

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BYANCA JAQUELINE SOUSA AMORIM

CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE CONCENTRAÇÃO SALINA EM ÁGUA
UTILIZANDO GEOMETRIA DE ANÉIS FRACTAIS EM MICROFITA EM 2,4 GHZ

CURITIBA

2020

BYANCA JAQUELINE SOUSA AMORIM

CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE CONCENTRAÇÃO SALINA EM ÁGUA
UTILIZANDO GEOMETRIA DE ANÉIS FRACTAIS EM MICROFITA EM 2,4 GHZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Zanella.

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A524c Amorim, Byanca Jaqueline Sousa
Caracterização de sensores de concentração salina em água
utilizando geometria de anéis fractais em microfita em 2,4 GHz
[recurso eletrônico] Byanca Jaqueline Sousa Amorim – Curitiba,
2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora.
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Zanella.

1. Geometria fractal. 2. Geometria anelar. 3. Sensor fractal. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Dartora, César Augusto. III.
Zanella, Fernando. IV. Título.

CDD: 516.15

.Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BYANCA JAQUELINE SOUSA AMORIM** intitulada: **CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE CONCENTRAÇÃO SALINA EM ÁGUA UTILIZANDO GEOMETRIA DE ANÉIS FRACTAIS EM MICROFITA EM 2,4 GHz**, sob orientação do Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO DARTORA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Agosto de 2020.

Assinatura Eletrônica

27/08/2020 21:40:19.0

CÉSAR AUGUSTO DARTORA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/09/2020 16:47:12.0

FILLIPI KLOS RODRIGUES DE CAMPOS

Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO CURITIBA)

Assinatura Eletrônica

27/08/2020 17:03:51.0

ANDRÉ AUGUSTO MARIANO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

"Dedico a Deus, família e amigos"

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre foi e será meu amparo e refúgio, minha família, primeiramente aqueles que estão sempre comigo, meus pais Maria do Carmo Amorim e Sebastiao Amorim, meus irmãos Sebastião, Sandro, Saulo e Rayanne que mesmo distantes torcem, ajudam e confortam.

Agradeço ao meu tio/padrinho Walfredo que acreditou e incentivou sempre e Josué dos Anjos, aquele amigo motivador, que estarão sempre vivos em meu coração.

Também agradeço aos maravilhosos amigos que Deus pôs ao meu lado, estando eles perto ou a mais de 3000 km de distância, Sthefany Santos minha parceira para todas as horas e ansiedades. Ao Diogo Miyazaki e João Perbiche, que ajudaram e ensinaram muito sobre essa nova etapa da minha vida,

Ao meu orientador César Dartora, uma pessoa extraordinária e cheia de ideias magnificas, que sempre ajudou em tudo durante toda a pesquisa. Ao meu coorientador Fernando Zanella, que sempre tirava dúvidas e mostrava como continuar.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior-Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPR.

Aos laboratórios LAMMI, LCE, LITS e GICS, da UFPR e EBAF da UTFPR.

“Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência”

SANTO AGOSTINHO (354 – 430)

RESUMO

Em muitas aplicações, como é o caso das indústrias farmacêuticas e alimentícias, a composição de soluções analíticas deve ser determinada com grande precisão, o que requer o desenvolvimento de sensores adequados. Há diversos métodos disponíveis envolvendo técnicas de medida de condutividade elétrica, refletometria óptica e espectroscopia de massa. A presente dissertação apresenta o estudo e caracterização de sensores de concentração salina em água utilizando estruturas pseudo-fractais em microfita. Sabe-se que as linhas de transmissão em microfita são sensíveis ao meio circundante, enquanto que a geometria fractal tem sido considerada por permitir a otimização da ocupação da superfície disponível para a construção de circuitos ou sensores. A ideia central é construir estruturas fractais em geometria anelar na faixa não licenciada de 2,4 GHz, sensíveis ao meio circundante. A concentração salina é obtida através da medida dos parâmetros de espalhamento (S) da estrutura. Foram concebidas e fabricadas estruturas fractais de ordem 0, 1 e 2, utilizando o substrato dielétrico FR4. Para a obtenção da sensibilidade das estruturas foram preparadas soluções de água saturadas de NaCl com concentrações entre 0% a 90%, e os parâmetros S foram medidos experimentalmente utilizando um *Vector Network Analyzer* (VNA) modelo E5063A da Keysight, que opera desde 100 kHz até 18 GHz, disponível no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LCE) da UFPR. Foi analisado o efeito da concentração salina sobre os parâmetros S_{11} e S_{21} , tanto na frequência quanto na amplitude. Foi possível concluir que a geometria Fractal, bem como os níveis de solução, interfere na resposta do dispositivo, no entanto não foi possível fazer uma aplicação para sensor, na análise em 2,4 GHz.

Palavras-chave: Geometria fractal. Geometria anelar. Parâmetros S. Sensor Fractal.

ABSTRACT

In many applications, such as the pharmaceutical and food industries, the composition of analytical solutions must be determined with great precision, which requires the development of appropriate sensing devices. There are several methods available, involving electrical conductivity measurement, optical reflectometry and mass spectroscopy techniques. This dissertation presents the study and characterization sensors for determining saline concentration in water solutions using pseudo-fractal structures in microstrip. Microstrip transmission lines are known to be sensitive to their surroundings, while fractal geometry has been considered as a good candidate to allow optimization of the surface occupancy available for the construction of circuits or sensors. The central idea is to construct annular geometry fractal structures in the unlicensed 2,4 GHz range, sensitive to the surrounding environment. Saline concentration is obtained by measuring the scattering parameters (S) of the structure. Fractal structures of order 0, 1 and 2 were designed and manufactured using the FR4 dielectric substrate. To obtain the sensitivity of structures, NaCl saturated water solutions were prepared at concentrations between 0% and 90%, and S parameters were experimentally measured using Keysight's Vector Network Analyzer (VNA) model E5063A, which operates from 100 kHz to 18 GHz, available from UFPR's Electromagnetic Compatibility Laboratory (LCE). The effect of saline concentration on parameter S_{11} and S_{21} , both in frequency and amplitude, was analyzed. It was possible to conclude that the Fractal geometry, as well as the solution levels, interferes in the device's response, however it was not possible to make an application for sensor, in the 2,4 GHz analysis.

Keywords: Fractal geometry. Ring geometry. S-Parameters. Fractal Sensor.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – GEOMETRIAS FRACTAIS: (a) CONJUNTO DE CANTOR, (b) CURVA DE PEANO, (c) TRIANGULO DE SIERPINSKI, (d) FLOCO DE NEVE DE KOCH, (e) ESPONJA DE MENGER,(f) CONJUNTO DE JULIA, (g) CONJUNTO DE MANDELBROT	22
FIGURA 2 – CENTRO DE UM GIRASSOL, FRACTAL NATURAL	23
FIGURA 3: GEOMETRIAS PROPOSTAS PARA A CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSA: (a) ORDEM FRACTAL 0, (b) FRACTAL DE ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (c) FRACTAL DE ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (d) FRACTAL DE ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (e) FRACTAL DE ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA.....	25
FIGURA 4 – TIPOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	26
FIGURA 5 – MICROFITA	29
FIGURA 6 – LINHAS DE CAMPO EM UMA LINHA DE <i>MICROSTRIP</i>	29
FIGURA 7 – PLACA DE FR4; (a) UMA SUPERFÍCIE CONDUTORA, (b) DUAS SUPERFÍCIES CONDUTORAS.....	37
FIGURA 8 – PROJETO DAS PLACAS DE CIRCUITO, (a) ORDEM 0, (b) ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (c) ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA, (d) ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (e) ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA.	40
FIGURA 9 – PLACAS, (a) ORDEM 0, (b) ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (c) ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA, (d) ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (e) ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA.....	42
FIGURA 10 – KIT DE CALIBRAÇÃO, (a) MÓDULO DE CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA (ECAL), (b) CABOS COAXIAS, (c) PLACA DE <i>MICROSTRIP</i> COM CONECTORES SMA.....	43
FIGURA 11 – APARATO EXPERIMENTAL, (a) CALIBRAÇÃO, (b) EXPERIMENTAÇÃO.....	44
FIGURA 12 – ESTRUTURA DA SOLUÇÃO AQUOSA DE NaCl	45

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21} ,.....	49
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO, GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21}	50
GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 2, (a) S_{11} , (b) S_{21}	51
GRÁFICO 4 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21}	53
GRÁFICO 5 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21}	53
GRÁFICO 6 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21}	54
GRÁFICO 7 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21}	55
,GRÁFICO 8 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21}	57
GRÁFICO 9 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} , (b) S_{21}	57
GRÁFICO 10 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21}	58
GRÁFICO 11 – PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA NA FREQUÊNCIA DE 2,4 GHz, (a) S_{11} , (b) S_{21} . (a)	59
GRÁFICO 12 – FATOR SENSIBILIDADE, (a) S_{11} , (b) S_{21}	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO FR4	37
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM GEOMETRIA FRACTAL	39
TABELA 3 – SOLUBILIDADE DO NaCl.....	46
TABELA 4 – PROPORÇÕES DE SOLUÇÃO DAS AMOSTRAS	46

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ADS	Advanced Design System
cm	Centímetro
mm	Milímetro
dBm	Decibel miliwatt
DELT	Departamento de Engenharia Elétrica
ECal	Electronic calibration
EFAB	Laboratório de Fabricação Eletrônica
g	Gramma
GHz	Giga hertz
GICS	Group of Integrated Circuits and Systems
H ₂ O Hz	Água
LAMMI	Hertz
LCE	Laboratório de Magnetismo, Medidas e instrumentação
LITS	Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética
LT	Laboratório de Inovação Tecnológica em Sensores
mL	Linha de Transmissão
NaCl	Mililitro
RF	Cloreto de Sódio
SMA	Rádio Frequência
TE	SubMiniature version A
TEM	Modo Elétrico Transversal
TM	Modo Eletromagnético Transversal
UFPR	Modo Magnético Transversal
UTFPR	Universidade Federal do Paraná
VNA	Universidade Tecnológica Federal do Paraná Vector Network Analyzer

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_0	Impedância
Z_1	Impedância da linha condutora 1
Z_2	Impedância da linha condutora 1
L	Indutância
C	Capacitância
C_1	Capacitância de linha condutora
l	Comprimento qualquer
dim	Dimensão Fractal
$N(f)$	Numero de Copias do Objeto
μ	Permeabilidade Magnética
ε	Permissividade elétrica
λ	Comprimento da Onda
θ	Comprimento qualquer
c	Velocidade da luz
f	Frequência
E	Intensidade do Campo Elétrico
H	Intensidade do Campo Magnético
ω	Frequência Angular
w	Espessura da Linha
h	Espessura do Substrato
v_p	Velocidade de frente de onda
v_f	Velocidade de Fase
β	Constante de Propagação
S	Parâmetros de Espalhamento ou S
S_{ij}	Parâmetros S complexos
S_{11}	Parâmetros S função reflexão porta 1
S_{12}	Parâmetros S função reflexão entre portas 2 e 1
S_{21}	Parâmetros S função reflexão entre portas 1 e 2
S_{22}	Parâmetros S função reflexão porta 2
ε_{eff}	Permissividade Efetiva

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	GEOMETRIA FRACTAL.....	20
2.2	LINHA DE TRANSMISSÃO	26
2.3	PARAMETROS DE ESPALHAMENTO OU PARAMETROS S	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	PLACA DE SUBSTRATO FR4	36
3.2	DESIGN DOS SENSORES FRACTAIS.....	38
3.3	ELEMENTOS FÍSICOS	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO	48
4.2	ANÁLISE DAS SOLUÇÕES	54
5.	CONCLUSÃO.....	62
6.	REFERÊNCIAS.....	65
7.	APÊNDICE	69

1. INTRODUÇÃO

Sensores são dispositivos capazes de responder a um determinado tipo de agente físico ou químico, o qual se quer quantificar (TREVISAN, POPPI, 2006). O desenvolvimento de dispositivos sensores é fundamental tanto para as ciências básicas, como a Física e a Química, quanto para as aplicações em Engenharia. Atualmente existe uma miríade de sensores, utilizando princípios diversos e visando uma ampla gama de aplicações. Para ficar nos exemplos mais comuns, os sensores de temperatura, pressão e umidade são elementos essenciais no desenvolvimento de aplicações que vão desde a aeronáutica passando pela climatização de ambientes e indo até a indústria do agronegócio (ORTONEDA-PEDROLA, 2013). Podemos citar ainda o uso de sensores em acelerômetros, medidores de campos elétricos e magnéticos, sensores de gás e fumaça, luz visível ou não visível e sensores de proximidade (MAZZAROPI, 2007).

Os sensores podem ser classificados, de acordo com o princípio básico de funcionamento, em sensores químicos, onde a resposta depende de alguma reação química, ou físicos, em que a resposta depende de estímulos puramente físicos (BANICA, 2012). Os sensores químicos tipicamente degradam-se mais rapidamente e são empregados para determinar a presença ou a concentração de determinado elemento ou composto. Em um sensor químico as moléculas de um determinado elemento reagem quimicamente ou fisicamente com algum componente do sensor, produzindo uma alteração na resposta do sensor, e que normalmente depende da quantidade do reagente específico. Um aspecto desejável é que o sensor tenha resposta reversível e linear (DINCER, *et. al.* 2019).

No contexto da indústria farmacêutica, alimentícia e no controle de poluição ambiental se faz necessária a determinação da composição de soluções analíticas ou da concentração de determinado composto com relativa precisão (KAPILEVICH, LITVAK, 2007). Em particular, tem grande importância a quantificação e controle de impurezas e íons na água (KOROSTYNSKA, *et. al.*, 2012) (JACKSON, JAYANTHY, 2010). Dentre as soluções mais comumente empregadas na indústria de fármacos e alimentos está a solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) (KOROSTYNSKA, *et al.*, 2014).

Diversos tipos de sensores são utilizados para determinar a concentração de um determinado tipo de íon ou impureza em solução aquosa. Os mais comumente

empregados são aqueles baseados no princípio de medição de condutividade, capacitância ou de impedância. Particularmente, a presença de íons na água altera a condutividade iônica do líquido de maneira significativa (LACERDA, *et al*, 2015). Todavia, os métodos de impedância podem não ser muito seletivos, ou seja, permitem determinar quantidade total de íons através da variação de propriedades elétricas sem possibilitar a discriminação dos tipos iônicos presentes. Isso decorre do fato de que a condutividade total é dada pela soma das contribuições dos diversos íons, e estas podem ter pesos similares no resultado final. As vantagens dos sensores baseados em medida de impedância são o baixo custo e o reduzido tamanho, quando comparados às técnicas de laboratório, que incluem espectrometria de massa (ROSEN, 2007), espectroscopia Raman (DURICKOVIC, *et. al.*, 2010) e medidas ópticas em UV-Vis.

