a largura de banda de forma próxima, foi viável de acordo com os estudos deste trabalho. No decorrer do mesmo, foram apresentados as simulações de cada transformador de impedância de quarto de onda projetados no *CST Studio Suite* e posteriormente foram construídos e medidos os resultados para três tipos de transformador específico.

A placa utilizada para a construção do projeto possui espessura de 1,6 mm e substrato FR4. Baseado-se nos resultados das simulações obtidos no software CST, confeccionou-se os protótipos dos três transformadores estudados: um transformador de quarto de onda de três estágios, um transformador de Klopfenstein e um transformador de Klopfenstein com a aplicação de teoria de fractais.

É possível perceber que para os três tipos de fator da geometria fractal aplicados, o fator de $\frac{1}{3}$ trouxe um melhor resultado para a análise da largura de banda dos transformadores, em relação aos fatores de $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{7}$.

Pode-se então concluir através das simulações e das medidas dos protótipos que o transformador de Klopfenstein particionado e projetado com a geometria fractal traz um resultado similar ao transformador do tipo Klopfenstein original, com uma redução de praticamente 50% do tamanho, evidenciando a vantagem da aplicação da geometria fractal para este dispositivo.

- Trabalhos Futuros

Uma análise posterior é a aplicação de mais iterações do processo de marcação do transformador de impedância, utilizando o fator de $\frac{1}{3}$ da teoria de fractal, para analisar se terá um aumento maior na largura de banda. Pode-se também aplicar outras formas de analisar a geometria fractal no transformador de impedância, retirando ao invés da partições pares, retirar as partições pares.

Um segundo trabalho futuro é aplicar a geometria fractal em outros modelos de transformador de impedância, e também em outros dispositivos de telecomunicações. E também criar uma forma ótima para aplicar a geometria em dispositivos de rádio frequência.

REFERÊNCIAS

- [1] W. L. Chen, G. M. Wang, Y. N. Qi, and J.G. Liang, "*Fractal-Shaped Stepped-Impedance transformers for wideband application*," *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 49, n. 7, p. 1628-1630, 2007.
- [2] L. S. Demenicis, "*Transformadores de impedância banda larga para dispositivos optoeletrônicos*," Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. pp.34-84. Maio (2004).
- [3] M. Esa, N. N. A. Malik, M. K. H. Ismail, and S.A. Hamzah, "*Performance Investigation of Microstrip Klopfenstein Tapered Line Impedance Transformer using MathCAD Software for Communication System*," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 781. pp 57-60. 2015.
- [4] S. Wang, and Y. Xie, "*Design and Optimization of High-Power UWB Combined Antenna Based on Klopfenstein Impedance Taper*," *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, vol. 65, NO. 12, 6960-6967. December 2017.
- [5] D. M. Pozar, "*Microwave Engineering*," 656f. Wiley; 4^a edição (2021).
- [6] M. Steer, "*Fundamentals of Microwave and RF Design*," 244f. NC State University; 3rd ed. edição(2019).
- [7] CST Studio Suite - Getting Started. Massachusetts Institute of Technology. 2019. Disponível em: <<https://space.mit.edu/RADIO/Documentation/CST%20Studio%20Suite%20-%20Getting%20Started.pdf>> Acesso em: 09/08/2023.
- [8] R. W. Klopfenstein, "*A Transmission Line Taper of Improved Design*," *Proceedings of the ire*, pp. 31-35. 1956.
- [9] A. O. Bah, P. Y Qin, and Y. J. Guo, "*An extremely wideband tapered balun for application in tightly coupled arrays*," in *Proc. IEE-APS Top. Conf. (APWC)*, Sep. pp. 162-165. 2016.
- [10] H. El Kamchouchi, and G. Abouelseoud. "*MAMA: a new methodically designed broadband microstrip antenna using off-the-shelf components*," *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol. 48, Iss. 2, pp. 72-81, (2006).
- [11] T. A. F. Silva "*Introdução à Geometria Fractal*". Produção Científica - Universidade de Cabo Verde. Cabo Verde, 2007.
- [12] R. S. R. Nunes, "*Geometria Fractal e Aplicações*," 78f. Tese (Mestre em Ensino da Matemática) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2006.
- [13] B. B. Mandelbrot, "*The Fractal Geometry of Nature*". W.H. Freeman and Company, New York, 1975.
- [14] C. P. N. Silva, "*Interferômetros Baseados na Geometria Fractal de Hilbert*". Dissertação - Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Recife. 2016.