As redes de Bragg em fibras ópticas têm sido bastante estudadas como elemento sensor para as mais diversas aplicações (NASCIMENTO, 2018), incluindo a sensibilidade ao meio circundante quando a região da rede é exposta, podendo envolver um aparato sofisticado para a realização de medida do parâmetro de reflexão ou transmissão óptico, além de técnicas mais sofisticadas de fabricação. Por analogia, é possível utilizar os conceitos fundamentais de sensibilidade de uma estrutura de guiamento de ondas a um dado meio externo que se quer sensoriar, trazendo a medição para o espectro de micro-ondas. Nessa faixa, a principal vantagem é que as técnicas de fabricação são mais simples e acessíveis do que aquelas empregadas no uso de fibras ópticas. Atualmente, têm sido estudados elementos sensores em micro-ondas para as mais diversas aplicações (BERNOU, 2000). De especial interesse para o desenvolvimento da presente dissertação, no trabalho de M. Ortoneda-Pedrola *et. al.*(2013) é reportado o desenvolvimento de um sensor de concentração de NaCl utilizando os princípios das micro-ondas para o monitoramento em tempo real. Os autores sugerem aplicações através da medição do parâmetro S_{11} em reservatórios de água e em tubulações para fluídos.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Uma vez que o comprimento de ondas das micro-ondas na faixa de 1 GHz até 10 GHz é pelo menos 4 ordens de grandeza maior que os comprimentos de onda empregados em sistemas ópticos baseados na fibra, naturalmente as dimensões

físicas dos dispositivos fabricados em micro-ondas sofrem um aumento em escala. Faz-se necessária então a busca por miniaturização dos sensores e otimização de ocupação de área disponível. A literatura sugere que o emprego da geometria fractal é capaz de providenciar essas características (ATISTA, 2018.). Não foi encontrado na literatura trabalho associado ao emprego da geometria fractal, como a que está proposta nessa dissertação, almejando a aplicação em sensores de concentração de NaCl em solução aquosa.

O objetivo geral deste trabalho é a fabricação e caracterização de sensores de concentração de NaCl em água na faixa espectral de 2,4 GHz, utilizando uma geometria fractal em uma estrutura de anéis. Como objetivos específicos podem ser listados os seguintes:

- Realizar um estudo da literatura relacionada a sensores em micro-ondas e à geometria fractal;
- Compreender os principais elementos associados à caracterização dos sensores fabricados neste trabalho, como por exemplo os parâmetros S;
- Fabricação dos dispositivos em placa de substrato dielétrico FR4, em geometrias fractais utilizando anéis ressoadores em ordem 0, 1 e 2;
- Calibração do Analisador Vetorial de Redes (VNA – do inglês *Vector Network Analyzer*) empregado na medição dos parâmetros S;
- Caracterização experimental dos parâmetros S dessas estruturas em avaliação do efeito de sensibilidade à concentração de NaCl, variando-se o volume do material a ser analisado, para determinar a quantidade mais adequada;
- Determinação de sensibilidade do sensor em relação à variação de amplitude dos parâmetros S e também deslocamento de frequência.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está apresentado da seguinte maneira: No capítulo 2 os conceitos fundamentais para a compreensão deste trabalho são descritos, incluindo aí os fundamentos da geometria fractal, a descrição das linhas em *microstrip* e a teoria

dos parâmetros de espalhamento (matriz S) de micro-ondas, que serão utilizados na caracterização dos sensores aqui fabricados.

No capítulo 3 os materiais e os métodos experimentais utilizados no presente trabalho serão apresentados em maiores detalhes, incluindo aqui os parâmetros de desenho dos sensores em estrutura fractal utilizando anéis ressoadores.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados experimentais da caracterização dos sensores e discutidos em detalhes, sobretudo relacionando os aspectos de ordem fractal à sensibilidade dos sensores. Finalmente, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões gerais da dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo possui 4 seções principais, a saber: Na Seção 2.1 são apresentadas as bases da geometria fractal. A Seção 2.2 traz a teoria das linhas de transmissão em *microstrip*. Os parâmetros de espalhamento e a matriz S, empregados em micro-ondas para caracterização dos dispositivos, são apresentados e discutidos na Seção 2.3 e na Seção 2.4 aspectos básicos da teoria de sensores são apresentados.

2.1 GEOMETRIA FRACTAL

Estruturas fractais, de maneira coloquial, são caracterizadas pela auto-similaridade, que se traduz pela repetição de um padrão em escalas cada vez menores ou cada vez maiores, embora nem todo fractal seja auto-similar e essa propriedade somente se verifica de forma estatística. A auto-similaridade exata implica a complexidade infinita, em que um determinado padrão se repete em qualquer escala de ampliação de parte do objeto. Todavia, fractais reais são truncados em alguma escala de tamanho, ou seja, existe uma escala em que a propriedade de auto-similaridade não acontece mais.

Por essa razão, um fractal real pode ser denominado um pseudo-fractal e o número de iterações realizadas a partir de uma dada função recursiva utilizada para gerar o pseudo-fractal, determina a ordem do fractal. Tipicamente, uma estrutura fractal produz um maior preenchimento do espaço. Por exemplo, uma curva fractal embutida em um espaço de dimensão 2 apresentará efetivamente uma dimensionalidade maior do que 1, ficando entre 1 e 2, lembrando que uma linha reta tem dimensão topológica 1. Afirma-se então que a dimensão do objeto não é inteira e sim fracionária, ou fractal.

A geometria fractal forneceu novas abordagens para o desenvolvimento de antenas, filtros e outros dispositivos eletrônicos ao longo dos últimos 30 anos. Dentre as possíveis vantagens do uso de fractais estão à obtenção de dispositivos com larguras de bandas maiores em tamanhos menores e melhor ocupação de área de superfície disponível (AHMED, SALIM, ALI, 2018).

O termo *fractal* é derivado da palavra latina *fractus*, do verbo *fragere*, que significa quebrar, cunhado por Benoit Mandelbrot, em 1972 (ASSIS, *et al*, 2008) que reuniu e popularizou uma grande coleção de tais objetos com este tipo de geometria. Através da utilização de algoritmos iterativos e funções recursivas, Mandelbrot mostrou que umas séries de processos físicos básicos, que vão desde a agregação de galáxias até a coalhada do queijo, podem ser descritos através de um fractal (SILVA, *et .al.* 2008).

Os fractais podem ser empregados para descrever as superfícies irregulares da crosta terrestre, as linhas costeiras, e em áreas da biologia, para descrever as formas de plantas e estruturas biológicas (MEDEIROS, 2013). Considerando-se as características de auto-similaridade, complexidade infinita e dimensão fracionária, os mais conhecidos fractais, ilustrados na FIGURA 1, são o floco de neve de Koch, o conjunto de Cantor, o triângulo de Sierpinski, a curva de Peano, a esponja de Menger, o conjunto de Julia e o conjunto de Mandelbrot. Esses dois últimos exemplos são obtidos através de funções recursivas no plano complexo.

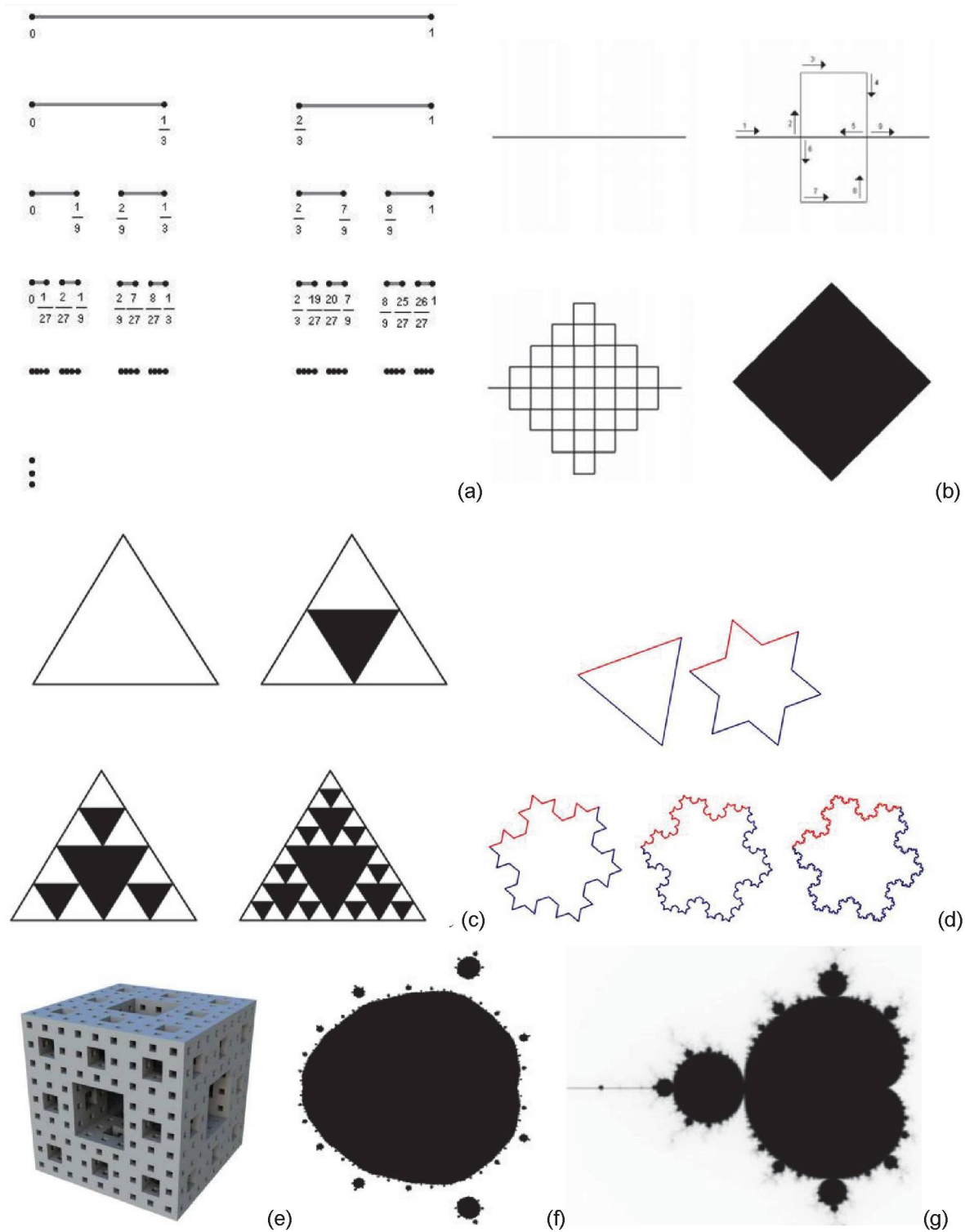
Quanto à auto-similaridade, pode-se classificar os fractais em três grandes grupos: i) exatamente auto-similares, ii) aproximadamente auto-similares e iii) estatisticamente auto-similares.

A auto-similaridade exata mostra a descrição de elementos perfeitos, gerados matematicamente por meio de algoritmos e os fractais obtidos dessa maneira são exclusivamente teóricos ou matemáticos, não sendo observados na natureza. Exemplos desse caso são observados em (a) até (d) na FIGURA 1.

A similaridade aproximada é observada quando uma parte possui muitas semelhanças com o todo, mas não são exatamente iguais, como visto nos casos (e) até (f) da FIGURA 1.

A auto-similaridade estatística se manifesta em fractais com comportamentos distintos e aleatórios (PODHOSTNIK, 2012), na maioria dos casos encontrados na natureza, como podemos ver no centro de uma flor de girassol, mostrado na FIGURA 2.

FIGURA 1 – GEOMETRIAS FRACTAIS: (a) CONJUNTO DE CANTOR, (b) CURVA DE PEANO, (c) TRIANGULO DE SIERPINSKI, (d) FLOCO DE NEVE DE KOCH, (e) ESPONJA DE Menger, (f) CONJUNTO DE JULIA, (g) CONJUNTO DE MANDELBROT



FONTE: (a), (b), (c), (d) e (e) NUNES (2006), (f) e (g) VUČKOVIĆ, et al (2018)

FIGURA 2 – CENTRO DE UM GIRASSOL, FRACTAL NATURAL



FONTE: OORT (2019)

Outra característica intrínseca ao estudo das estruturas fractais se dá pelo uso de uma dimensão fracionária. De acordo com Backes e Bruno (2005), a dimensão fractal é uma medida do nível de irregularidade do objeto. Para determinar a dimensão fractal de um objeto F utiliza-se a definição de dimensão de Hausdorff-Besicovitch, dada como sendo:

$$d_H(F) = \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta}, \quad (1)$$

onde $d_H(F)$ é a dimensão fractal, N_δ é o número de cópias idênticas de F ou auto-similares a todo o objeto F , e δ é o fator de redução que precisa ser aplicado a todo objeto F para que este seja reescalonado ao tamanho de uma das partes. Fazendo uso da equação (1), define-se que um objeto é fractal se a sua dimensão de Hausdorff-Besicovitch é maior do que a dimensão topológica (número de coordenadas do espaço) em que o objeto está inserido.

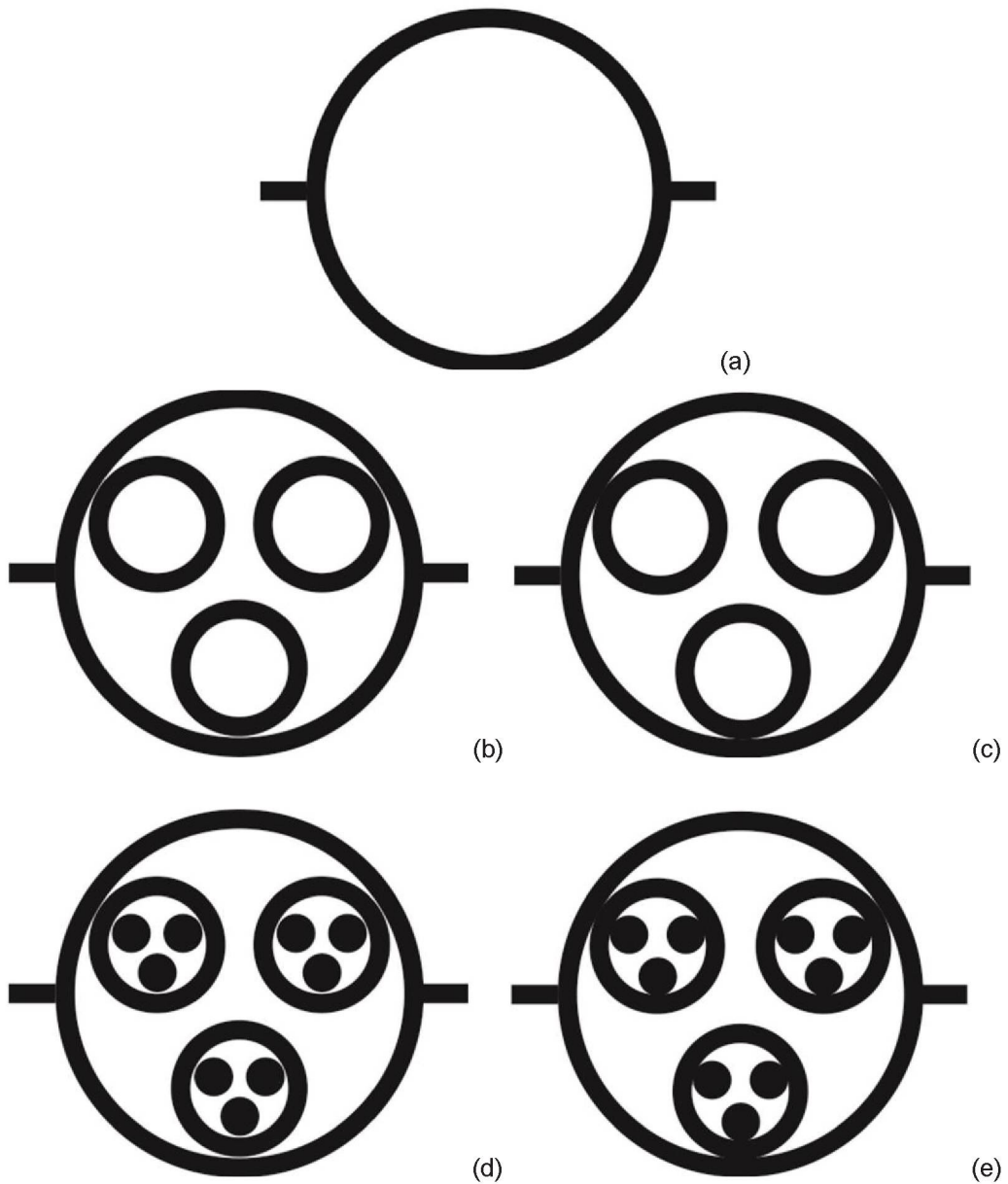
Para fins de compreensão geral, considerando um quadrado de lado x , cuja área é dada por $A(x) = x^2$. Intuitivamente sabemos que a dimensão topológica associada a um quadrado é exatamente 2. É também um fato que o quadrado de lado x pode ser fracionado em 4 quadrados menores de lado $x/2$. Sendo assim temos $N_\delta = 4$ cópias do quadrado maior, e o fator de redução do lado do quadrado maior para que este encaixe perfeitamente no menor é $\delta = 1/2$.

Assim, utilizando a equação (1), temos $d_H(F) = -\log 4 / \log \left(\frac{1}{2}\right) = 2$, ou seja, a dimensão de Hausdorff-Besicovitch de um quadrado é exatamente 2. Como essa dimensão é exatamente igual ao número de coordenadas necessárias para representar o quadrado, denominado de dimensão topológica do espaço, podemos afirmar que um quadrado não é um fractal. O mesmo não pode ser dito da curva de Koch ou do triângulo de Sierpinski, por exemplo, onde a dimensão de Hausdorff-Besicovitch excede a dimensão topológica e produz um número não inteiro.

No âmbito desta pesquisa, optou-se pela utilização de estrutura pseudo-fractal, truncada até a ordem 2, por restrições experimentais de construção, já que na prática as trilhas condutoras necessárias para a confecção das estruturas repetidas não pode ser feita infinitesimalmente pequena, como no caso de um fractal matemático ideal. Para a obtenção da geometria aqui utilizada partiu-se de um anel ressoador na iteração de ordem 0. Na iteração de ordem 1, foram inseridos no interior do anel maior três outros anéis idênticos, reduzidos por um fator de escala. Na iteração de ordem 2, outros três anéis ressoadores reescalados foram inseridos dentro daqueles 3 anéis obtidos na iteração de ordem 1. Note que já na segunda ordem, a largura da linha de transmissão utilizada não permite a existência de um anel, fechando-se em um círculo.

A Figura 3 ilustra o processo, com uma diferença essencial entre as configurações (b), (d) e (c), (e). Enquanto em (b) e (d) os anéis internos não são conectados eletricamente aos externos, nas geometrias (c) e (e) há conexão elétrica. Na construção dos protótipos em placas de substrato FR4 todas as configurações tiveram as mesmas dimensões, a fim de observar o efeito da ordem do fractal tão somente sobre o comportamento da estrutura como sensor.

FIGURA 3: GEOMETRIAS PROPOSTAS PARA A CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSA: (a) ORDEM FRACTAL 0, (b) FRACTAL DE ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (c) FRACTAL DE ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (d) FRACTAL DE ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA, (e) FRACTAL DE ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA CONDUTORA.

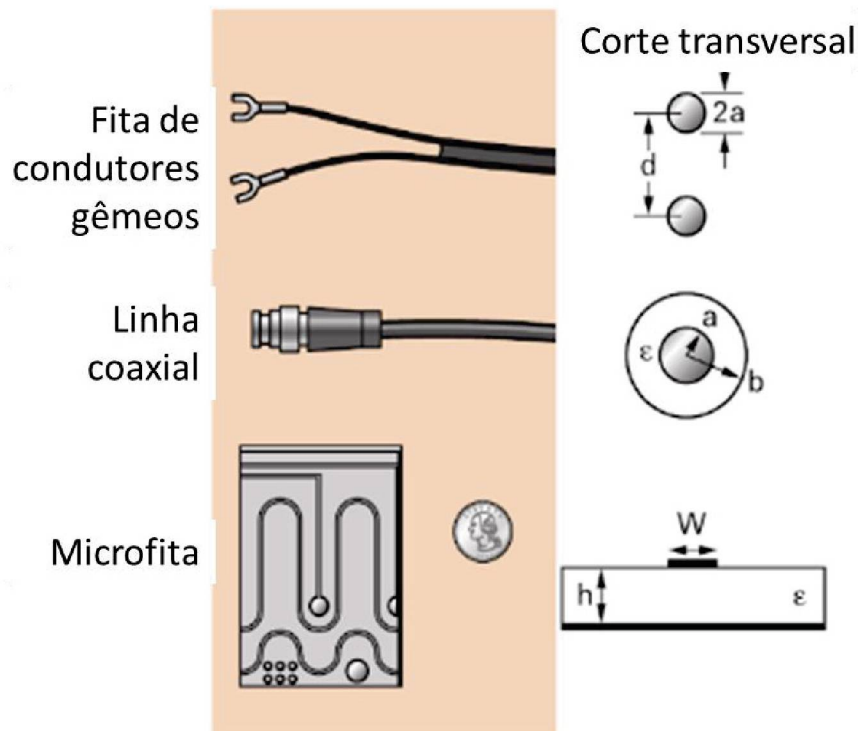


FONTE: AUTOR (2020)

2.2 LINHA DE TRANSMISSÃO

Linhas de transmissão (LT) são estruturas especiais utilizadas no guiamento de ondas eletromagnéticas, compostas de (pelo menos) duas superfícies condutoras mantidas a uma certa diferença de potencial, separadas por materiais dielétricos com boas propriedades isolantes. Essas estruturas são capazes de suportar a propagação dos modos transversais eletromagnéticos (modos TEM), cuja característica essencial é que não apresentam frequência de corte, fazendo com que ondas de qualquer frequência $f \geq 0$ sejam propagantes nas linhas. São amplamente usadas em projetos de circuitos de alta frequência, onde as informações estão embutidas nas ondas eletromagnéticas que por elas se propagam. As linhas de transmissão mais conhecidas são os cabos coaxiais, a linha de par de condutores filamentosos paralelos, o condutor cilíndrico sobre um plano condutor e as linhas de transmissão em *microstrip* ou microfita.

FIGURA 4 – TIPOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



FONTE: WENTWORTH (2009)

Embora todo problema eletromagnético seja resolvido através das equações de Maxwell, é possível no caso das linhas de transmissão omitir aspectos vetoriais inerentes aos campos eletromagnéticos. Nesse caso, a descrição matemática dos modos TEM nas linhas de transmissão se dá através de um conjunto acoplado de equações conhecidas como equações do telegrafista, (SADIKU, 2004), mostradas abaixo para o caso de uma linha ideal sem perdas:

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = -L \frac{\partial I(z, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -C \frac{\partial V(z, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

onde $V(z, t)$ e $I(z, t)$ são denominadas de onda de tensão e de corrente na linha de transmissão, respectivamente, e estão relacionadas diretamente ao campo elétrico e ao campo magnético da onda eletromagnética na linha de transmissão, z é o eixo de propagação da onda, tipicamente denominado de eixo longitudinal, t é o tempo, L e C são a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da linha, medidas em H/m e F/m no SI, respectivamente. Essas quantidades dependem essencialmente de aspectos geométricos de construção da linha, bem como da permissividade dielétrica ϵ , da permeabilidade magnética μ e da condutividade elétrica σ dos meios utilizados na fabricação. As soluções harmônicas ou senoidais das equações do telegrafista na frequência angular ω [rad/s] são dadas a seguir:

$$V(z, t) = a e^{i(\omega t - \beta z)} + b e^{i(\omega t + \beta z)}, \quad (4)$$

$$I(z, t) = \frac{1}{Z_0} [a e^{i(\omega t - \beta z)} - b e^{i(\omega t + \beta z)}], \quad (5)$$

onde a e b são os números complexos associados às amplitudes onda propagante (ou incidente) e contra-propagante (ou refletida) ao longo do eixo z na linha de transmissão. A impedância característica da linha, medida em Ohms, é dada pela seguinte expressão:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6)$$

onde L e C , são, respectivamente, a indutância e a capacitância por metro da linha. A constante de fase β [rad/m] é expressa da seguinte maneira:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{\omega}{v}, \quad (7)$$

sendo λ_g o comprimento de onda associado à frequência angular $\omega = 2\pi f$ na linha de transmissão e $v = 1/\sqrt{LC}$ [m/s] a velocidade de propagação dessas ondas na linha de transmissão. O índice de refração efetivo da linha de transmissão depende da geometria e dos materiais com os quais a linha é feita, sendo definido da seguinte forma:

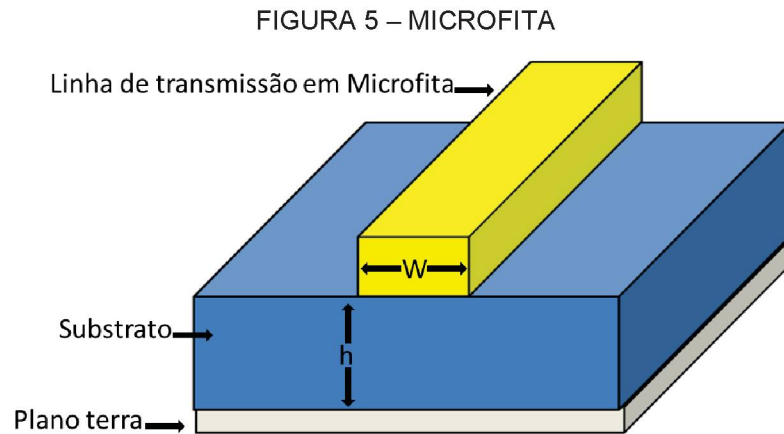
$$n_{ef} = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_{ef}} \geq 1, \quad (8)$$

onde $c = 2,9979 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo. Na expressão (8) admite-se que a permeabilidade magnética dos meios empregados é igual à do vácuo, de forma que a permeabilidade relativa possa ser aproximada por $\mu_r = 1$. Geralmente, esta é uma excelente aproximação. Neste caso o índice de refração efetivo da linha é função direta da permissividade dielétrica relativa efetiva ϵ_{ef} da estrutura.

Em particular, são de interesse no presente trabalho as linhas de transmissão em microstrip ou microfita, pelas suas características de robustez mecânica, são compactas e leves, e permitem a fabricação de circuitos nas mais variadas configurações e geometrias utilizando técnicas experimentais relativamente simples e de baixo custo, o que as torna especialmente interessantes no desenvolvimento dos sensores propostos na presente dissertação. Por esse motivo, as características principais dessas linhas, serão descritas de forma sucinta no que segue.

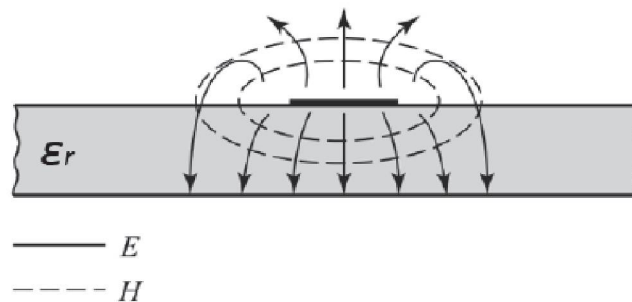
As linhas de transmissão em microfita são linhas planares com largura da linha condutora w e espessura do substrato dielétrico h , possuindo uma estrutura

conforme ilustrado na FIGURA 5. Geralmente, o substrato dielétrico é uma resina à base de SiO_2 ou ainda o teflon.



FONTE: CESAR (2015, ADAPTADA)

FIGURA 6 – LINHAS DE CAMPO EM UMA LINHA DE MICROSTRIP



FONTE: CASTRO, (2017).

A partir do esquemático apresentado na FIGURA 6, é possível perceber que as linhas do campo elétrico (e também do campo magnético) da onda que se propaga ao longo da linha não estão totalmente confinadas na região do substrato dielétrico ϵ_r , vazando para a região acima, tipicamente o ar. Devido à diferença de permissividade dielétrica dos meios, a velocidade de fase das ondas é maior no ar do que na região do substrato dielétrico (AYQUIPA, 2017).

A solução correta do problema passa pela solução das equações de Maxwell envolvendo condições de contorno das componentes do campo eletromagnético, mas o requerimento de casamento de fase das ondas que se propagam no interior do substrato e no ar, exatamente na interface entre esses meios, faz surgir uma componente de campo longitudinal, eliminando a possibilidade de uma solução

exatamente TEM e produzindo ainda um índice de refração efetivo $1 < n_{ef} < \sqrt{\epsilon_r}$, sendo ϵ_r a permissividade dielétrica do substrato. A análise detalhada via equações de Maxwell vai além do escopo do presente trabalho, mas está demonstrado que as linhas de microstrip suportam ondas híbridas TM-TE, que podem ser muito bem aproximadas negligenciando as componentes longitudinais, o que define um modo denominado quase-TEM (CASTRO, 2017).

Em uma microstrip a propagação de ondas passa a ser descrita então pela permissividade dielétrica efetiva ϵ_{ef} e pela impedância característica Z_0 , que são funções essencialmente da razão w/h , bem como dos valores de permissividade dielétrica dos meios dielétricos, podendo ser aproximadas pelas seguintes fórmulas (POZAR, 2011):

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 h/w}} \quad (9)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), & \text{se } \frac{w}{h} > 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}} \left(\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{d} + 1,444 \right) \right)}, & \text{se } \frac{w}{d} > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Se o meio circundante não é o ar e sim outro dielétrico, os termos $\epsilon_r + 1$ e $\epsilon_r - 1$ nas equações acima passam a ser substituídos por $\epsilon_1 + \epsilon_2$ e $\epsilon_1 - \epsilon_2$, sendo $\epsilon_1 > \epsilon_2$. Isso sugere que se no lugar do ar outro meio estiver presente as características de propagação, como a velocidade de propagação da onda e o índice de refração efetivo serão dependentes da relação entre a permissividade dielétrica desse meio e o do substrato.

Esse fato intuitivamente leva a propor o uso dessas estruturas em sensoriamento. Normalmente, a camada dielétrica a ser variada acima do substrato dielétrico que permanece inalterada tem espessura e geometria variável, o que faz com que as expressões matemáticas acima percam a sua utilidade, e a determinação de sensibilidade do elemento sensor deva ser realizada experimentalmente. De outro ponto de vista, é possível ainda, em estruturas que envolvam geometrias mais complicadas, o uso de ferramentas computacionais.