- [15] R. Ludwig, G. Bogdanov *RF Circuit Design: Theory and Applications*. 704f. Prentice Hall; 2nd ed. edição (1 abril 2008).
- [16] E. E. C. Oliveira, S. G. Silva, A. L. P. S. Campos, P. H. F. Silva, "Miniaturização de Antenas Patch Retangular Utilizando Contornos Fractais de Koch," in *Momag,PA1.23*, 2008.
- [17] G. L. Matthaei, *Short-Step Chebyshev impedance transformers*, *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 14 (1996), 372-383.
- [18] W. L. Chen, G. M. Wang, Y. N. Qi, and et al., "A novel wide stopband PBG structure with fractal features and its application to the design of microstrip low-pass filter," *ISAPE2006*, October 2006, Vol. 1, pp. 292-295.
- [19] Y. F. Shi, T. L. Song, and D. Musicki, "Target tracking in clutter using a high pulse repetition frequency radar," *IET Radar, Sonar Navigat.*, vol. 9, no. 3, pp. 299-307, 2015.
- [20] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [21] A. Norton, "Generation and display of geometric fractals in 3-D." *ACM SIGGRAPH computer graphics* 16.3 (1982): 61-67.
- [22] P. Purkait, and S. Chakravorti. "Impulse fault classification in transformers by fractal analysis." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 10.1 (2003): 109-116.
- [23] B. k. Schmitt, "Análise de estruturas de casamento do tipo transformador de quarto de onda em linhas de transmissão." (2016).
- [24] M. A. Oliveira, et al. "Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita em Antenas Patch Circular para Tecnologia ISM em 2, 4 GHz." Pós-graduação em Engenharia Elétrica Instituto Federal da Paraíba - João Pessoa: Universidade Federal de Campina Grande (2016).

APÊNDICE A – Construção dos Transformadores

Neste apêndice está detalhado as medidas para a construção dos transformadores de impedância. Para todos os transformadores a configuração inicial foi a mesma, a construção do projeto no *CST Studio Suite* utilizou as seguintes configurações iniciais de projeto, como mostrado na Figura 57.

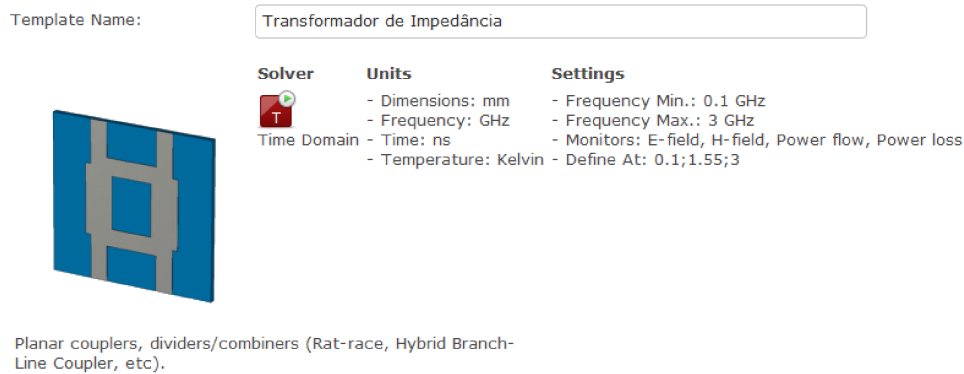


Figura 57 – Setup inicial para o projeto dos transformadores de impedância.

Como se pode observar foi utilizado as seguintes funções para programar a configuração inicial do projeto: Create a new project → MW & RF & Optical → Planar Couplers & Dividers → Time Domain → (E-field; H-field; Power flow; Power loss).

Após ter feito as configurações foi proposto o seguinte setup das frequências $f_{min} = 0,1$ GHz e $f_{máx} = 3$ GHz, utilizando uma acurácia de -50 dB e uma frequência de operação próximo de 1,5 GHz.

Para se fazer as comparações necessárias, foi padronizado a mesma entrada para os quatro tipos de transformador projetados, essa entrada possui impedância de 50 Ohms. Da mesma forma a saída também foi padronizada em 25 Ohms, a Tabela 21 mostra essa medidas.

Tabela 21 – Dimensões da entrada e saída dos transformadores de impedância.