Considerando-se um trecho de microfita como elemento sensor, cuja sensibilidade se dá em relação às propriedades do meio depositado sobre o substrato dielétrico, pode-se observar que a fase da onda, medida em radianos, associada ao atraso de propagação $\Delta t = \frac{l}{v} = \theta/\omega$ para uma distância propagada l , será dada por:

$$\theta = \beta l = \frac{2\pi f l}{c} \sqrt{\epsilon_{ef}}. \quad (11)$$

Desse modo, a fase é sensível às variações nas propriedades dielétricas e de condutividade do meio depositado sobre o substrato dielétrico. Essas propriedades, principalmente no caso de um meio líquido, podem ser alteradas pela concentração de poluentes ou íons.

2.3 PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO OU PARAMETROS S

Para a análise de propagação de ondas em dispositivos e sistemas de RF, as variáveis mais amplamente empregadas são os chamados parâmetros de espalhamento, ou simplesmente parâmetros S (do inglês, *scattering*) (POZAR, 2011), e serão utilizados para a caracterização dos sensores aqui fabricados.

Em um sistema de RF genérico de N portas (lugar de entrada e saída da onda eletromagnética) obedecendo ao princípio de linearidade e superposição, as tensões e correntes em cada porta devem ser expressas pela soma de duas ondas, sendo uma onda propagante e uma onda contra-propagante no trecho de linha referente àquela porta. Fisicamente, ao incidir uma onda eletromagnética em uma das portas, esta será transferida parcialmente para as demais e parcialmente refletida naquela porta, produzindo assim a superposição (ESTEVÃO e JUNIOR, 2014). Tem-se então na porta n-ésima:

$$V_n = (a_n + b_n) e^{i\omega t}, \quad (12)$$

$$I_n = \frac{1}{Z_n} (a_n - b_n) e^{i\omega t}, \quad (13)$$

onde a_n e b_n são amplitudes complexas representando a onda incidente sobre a porta n e aquela que emerge (por ter sido refletida naquela mesma porta, ou transmitida de outra porta para aquela) e Z_n é a impedância característica associada.

Na teoria de micro-ondas é útil tratar as amplitudes a_n das ondas incidentes em cada porta como estímulos e as amplitudes das ondas emergentes (ou contra-propagantes) b_n de cada porta como as respostas ou saídas do sistema. A matriz de espalhamento de um sistema de N portas é constituída de N^2 números complexos conhecidos como parâmetros S , que relacionam as amplitudes das ondas propagantes nas portas (estímulos) do sistema e as ondas contra-propagantes (respostas), através do seguinte sistema de equações:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_j \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_j \\ \cdot \\ \cdot \\ a_N \end{pmatrix}, \quad (18)$$

onde S_{ij} é o parâmetro de espalhamento que conecta a saída na porta i -ésima ao estímulo aplicado na porta j -ésima, considerando-se que todos os estímulos nas portas $k \neq j$ estão desligados. A matriz S ou matriz de espalhamento está definida na forma abaixo:

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Sendo os elementos calculados através da expressão

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a_{k \neq j} = 0}, \quad (20)$$

ou seja, para medir o parâmetro S_{ij} é necessário estimular a porta j -ésima com uma onda incidente àquela porta de amplitude a_j e medir a amplitude do sinal de saída b_i na porta i -ésima, garantindo não haja estímulo em nenhuma das outras portas, ou seja, para toda porta $k \neq j$ é necessário que $a_{k \neq j} = 0$. Isso somente pode ser obtido eliminando possíveis reflexões em todas as portas k que terão uma onda de amplitude b_k produzida pelo estímulo na j -ésima porta, o que é feito casando-se as impedâncias de todas as portas $k \neq j$ do sistema.

Fisicamente, os parâmetros S medem a magnitude e a fase das reflexões e dos espalhamentos das ondas eletromagnéticas em dado sistema. O elemento S_{jj} da diagonal da matriz S mede a amplitudes relativa da onda refletida na porta j com o estímulo aplicado a essa mesma porta, e por isso é conhecido como coeficiente de reflexão da porta j -ésima, enquanto que o parâmetro S_{ij} é o parâmetro ou coeficiente de transmissão da porta j -ésima para a porta i -ésima

Tendo em vista que os parâmetros S são números complexos associados às amplitudes de campos eletromagnéticos, em módulo e fase, é importante relacionar estes à potência transportada pelas ondas e nesse caso adota-se o valor do módulo ao quadrado, ou seja, $|S_{ij}|^2$. Esse valor é apresentado tipicamente na escala logarítmica em decibel (dB), fazendo-se $|S_{ij}|_{dB} = 20 \log_{10} |S_{ij}|$.

Neste trabalho será estudado um dispositivo com 2 portas, resultando em uma matriz de espalhamento quadrada 2 por 2, ou seja, com quatro elementos complexos,

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Na equação (21) S_{11} e S_{22} indicam os coeficientes de reflexão das respectivas portas, enquanto S_{12} e S_{21} descrevem o coeficiente de transmissão da porta 2 para 1, e porta 1 para 2, respectivamente.

2.4 NOÇÕES GERAIS DE SENSORES

Sensor é um elemento de sistemas capaz de responder à presença de algum estímulo químico ou físico, como um determinado tipo de elemento ou molécula, temperatura ou pressão, produzindo na saída uma resposta capaz de ser medida. Um sensor pode ser usado apenas como qualificador, indicando presença ou ausência de determinado agente, ou de forma mais útil, podendo ser capaz de produzir uma resposta quantificada. Do ponto de vista de sistema. Considerando um impulso $E(\omega)$ no domínio da frequência ω , relacionados em regime linear por uma função resposta $G(\omega, x)$ através da equação:

$$R(\omega, x) = G(\omega, x)E(\omega). \quad (22)$$

Note que a função resposta assume uma dependência com um parâmetro adicional x , que pode ser a temperatura, a pressão ou a concentração de íons em um líquido, ou seja, o objeto de interesse da medição do sensor.

Considerando-se o parâmetro x , podemos definir a sensibilidade absoluta desse sensor na forma:

$$s(\omega, x) = \frac{\partial R(\omega, x)}{\partial x} = \frac{\partial G(\omega, x)}{\partial x} E(\omega). \quad (23)$$

Em regime linear é possível determinar a variação de um determinado agente, medindo-se a variação da resposta do sistema:

$$\Delta R(\omega, x) = s(\omega, x) \Delta x. \quad (24)$$

É possível que um em um sistema concorram múltiplos agentes para afetar a resposta, como por exemplo, concentração iônica e temperatura, e nesse caso pode ocorrer a chamada sensibilidade cruzada, sendo a resposta em regime linear dada pelas sensibilidades às múltiplas variáveis:

$$\Delta R(\omega, x) = s_x(\omega, x, y, \dots) \Delta x + s_y(\omega, x, y, \dots) \Delta y + \dots \quad (25)$$

Um sensor seletivo seria aquele que responde a um único ou a um conjunto pré-determinado de estímulos, enquanto que um sensor que responde a qualquer estímulo sem conseguir discriminar é dito não seletivo ou pouco seletivo.

Problemas associados à resposta do sensor ainda envolvem o erro de medida, que está relacionado à diferença entre a resposta obtida e o valor verdadeiro do parâmetro que se quer medir, ao ruído presente, que define a margem mínima de detecção, e às não-linearidades, que tipicamente produzem efeitos de memória e histerese, ocasionando a não reprodutibilidade do valor medido quando se reverte a ação do estímulo presente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

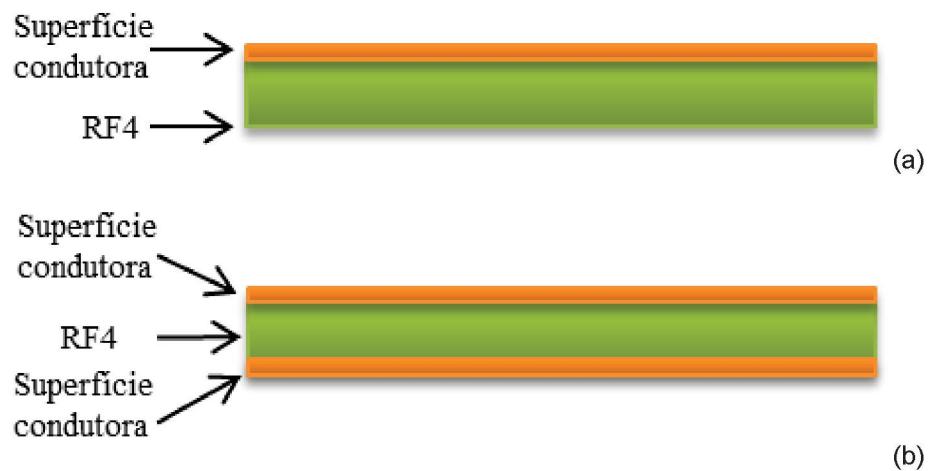
No presente capítulo serão descritos os materiais e métodos usados na construção e caracterização das geometrias pseudo-fractais, que incluem uma apresentação dos parâmetros físicos do substrato FR4, design dos sensores fractais, visando em verificações de concentrações salinas, caracterização e medidas dos parâmetros de espalhamento (S). Este trabalho desenvolvido no âmbito do DELT (Departamento de Engenharia Elétrica), na UFPR (Universidade Federal do Paraná), onde está situado o Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI) e Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LCE), com parceria do Laboratório de Inovação Tecnológica em Sensores (LITS), situado no Departamento de Física da UFPR e Laboratorio de Fabricação Eletrônica (EFAB) do Departamento de Engenharia Elétrica/Eletrônica da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), propiciaram o desenvolvimento da pesquisa, modelagem e simulação do dispositivo.

3.1 PLACA DE SUBSTRATO FR4

O FR4 é o substrato mais utilizados nas confecções de circuitos impressos, pois possui um baixo custo, mantendo sua permissividade dielétrica constante numa ampla faixa de frequência (DJORDJEVIĆ *et al.*, 2001).

A FIGURA 7 ilustra uma placa de substrato em fibra de vidro (FR4), composto por finas camadas condutoras de cobre que podem ser em: (a) monocamada; (b) dupla camada, podendo haver placas de circuitos com n camadas condutoras e/ou dielétricos. Sendo que a superfície condutora, tal como o dielétrico, podem variar conforme a necessidade do estudo a ser descrito, como a utilização de outros placas com diferentes substratos (fenolite, duroid, poliéster ou kapton, no entanto eles possuem grandes perdas quando impostos a altas frequências) e ou outros condutores metálicos.

FIGURA 7 – PLACA DE FR4; (a) UMA SUPERFÍCIE CONDUTORA, (b) DUAS SUPERFÍCIES CONDUTORAS.



FONTE: AUTOR (2020)

Por esta razão, dentre as possibilidades de baixo custo, a placa com substrato em Fibra de Vidro, claramente fornece propriedades capazes de suportar altas frequências de operação definidas para este trabalho. Ressalta-se ainda que será usado a placa com dupla face, pois permite garantir a equipotencialização dos instrumentos de medida com as placas construídas

TABELA 1 – PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO FR4

Substrato	Características	Mínimo	Nominal	Máximo
FR4	ϵ_r	4,2	4,3	4,7
	$\tan \delta$	$1,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$

FONTE: MORAES (2013, ADAPTADO).

Assim sendo, como pode ser visto na TABELA 1, a placa com substrato em Fibra de Vidro, nos fornece propriedades capazes de suportar altas frequências e continuar sendo de fácil manuseio. Substrato que supre as necessidades para a elaboração do dispositivo aqui estudado, quando composto de filmes de cobre em ambas as faces e assim fornecendo subsídios para a inserção da geometria que moldará a linha de transmissão em um de seus lados, e, conseqüentemente, o outro será tido como plano de terra.

Para a elaboração desse trabalho, foi utilizado como procedimento técnico a pesquisa bibliográfica e experimental (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009). Que fala dos tipos de pesquisa executada, bibliográfica, uma vez que, foram feitas pesquisas na literatura corrente sobre os temas aqui abordado, e experimental por trata-se de execução de procedimentos manuais.

3.2 DESIGN DOS SENSORES FRACTAIS

Projetar uma placa de circuito usando geometria fractal permite alocar um comprimento de onda maior num espaço menor, otimizando aplicações em baixas e altas frequências (SANTOS, NETO e SILVA; 2007). Desta forma, como o comprimento da microfita está relacionado com o comprimento de onda, conclui-se que a impedância característica sofrerá alterações, mudando também a resposta em frequência do dispositivo. Todavia, para reduzir o grau de liberdade inerente à todos os comprimentos de onda existentes, optou-se pelo uso da simetria circular. Neste caso, o comprimento de onda pode ser estendido ou reduzido através de círculos concêntricos em curto-circuito, ou aberto, conforme ilustra a FIGURA 8.

A projeção da placa foi efetuada decorrendo do estudo na frequência de 2,4 GHz, Frequência não patenteada. Para o cálculo da linha por meio das características da placa como dimensões de substrato, superfície condutora, permissividade, com precisão foi utilizado o programa ADS. Definindo as características da placa, pode-se observar que o dimensionamento da linha e ainda identificar o ϵ_r , que possibilitará calcular o comprimento de onda (λ).

Obedecendo a frequência estudada e as características físicas da placa em FR4, as geometrias possuem diferentes Z_0 , pois, devido as ramificações da estrutura fractal, não foi possível manter a Z constante, desta forma as estruturas efetuadas possuem espessura de linha de $w_1 = 1$ mm e $w_2 = 3$ mm, tendo em vista que ao variar a espessura da linha, modificamos a permissividade relativa, e conseqüentemente o sinal inserido apresentará diferentes características de propagação, como podemos observar na TABELA 2:

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM GEOMETRIA FRACTAL

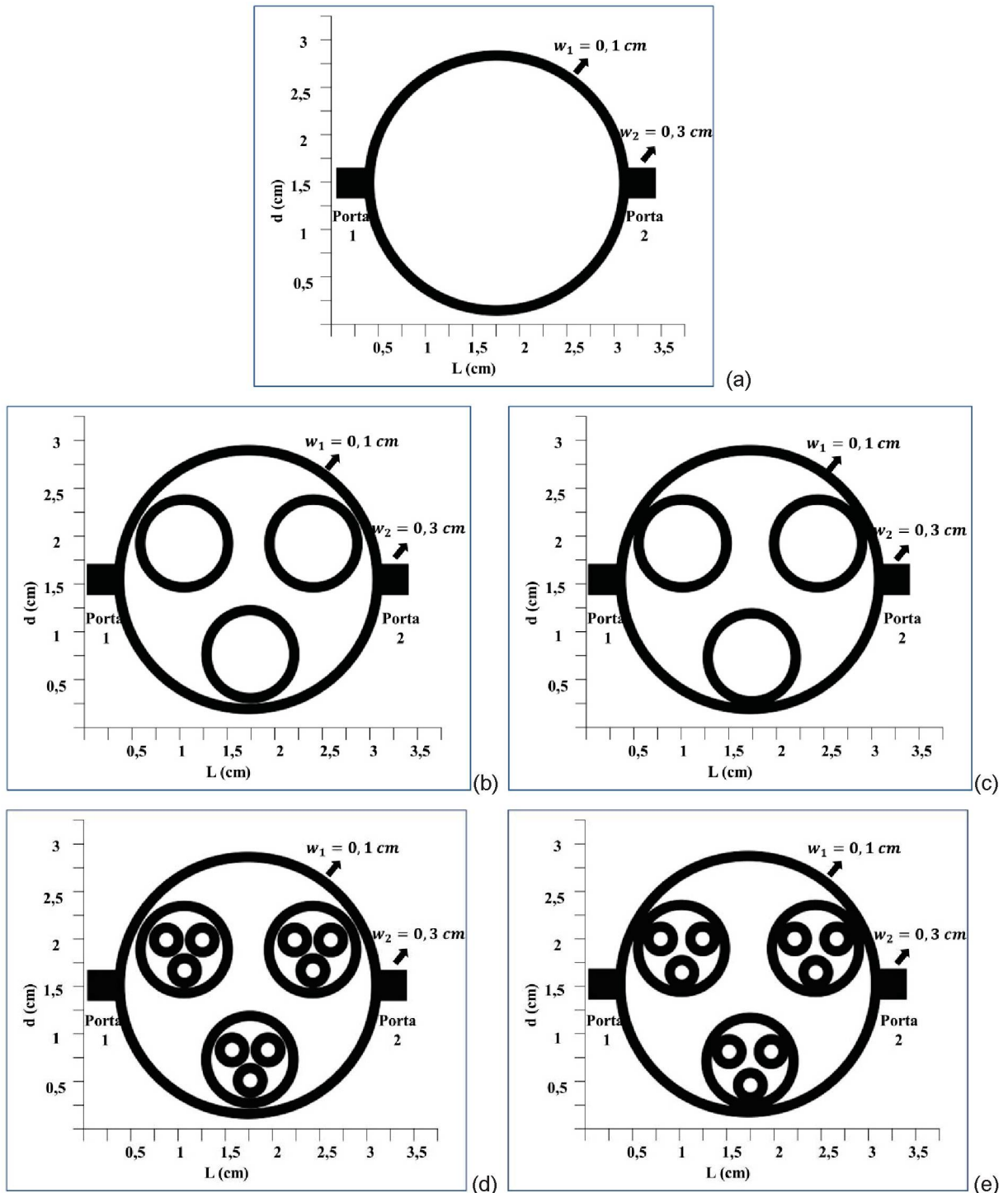
Espessura	ϵ_r (F/m)	Z (Ω)	λ (m)	V_p (m/s)
1	3,29	50	0,6879	1,6510
2	3,01	87	0,7270	1,7270

FONTE: AUTOR (2020).

A TABELA 2, mostra dados nas colunas 2 e 3 de Permissividade e Impedância respectivamente, extraídos do ADS, no entanto para as colunas 4 e 5 foram utilizadas as equações (7) e (8) situadas no capítulo 2 deste trabalho.

Desta forma, o dimensionamento da geometria fractal anelar decorre de uma estrutura com raio de 1,25 cm, possuindo um diâmetro de 2,5 cm, capaz de comportar um terço do comprimento de onda, equivalente a 0,23 cm, os 0,02 cm restantes são utilizados para a ligação da estrutura nas portas de entrada e saída do dispositivo. A geometria fractal para as três ramificações foram desenvolvidas e podem ser observadas na FIGURA 8:

FIGURA 8 – PROJETO DAS PLACAS DE CIRCUITO, (a) ORDEM 0, (b) ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (c) ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA, (d) ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (e) ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA.



FONTE: AUTOR (2020)

A FIGURA 9 demonstra as características estruturais da placa projetada, com altura $d = 3$ cm e comprimento $L = 3,5$ cm, observando que para a projeção de

L, as trilhas foram desenvolvidas para comportar os conectores SMA inseridas na placa que obtém um comprimento de 0,5 cm cada.

Tais conectores não são considerados na conexão do dispositivo com o VNA, pois o método de calibração é capaz de retirar as influências dos conectores, analisando assim apenas a estrutura fractal.

A dimensão fractal obedecida, é uma razão de 1 para três, ou seja, tem-se a ordem 0 com um anel condutor de raio $r_1 = 1,25$ cm, que para a ordem 1 se ramifica em três partes iguais gerando 3 outros círculos de raio $r_2 = 0,42$ cm, totalizando 4 anéis, e ordem 2, cujos círculos internos se dividem novamente em três circunferências de raio $r_3 = 0,13$ cm, com 13 anéis. Todas as placas utilizadas na confecção dos dispositivos possuem as mesmas dimensões e características de condutividade.

3.3 ELEMENTOS FÍSICOS

Neste item serão descritos todos os elementos físicos que foram utilizados para que essa pesquisa fosse efetivada.

Para a construção da estrutura física da placa foi trabalhado com:

- Placas de FR4 com dupla face de cobre.
- Conectores SMA fêmea reverso com impedância de 50 Ω
- Solda

As placas foram desenhadas no ADS, salvos arquivos em formato Gerber e enviadas para o EFAB, onde segundo o professor encarregado, as placas foram confeccionadas usando o método fotolitográfico¹, *fotoresist*² tipo *dry-film*³, seguido

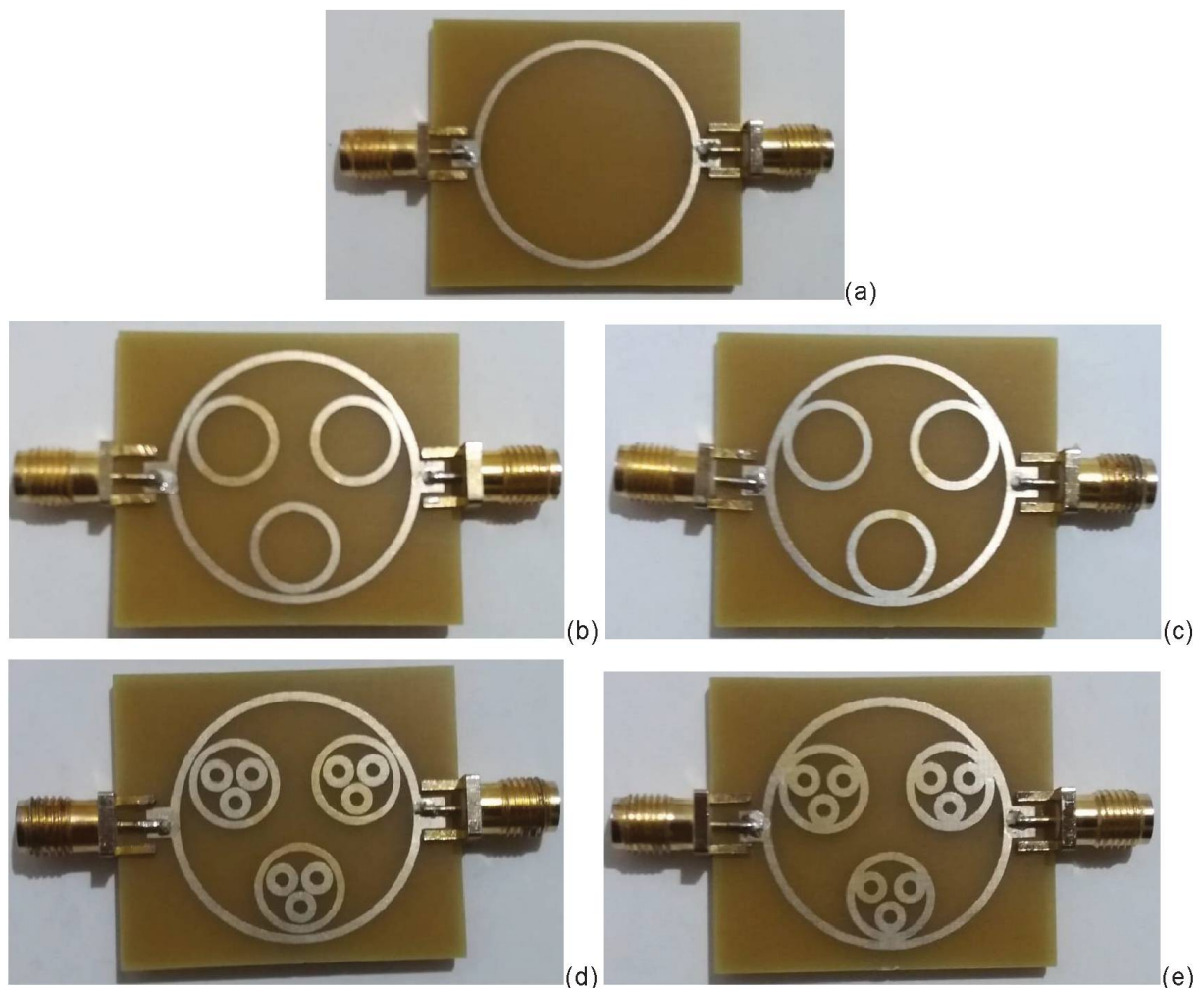
¹Consiste na escolha e limpeza do substrato, fotogração dos microcanais em um polímero fotossensível (fotorresiste), corrosão do substrato e selagem dos microcanais (COLTRO, et. al., 2007)

² Material que reage com a incidência de luz.

³ Uma película com duplo lado protetor.

de corrosão ácida a base de ácido clorídrico, e *stripping*⁴ em meio alcalino, na sequência, aplicou-se uma camada de prata *electroless*⁵ para proteção e soldabilidade. No LAMMI foram soldados os conectores SMA fêmea reverso, nas duas portas do dispositivo, como pode ser visto na FIGURA 9.

FIGURA 9 – PLACAS, (a) ORDEM 0, (b) ORDEM 1 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (c) ORDEM 1 COM LIGAÇÃO DE TRILHA, (d) ORDEM 2 SEM LIGAÇÃO DE TRILHA, (e) ORDEM 2 COM LIGAÇÃO DE TRILHA.



FONTE: AUTOR (2020)

As placas da FIGURA 9 possuem as mesmas características físicas com conectores SMA de Impedância $Z = 50 \Omega$. Foi efetuado um teste de continuidade por

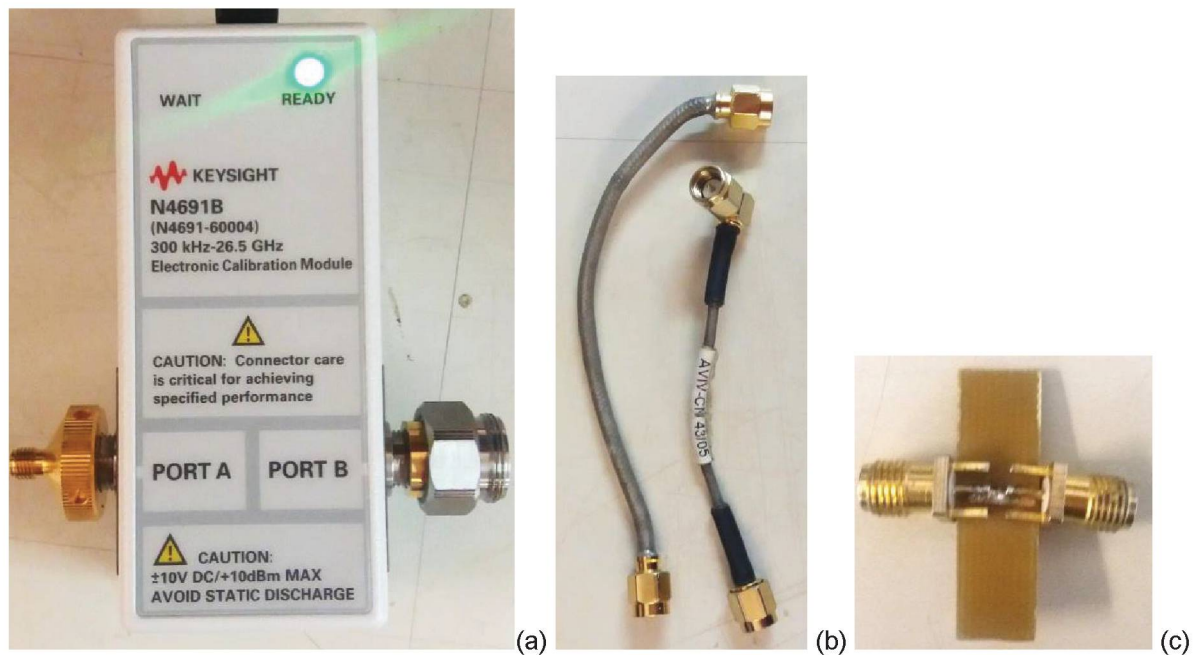
⁴ É utilizada para recuperar placas contendo componentes fora de especificação ou danificados que, de outra forma, teriam que ser destruídos ou devolvidos à fábrica principal (MELILLO, 1971).

⁵ Sem uso de corrente elétrica.

meio de um multímetro, com intuito de identificar se todos os elementos se interligavam.

Visando a diminuição dos ruídos presentes durante a extração dos parâmetros de Espalhamento, foi efetuada uma calibração no VNA, utilizando o Kit de calibração, com imposição de ruídos extras.

FIGURA 10 – KIT DE CALIBRAÇÃO, (a) MÓDULO DE CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA (ECAL), (b) CABOS COAXIAIS, (c) PLACA DE MICROSTRIP COM CONECTORES SMA.

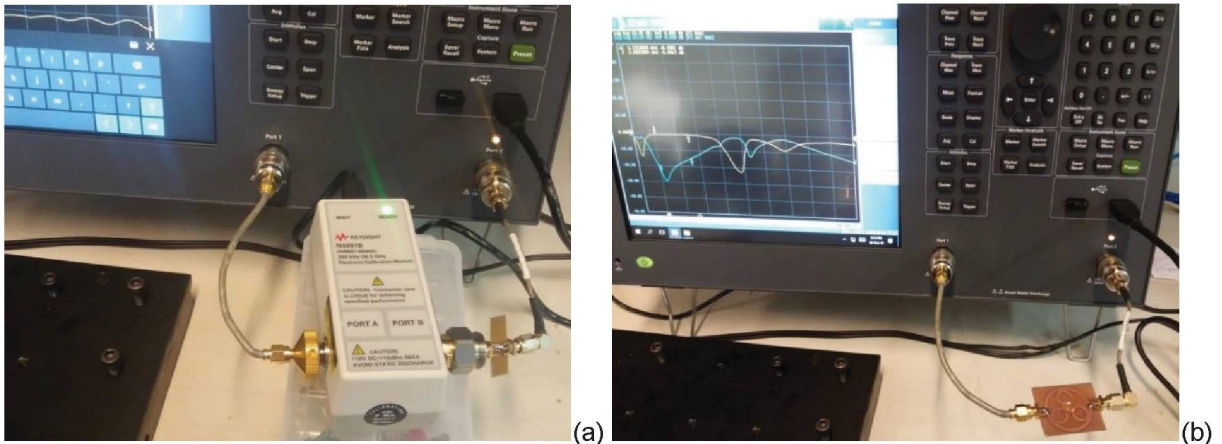


FONTE: AUTOR (2020)

A utilização de um kit de calibração observado na FIGURA 10, composto pelo dispositivo eletrônico (ECal), dois cabos coaxiais de $Z = 50 \Omega$ e placa com conectores, faz com que a medida extraída seja apenas a da geometria fractal, retirando influências dos conectores, solda e cabos, ou seja tal mecanismo faz com que a coleta dos dados se aproxime do ideal.