-	Entrada (mm)	Saída (mm)
l	10,000	10,000
w	1,895	5,252

Visto isto, será construído algumas configurações diferentes para o transformador de impedância de quarto de onda.

A.1 Transformador de Impedância de Klopfenstein

O transformador de Klopfentein foi construído utilizando as entrada e saída de 50 e 25 Ohms, respectivamente. Esse transformador possui uma única seção interligando a saída e a entrada através de um sólido formado por uma curva com suavidade baixa de 0,1. A Tabela 22 mostra as medidas para a construção do transformador de Klopfentein.

Tabela 22 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein.

-	Entrada (mm)	Seção Única (mm)	Saída (mm)
l	10,000	192,100	10,000
w	1,895	-	5,252

Deve-se salientar que a partir dos valores mostrados na Tabela acima o transformador de impedância de Klopfentein tem comprimento total de 212,100 milímetros.

A.2 Transformador de Impedância Particionado

O transformador de impedância particionado está relacionado ao transformador de Klopfentein. Ele é um transformador particionado em dez seções, se aproximando do formato curvilíneo do transformador de Klopfentein. A Tabela 23 mostra as medidas para a construção desse transformador.

Tabela 23 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado.

-	Entrada (mm)	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)
l	10,000	12,430	12,430	12,430
w	1,895	2,200	2,504	2,811
-	Seção 4 (mm)	Seção 5 (mm)	Seção 6 (mm)	Seção 7 (mm)
l	12,430	12,430	12,430	12,430
w	3,116	3,421	3,726	4,031
-	Seção 8 (mm)	Seção 9 (mm)	Seção 10 (mm)	Saída (mm)
l	12,430	12,430	12,430	10,000
w	4,336	4,642	4,947	5,252

Deve-se salientar que a partir dos valores mostrados na Tabela acima o transformador de impedância particionado tem comprimento total de 144,300 milímetros.

A.3 Aplicação de Fractal do Fator de 1/3

A partir de agora foi utilizado a teoria de fractal vista do Capítulo 3 em diante, aplicando essa teoria no transformador de impedância de Klopfentein particionado em 10 seções.

O método utilizado de marcação do transformador foi mostrado no Capítulo 5, Na Figura 58 tem-se a imagem ampliada e cotada de uma das seções do transformador de impedância já com o fractal de fator 1/3 aplicado.

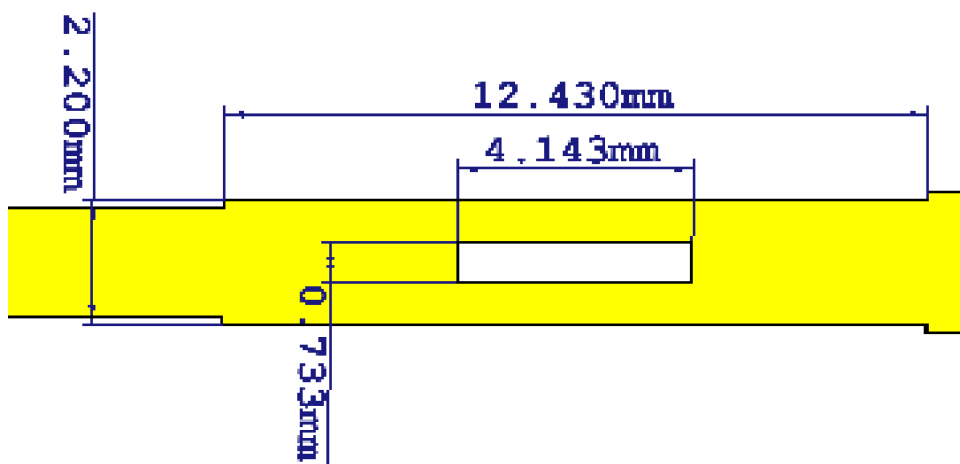


Figura 58 – Cotas de uma seção do transformador de impedância de Klopfenstein com fractal de fator 1/3 aplicado.

Visto esse exemplo de cotação das marcações juntamente com o conhecimento da aplicação de fractais, foi feita a divisão de cada seção por 3. Aplicando-se tanto na vertical, quanto na horizontal, e assim foi marcado o centro das divisões. ou seja dois terços em ambas as direções, como mostrado na Figura 58.