A extração dos parâmetros de espalhamento para análise comparativa de dados vislumbra um sistema composto pelo analisador VNA, cabos coaxiais, conectores e placas.

FIGURA 11 – APARATO EXPERIMENTAL, (a) CALIBRAÇÃO, (b) EXPERIMENTAÇÃO.



FONTE: AUTOR (2020)

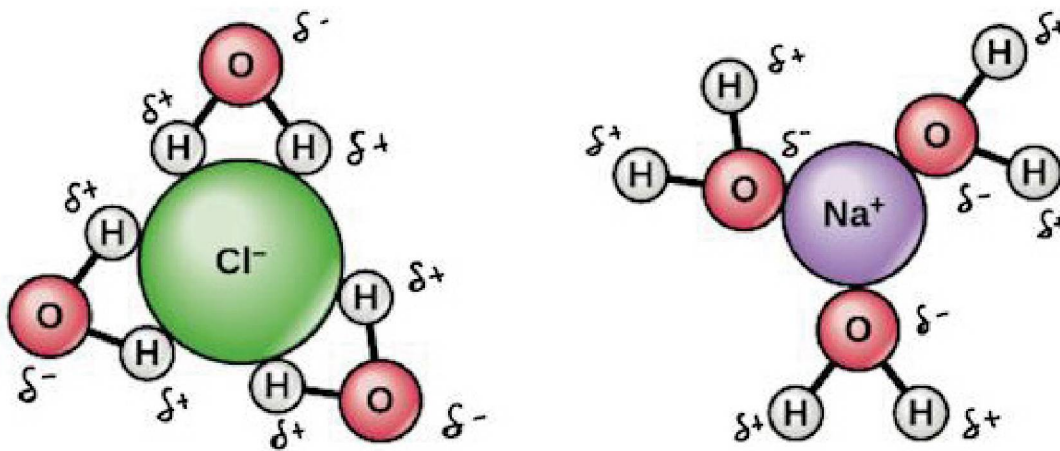
Os ensaios foram efetuados (FIGURA 12) no mesmo dia, para todas as placas com diferentes ordens fractais e trilhas, visando manter as mesmas condições de calibração e clima, uma vez que a solução salina depende diretamente da temperatura do ambiente. No entanto, deve-se corroborar que não se trata de um sistema ideal e sim natural, havendo assim influências externas.

. Para a efetivação dos ensaios utilizou-se:

- Água destilada
- NaCl
- Pipetas
- Balança de precisão (modelo: AW220, capacidade: 0,01 a 220 g)
- Recipientes
- Agitador Magnético (modelo: IKA RH Basic 2)
- Becker (15 ml)
- Ampolas (8)
- Haste metálica com garra

O soluto utilizado foi NaCl, Cloreto de sódio, e solvente H₂O, água destilada, descrevendo uma solução aquosa, salina e homogênea, que desencadeia ligações iônicas, fornecendo moléculas compostas por íons positivos (cátions) e negativos (ânions), substâncias estas que conduzem corrente elétrica, denominadas eletrólitos. A água pura não conduz corrente elétrica, porém se misturada com NaCl e o mesmo for dissolvido a solução irá conduzir corrente elétrica (WERLANG,2015). Assim sendo tal mistura descrevem as ligações iônicas da FIGURA 12 :

FIGURA 12 – ESTRUTURA DA SOLUÇÃO AQUOSA DE NaCl



FONTE: OPENSTAX (2012)

A FIGURA 12 mostra a forma estrutural que a molécula de NaCl se reestrutura quando imposta a moléculas de H₂O.

Vale frisar que ambos os componentes do soluto possuem um elétron na camada de valência fazendo com que não sejam compostos estáveis quando separados (SOUZA, 2019), pois segundo Werlang (2015).

Pela teoria de Arrhenius as moléculas dos eletrólitos ao se dissolverem em água dissociam-se em átomos carregados, os íons, e estes conduzem a corrente elétrica devido a sua migração, os íons quando ligados a corrente se movimentam, por causa das suas forças eletrostáticas, em direção ao condutor de carga oposta. A dissociação depende da concentração da substância (WERLANG,2015, p.17).

Dessa forma sabemos que a condutividade das amostras dependerá diretamente da quantidade de soluto no solvente. Assim sendo temos que:

TABELA 3 – SOLUBILIDADE DO NaCl

Substância	Solubilidade em quantidade de matéria (mol L^{-1}) (20 °C)	Solubilidade (g) por 100 g de água (20 °C)
NaCl	6,15	36

FONTE: AUCÉLIO E TEIXEIRA (2017).

As soluções foram feitas no LITS, utilizando a balança de precisão para pesagem das quantidades de solvente de cada amostra, dissolvidas em 15 ml de H_2O , dentro do Becker, com temperatura ambiente de 20°C. A mistura foi feita no agitador magnético com imãs, auxiliado por uma haste metálica com garra, usando 20% de sua capacidade total por 30 min, para cada solução. A quantidade de mistura para cada amostra foi definida visando a porção a ser utilizada em cada um dos ensaios experimentais.

TABELA 4 – PROPORÇÕES DE SOLUÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras	Percentual de NaCl (%)	H_2O (ml)	NaCl (g)
P	-	-	-
0	0	15	0
1	15	15	0,81
2	30	15	1,62
3	45	15	2,43
4	60	15	3,24
5	75	15	4,05
6	90	15	4,86

FONTE: AUTOR (2020)

Seguindo o que diz Yamauchi *et. al* (2013)

A capacidade de algumas substâncias se dissolverem em um líquido e depende da temperatura. Solubilidade é a quantidade máxima de soluto que dissolve-se em uma quantidade conhecida de solvente. Por exemplo, a solubilidade de O sal na água é 36 g NaCl / 100 H_2O a uma temperatura de 20 ° C.(Yamauchi *et. al.*, 2013, p 13)

Visto isso na TABELA 4, fazendo algumas adaptações, a proporção para saturação foi de 15 ml de H₂O para 5,4 g de NaCl. O procedimento experimental respeitou níveis de mistura que variaram de 0 à 90% , não sendo usado o parâmetro de 100% , pois a solução supersaturou. Onde a amostra intitulada “P”, se trata da placa sem soluções inseridas.

Para a medição das amostras na placa foi realizado um teste inicial, com intuito de verificar a melhor quantidade (em massa, que pode ser prontamente convertida em volume) de solução. Foram testadas diferentes quantidades da solução - 0,03, 0,09, 0,15, 0,19, 0,26, e 0,32 g em massa. Neste trabalho serão apresentados os dados coletados para os testes com 0,32 g de solução, uma vez que tal quantidade envolveu toda a geometria fractal.

Os demais testes encontram-se em apêndice. Uma vez definida a quantidade de solução a ser depositada sobre os dispositivo e com o objetivo de obter resultados com maior precisão, foram efetuados 10 ensaios experimentais para cada concentração da solução, onde a após cada teste o dispositivo era higienizado com álcool e deixado descansar por 2 min, permitindo assim a extração da média e a verificação do desvio padrão de cada solução estudada.

Os ensaios foram efetuados dentro da faixa de 1 a 10 GHz, englobando a frequência não patenteada de 2,4 GHz, na qual a LT foi projetada para obedecer à impedância de 50 Ω.

Para verificação do projeto as placas foram simuladas no ADS e assim elaborou-se comparações entre simulação e experimentação, verificados via parâmetros S, tal simulação usou o método dos momentos⁶ (MoM). Dessa forma podemos observar o comportamento do sinal em ambas situações, dando ênfase que por ser uma geometria simétrica só será mostrado os gráficos os parâmetros S_{11} e S_{21} .

⁶ “O método de simulação MoM é frequentemente referido como um solucionador de 'planar 3D' e é um dos mais difíceis de implementar métodos de simulação EM, pois requer uma avaliação cuidadosa das funções de Green e integrais de acoplamento 2.” (MORRIS, 2014).

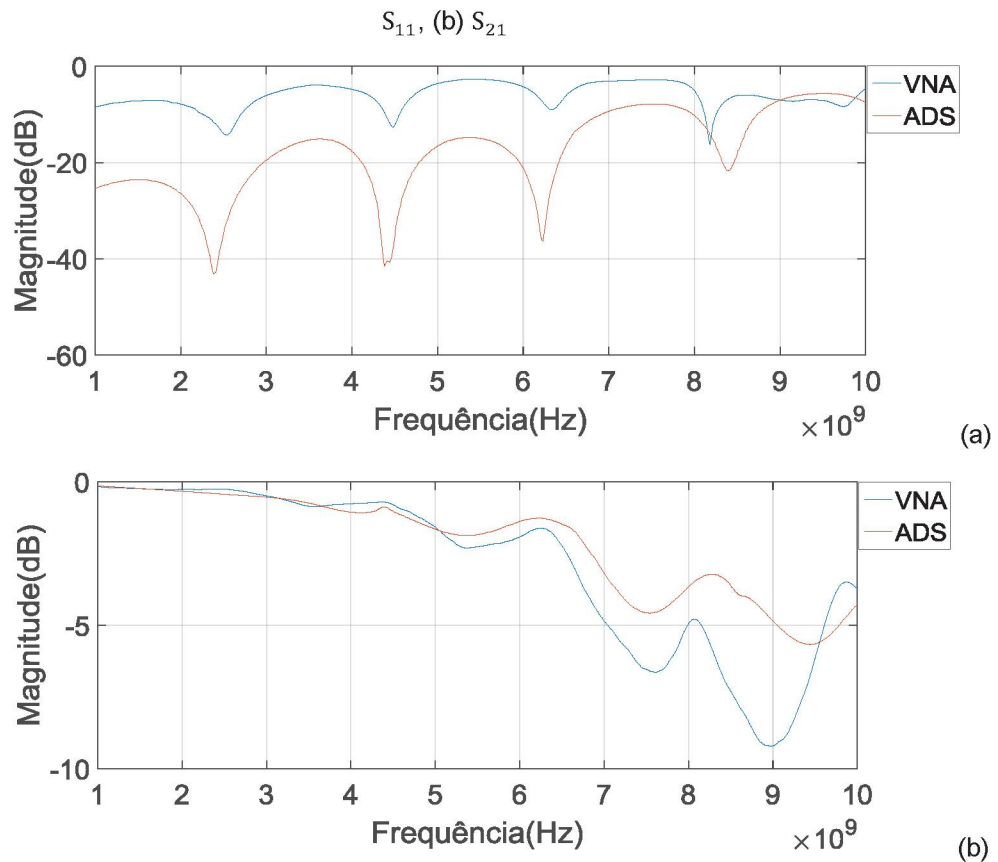
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações via ADS e medidos experimentalmente através do VNA. Serão efetuadas comparações entre as diversas geometrias propostas e fabricadas. Tendo em vista que as estruturas apresentam as portas 1 e 2 simétricas, serão apresentados apenas o coeficiente de reflexão S_{11} (que é idêntico ao S_{22}) e de transmissão S_{21} (que apresenta comportamento similar ao S_{12}).

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO

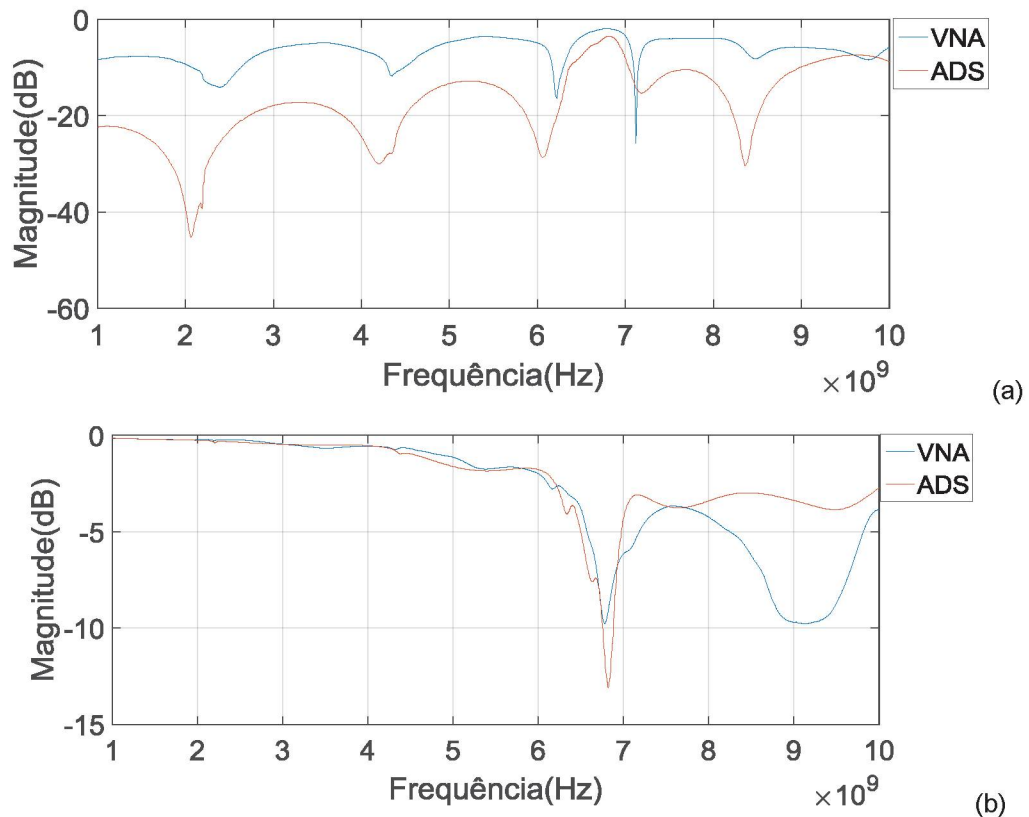
Um estudo preliminar dos dispositivos confeccionados foi realizado através de simulações no software ADS, sem a presença de solução sobre os dispositivos. Isso possibilitou a comparação dos dados simulados com uma rodada de medidas experimentais com os sensores a vazio, ou seja, sem a presença da solução. Os resultados comparativos são apresentados nos GRÁFICOS 1, 2, 3, 4 e 5, que apresentam para cada uma das 5 geometrias confeccionadas os valores de magnitude dos parâmetros S_{11} e S_{21} , em escala dB. O VNA permite também a obtenção da fase, mas essa não foi considerada no desenvolvimento do presente trabalho. As simulações e as medidas experimentais foram realizadas na faixa de frequência de 1 GHz à 10 GHz, embora a frequência de interesse é 2,4 GHz, por se tratar de uma frequência não licenciada pela ANATEL, o que facilitaria a implementação prática do sensor.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 0, (a)



FONTE: AUTOR (2020)

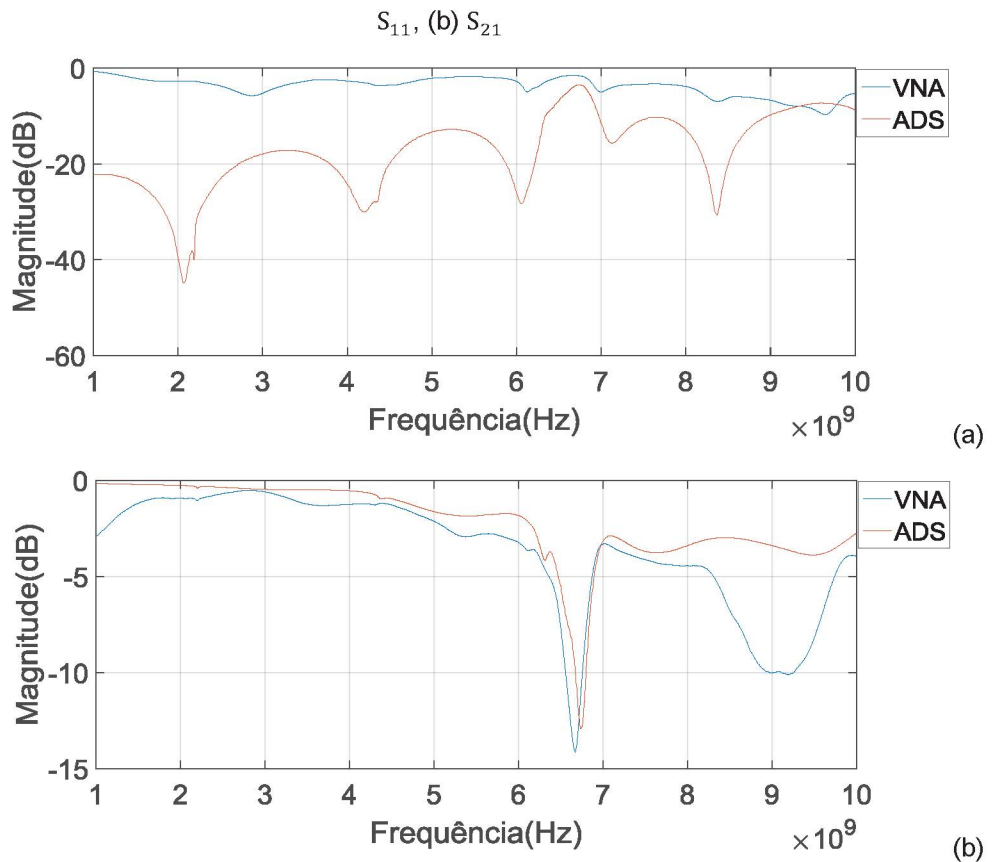
O GRÁFICO 1-(a) mostra a magnitude de S_{11} para a geometria de ordem 0, que é a referência para a obtenção das ordens fractais seguintes. Podemos observar que as ressonâncias obtidas na simulação e no experimento, onde o valor da reflexão atinge um mínimo local, situam-se aproximadamente na mesma frequência e possuem largas de bandas similares até a frequência de 7 GHz. Todavia, há uma nítida discrepância nos valores de magnitude simulados e medidos experimentalmente. Uma vez que para a análise dos sensores confeccionados no presente trabalho, que tem cunho mais voltado para a realidade experimental, serão relevantes a variação na magnitude dos parâmetros S para as diferentes concentrações salina na solução aquosa, não buscou-se a fonte de tal discrepância. Já o GRÁFICO 1-(b) mostra a magnitude de S_{21} para a simulação e o experimento. Comparativamente, percebe-se nesse caso uma concordância muito maior entre o valor simulado e o obtido experimentalmente, sobretudo na faixa entre 1 e 6 GHz, que inclui a frequência de interesse.

GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO, GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

Os resultados da simulação e do experimento para a geometria 1 são apresentados no GRÁFICO 2. Novamente pode-se observar que as ressonâncias obtidas na simulação e no experimento concordam razoavelmente até a frequência de 7 GHz, mas a discrepância nos valores de magnitude simulados e medidos experimentalmente para o S_{11} permanece, como pode ser visto no GRÁFICO 2-(a). A magnitude de S_{21} , mostrada no GRÁFICO 2-(b) apresenta boa concordância entre os valores simulados e medidos. Comparando-se a geometria de ordem 1 com aquela de ordem 0 percebe-se o aparecimento de um vale bastante pronunciado em S_{21} , próximo de 6,75 GHz, que sugere uma forte rejeição para a onda transmitida da porta 1 para a porta 2 e que não estava presente com tal intensidade na geometria de ordem 0, cujo comportamento é muito mais suave.

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 2, (a)



FONTE: AUTOR (2020)

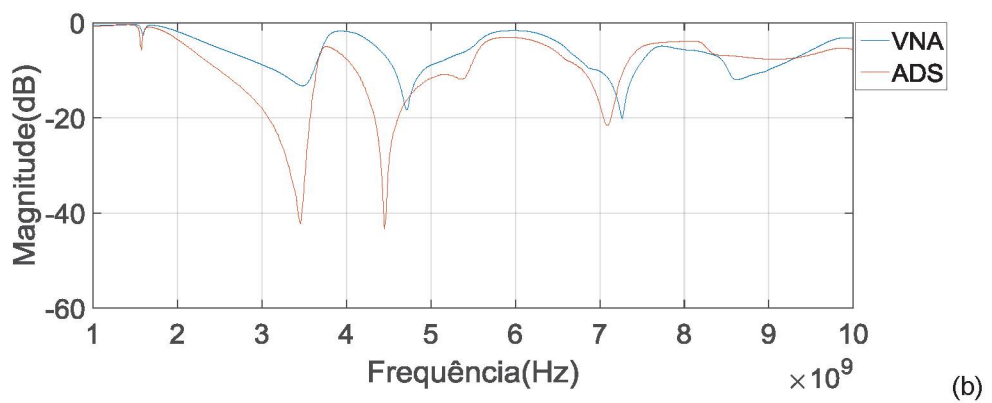
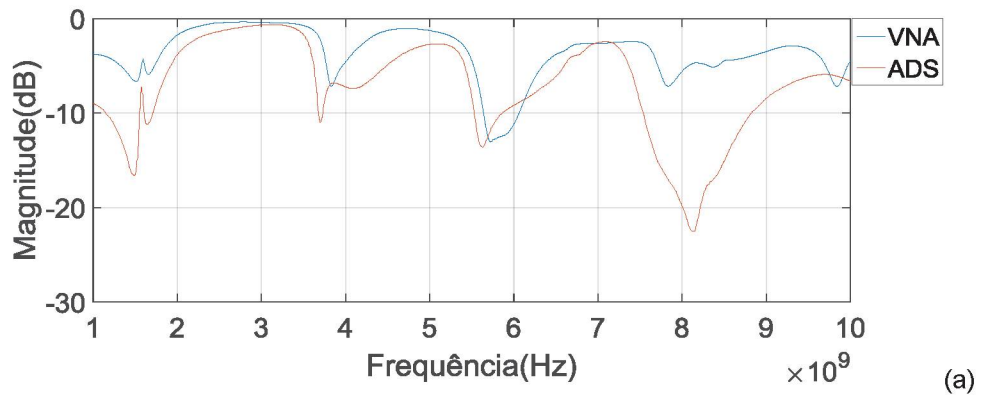
O efeito do aumento da ordem na geometria fractal pode ser claramente percebido quando é considerada a ordem 2, cujos resultados são apresentados no GRÁFICO 3. Percebe-se um pronunciamento ainda maior da ordem fractal sobre a banda de transmissão da porta 1 para a porta 2 que é rejeitada na frequência próxima de 6,75 GHz. Aqui pode-se comparar os resultados apresentados no GRÁFICO 2-(b) com aqueles do GRÁFICO 3-(b). Enquanto na geometria de ordem 1 magnitude de S_{21} próxima de 6,75 GHz atinge um mínimo experimental de -9 dB, na geometria de ordem 2 esse vai a aproximadamente -14 dB, uma diferença significativa de 5 dB. Também percebe-se o estreitamento da banda rejeitada próxima de 6,75 GHz.

O efeito da ordem fractal poderia ser verificado ainda para ordens fractais maiores que 2, Todavia, com o aparato experimental de confecção das placas disponível para o presente projeto nas dependências da UFPR, não foi possível a fabricação, pois demandaria uma resolução maior nas bordas dos anéis e fazer as

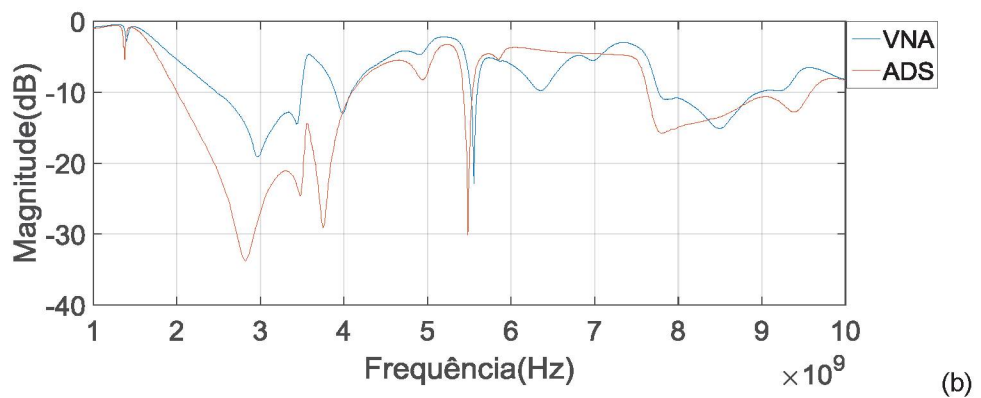
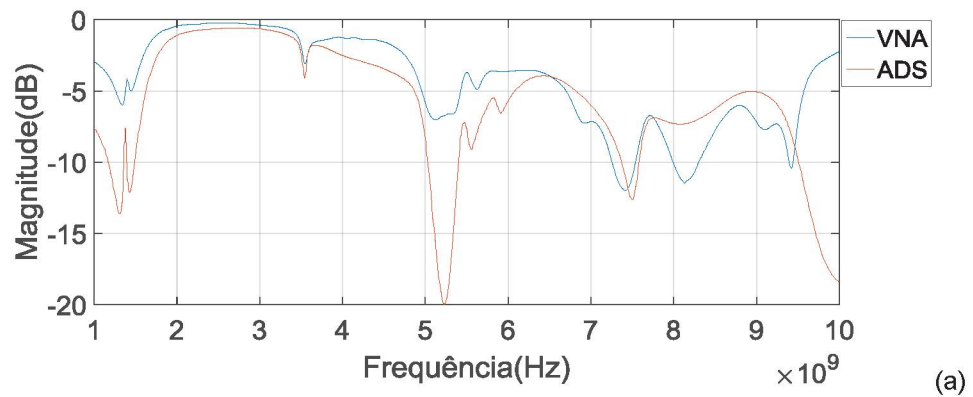
trilhas mais finas, o que também mudaria a impedância característica de linha escolhida.

Em todas as geometrias (ordem 0, 1 e 2) pode-se perceber que os GRÁFICOS 1-(a), 2-(a) e 3-(a) que próximo da frequência de 2,4 GHz, escolhida para avaliar o comportamento do efeito sensor, há um mínimo para o coeficiente de reflexão da porta 1. Isso sugere uma máxima transmissão nessa região do espectro e coloca a questão sobre qual parâmetro apresenta maior sensibilidade na faixa desejada.

Com o intuito de avaliar ainda outras possibilidades de geometria, propôs-se realizar o curto-circuito entre os anéis, conforme as geometrias denominadas 1CC e 2CC. Os resultados para as geometrias 1CC e 2CC são ilustrados no GRÁFICO 4 e GRÁFICO 5, respectivamente. A comparação entre a simulação e o experimento apresentou novamente as já relatadas discrepâncias na magnitude dos parâmetros S, embora os valores para as frequências e as larguras de bandas nas regiões de ressonância tiveram razoável concordância. O comportamento geral das curvas também foi razoavelmente concordante, embora as magnitudes tiveram discrepâncias maiores do que 3 dB. O que foi possível perceber é que a região de mínimo de reflexão na faixa de 2,4 GHz para as geometrias anteriores deslocou-se para baixo, com dois mínimos locais próximos a 1,5 GHz e 1,7 GHz na geometria 1CC (veja o GRÁFICO 4-(a)), e próximos a 1,3GHz e 1,5GHz na geometria 2CC (veja o GRÁFICO 5(a)). Também o mínimo para a transmissão próximo da frequência de 6,75 GHz desapareceu. Para a geometria 1CC aparece uma região interessante nas frequências de 4,7 GHz e 5,2 GHz, com mínimos de transmissão chegando a -20 dB experimentalmente, embora a simulação sugira dois mínimos ainda mais pronunciados em 3,5 GHz e 4,5 GHz, conforme visto no GRÁFICO 4-(b). Para a geometria 2CC, o mínimo da transmissão visto experimentalmente ocorre em 5,6 GHz, com valor de -23 dB, enquanto a simulação previa um mínimo de transmissão em 5,5 GHz conforme mostrado no GRÁFICO 5-(b).

GRÁFICO 4 – SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

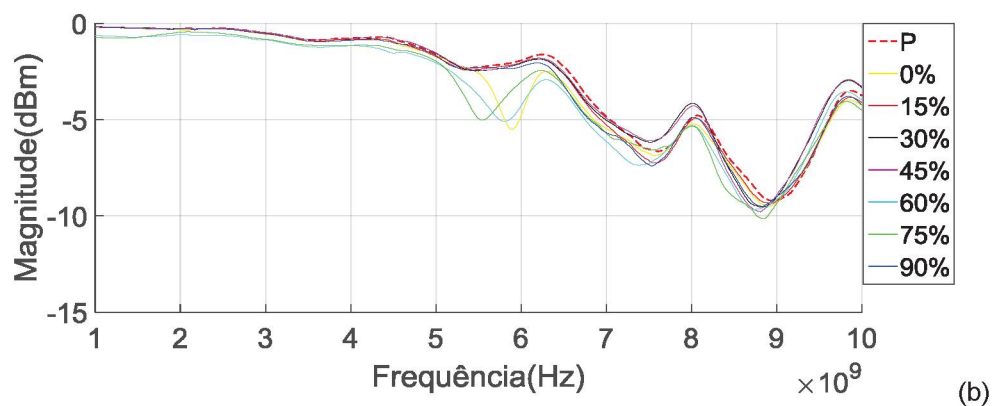
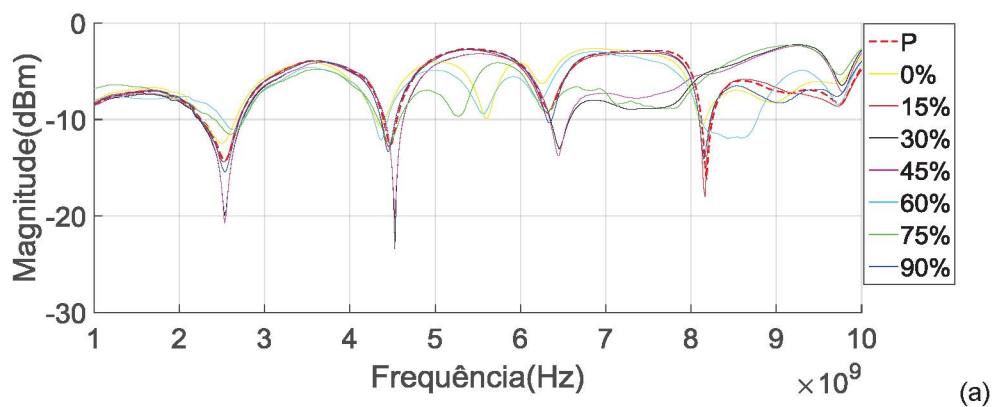
GRÁFICO 5 – SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