A partir disso, a Tabela 24 vem nos trazendo o valor das divisões para cada uma das seções do transformador de impedância. Os Δl e Δw foram calculados da seguinte forma.

$$\Delta l = \frac{l}{3}$$

$$\Delta w = \frac{w}{3}$$

Tabela 24 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado aplicando fator de $\frac{1}{3}$ da teoria de fractal.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)	Seção 4 (mm)	Seção 5 (mm)
Δl	4,143	4,143	4,143	4,143	4,143
Δw	0,733	0,835	0,937	1,039	1,140
-	Seção 6 (mm)	Seção 7 (mm)	Seção 8 (mm)	Seção 9 (mm)	Seção 10 (mm)
Δl	4,143	4,143	4,143	4,143	4,143
Δw	1,242	1,344	1,445	1,547	1,649

Deve-se salientar que a partir dos valores mostrados na Tabela acima o transformador de impedância particionado com aplicação de $\frac{1}{3}$ do fator de fractal tem comprimento total de 144,300 milímetros.

A.4 Aplicação de Fractal do Fator de 1/5

A partir de agora foi utilizado a teoria de fractal vista do Capítulo 3 em diante, aplicando essa teoria no transformador de impedância de Klopfentein particionado em 10 seções.

O método utilizado de marcação do transformador foi mostrado no Capítulo 5, a Figura 59 apresenta a imagem ampliada e cotada de uma das seções do transformador de impedância já com o fractal de fator 1/5 aplicado.

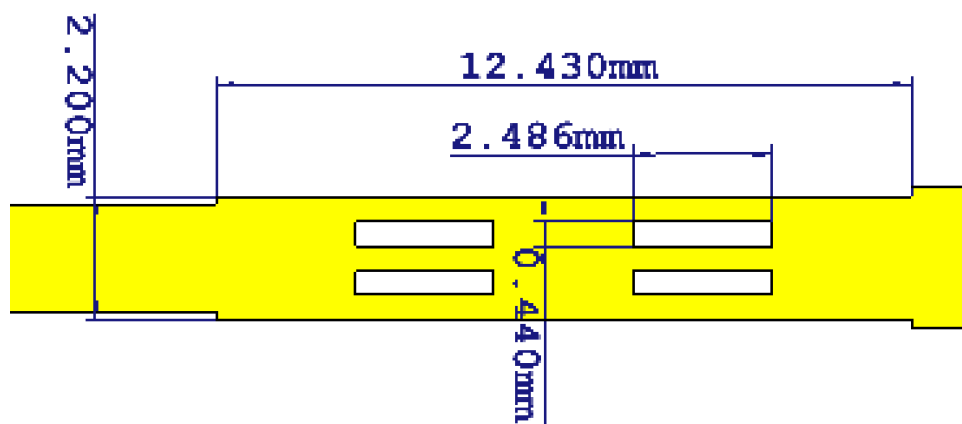


Figura 59 – Cotas de uma seção do transformador de impedância de Klopfentein com fractal de fator 1/5 aplicado.

Visto esse exemplo de cotação das marcações juntamente com o conhecimento da aplicação de fractais, foi feita a divisão de cada seção por 5. Aplicando-se tanto na vertical, quanto na horizontal, e assim foi marcado os centros das divisões. ou seja dois quintos e quatro quintos em ambas as direções, como mostrado na Figura 59.

A partir disso, a Tabela 25 vem nos trazendo o valor das divisões para cada uma das seções do transformador de impedância. Os Δl e Δw foram calculados da seguinte forma.

$$\Delta l = \frac{l}{5}$$

$$\Delta w = \frac{w}{5}$$

Tabela 25 – Dimensões do transformador de impedância de Klopfentein particionado aplicando fator de $\frac{1}{5}$ da teoria de fractal.

-	Seção 1 (mm)	Seção 2 (mm)	Seção 3 (mm)	Seção 4 (mm)	Seção 5 (mm)
Δl	2,486	2,486	2,486	2,486	2,486
Δw	0,440	0,501	0,562	0,623	0,684
-	Seção 6 (mm)	Seção 7 (mm)	Seção 8 (mm)	Seção 9 (mm)	Seção 10 (mm)
Δl	2,486	2,486	2,486	2,486	2,486
Δw	0,745	0,806	0,867	0,928	0,989

Deve-se salientar que a partir dos valores mostrados na Tabela acima o transformador de impedância particionado com aplicação de $\frac{1}{5}$ do fator de fractal tem comprimento total de 144,300 milímetros.