4.2 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES

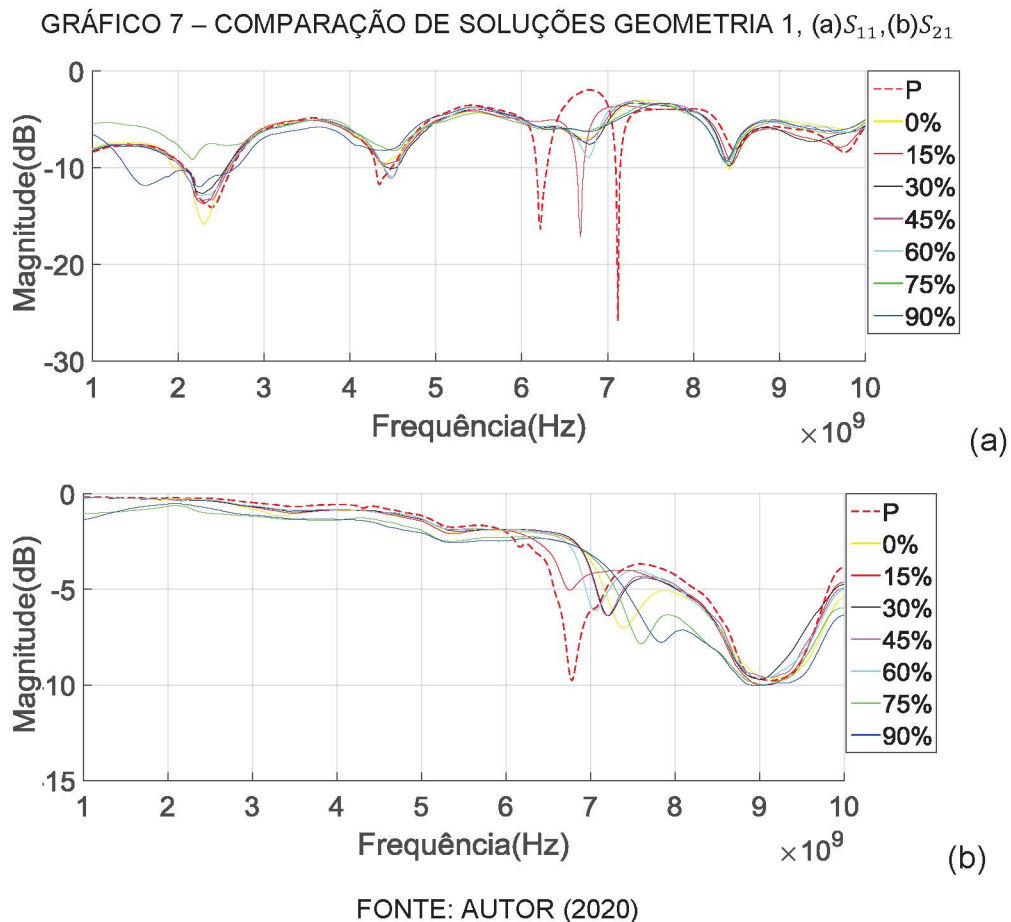
Na sequência serão apresentados os resultados de medida e caracterização experimental do efeito sensor de concentração salina para as 5 geometrias aqui estudadas. Com a finalidade de eliminar flutuações indesejáveis devido a possíveis imprecisões na deposição da amostra sobre o dispositivos, para cada concentração foram efetuados 10 ensaios experimentais obedecendo as mesmas características ambientais e físicas. Os valores médios dos parâmetros S obtidos nessas medidas são apresentados, em função da frequência, para cada concentração, indo de 0% a 90%. Também são apresentados no gráfico os resultados para os dispositivos a vazio, já que 0% corresponde à água pura sobre o sensor. É importante observar que, embora tenha-se utilizado água destilada como referência de concentração 0%, é possível que existam traços de contaminantes.

GRÁFICO 6 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21}



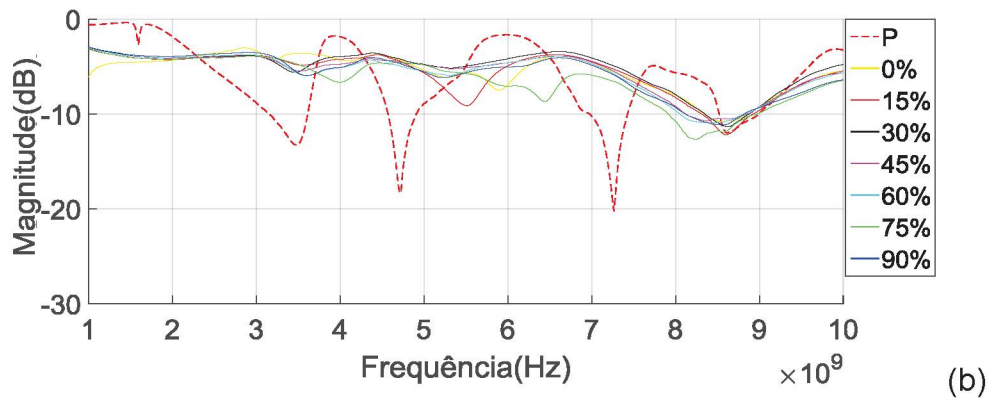
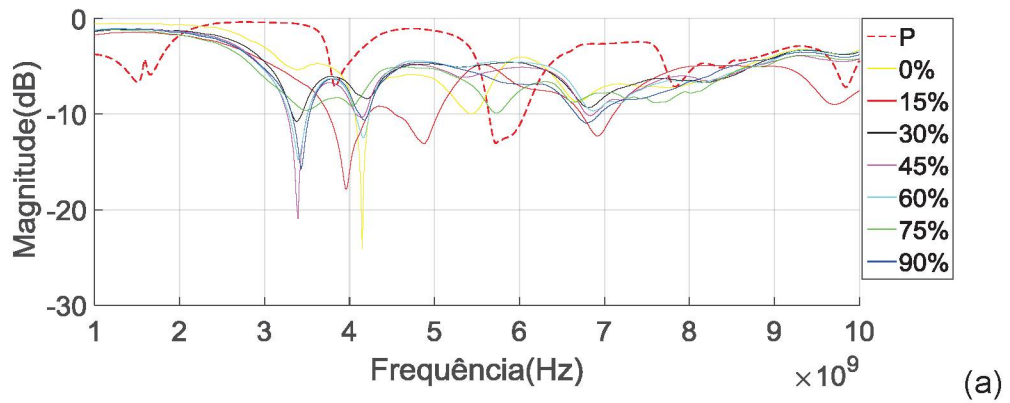
FONTE: AUTOR (2020)

O GRÁFICO 6 ilustra os parâmetros S_{11} em (a) e S_{21} em (b) para o dispositivo com geometria de referência, de ordem 0. Claramente há efeito da concentração salina sobre o comportamento dos parâmetros S, tanto na reflexão quanto na transmissão, que deixa uma assinatura característica do valor de concentração salina. Todavia, conforme será discutido adiante, o comportamento em uma única frequência ou a análise do desvio da ressonância em uma única banda não permite a obtenção de um efeito sensor com sensibilidade linear em relação à concentração salina. No caso, a assinatura característica parece mais pronunciada no parâmetro S_{11} , que apresenta mínimos de reflexão bem definidos em toda a faixa de micro-ondas medida experimentalmente nesse trabalho, embora a medição do parâmetro de reflexão com atenuações da ordem 10 dB em uma faixa indo de 1 GHz até pelo 6 GHz em um dispositivo real para determinar concentração salina torna esse sensor pouco competitivo quando comparado a soluções tecnológicas mais simples envolvendo medidas de impedância em baixas frequências.

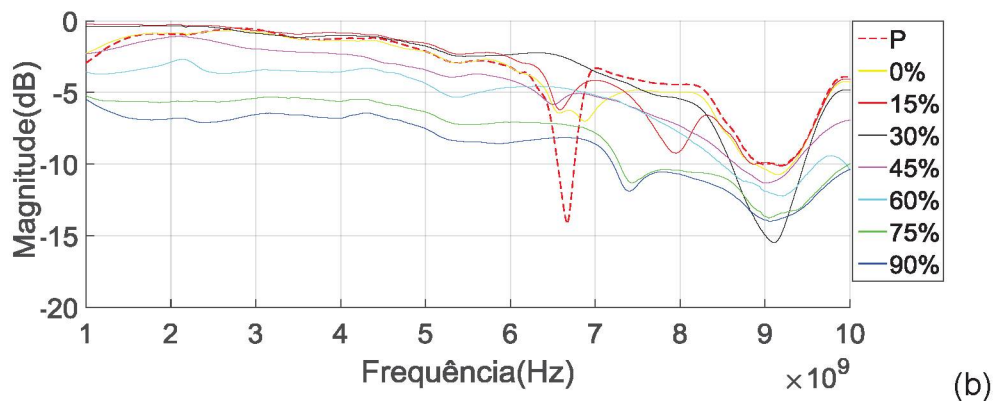
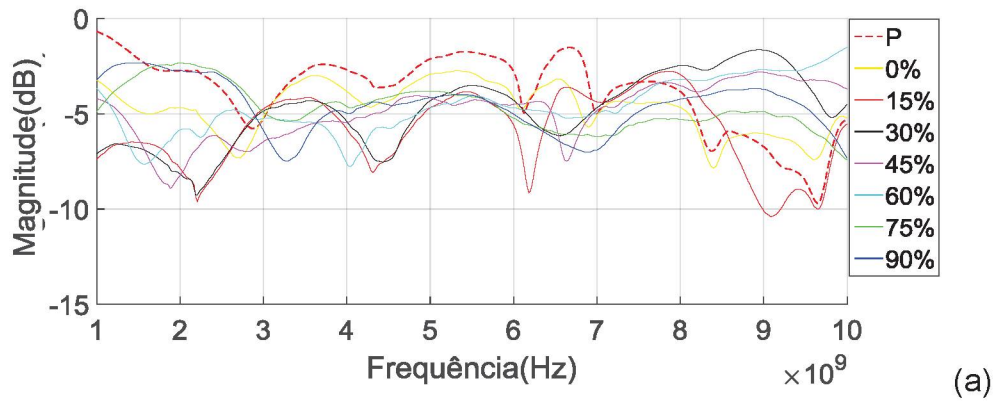


Para a geometria de ordem 1 o comportamento é ilustrado no GRAFICO 7, onde novamente vê-se uma assinatura característica da concentração salina sobre a dependência dos parâmetros S_{11} e S_{21} em função da frequência, mostrados respectivamente em (a) e (b). Observa-se o comportamento de S_{11} próximo da frequência de 2,4 GHz, ilustrado no GRÁFICO 7- (a), é possível ver que a reflexão tem o mínimo com a concentração da solução em 0%. A magnitude da reflexão próximo de 2,4 GHz sai de -15 dB para próximo de -12 dB quando a concentração aumenta para 15%. Se o comportamento geral do parâmetro de reflexão na porta 1 demonstrasse ao menos uma clara tendência de aumento com o aumento da concentração, era de se esperar a redução da atenuação, com a mínima atenuação em 90%. No entanto, não é o que se observa. Observa-se que para 75% a atenuação é menor do que para 90 %, contrariando o comportamento desejado para o sensor. Naturalmente esse comportamento errático numa única frequência se traduz também para o parâmetro S_{21} , ilustrado no GRÁFICO 7-(b)

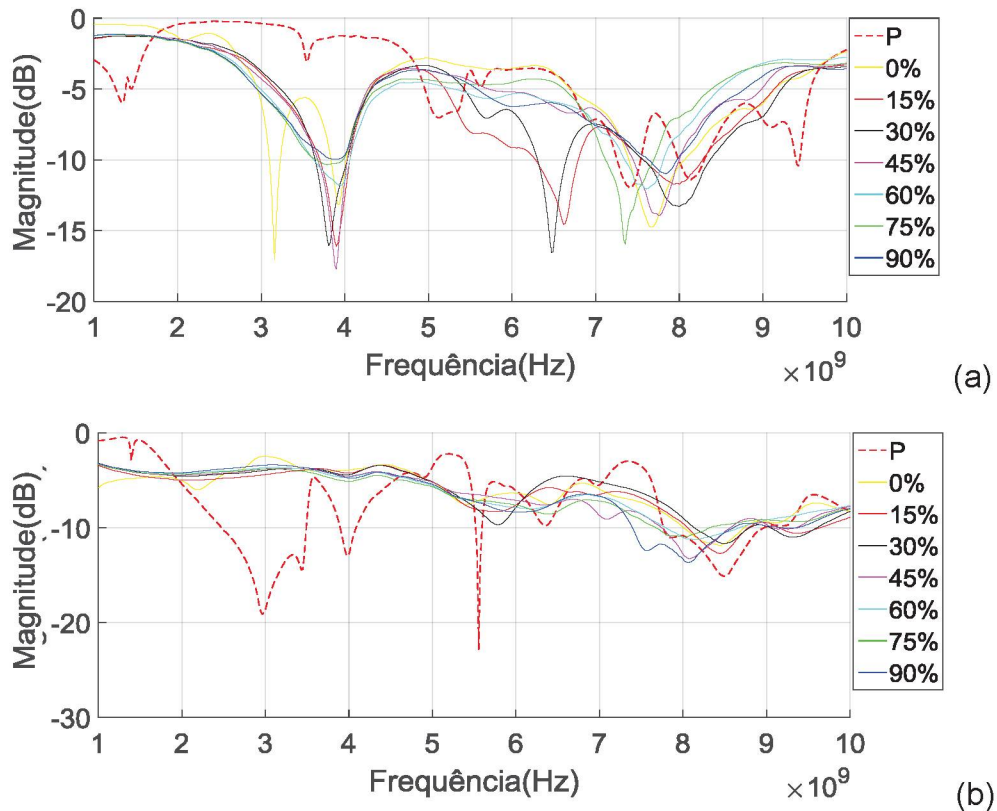
Modificando a geometria de ordem 1, para aquela denominada 1CC onde os anéis internos são curto-circuitados aos externos, a assinatura dos parâmetros S em função da frequência muda, conforme ilustrado no GRÁFICO 8. Nota-se aquele mínimo de reflexão apresentado no parâmetro S_{11} desloca-se de 2,4 GHz para 4,2 GHz aproximadamente quando a água pura é depositada sobre o sensor, conforme ilustrado no GRÁFICO 8 -(a). Essa modificação na geometria pode sugerir uma busca pela frequência onde ocorre o mínimo de reflexão, e não o valor de amplitude de reflexão em função da concentração salina. De 0% a 15% observa-se um desvio para frequências menores, indo de 4,2 GHz a 3,95 GHz. Esse desvio seria certamente mensurável, no entanto, ao passar de 45% para 60% por exemplo, observa-se a frequência do mínimo de reflexão deslocando-se ligeiramente para cima e o comportamento não linear do desvio de frequência se manifesta, também tornando difícil o uso desse elemento como sensor de salinidade.

GRÁFICO 8 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 9 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 10 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

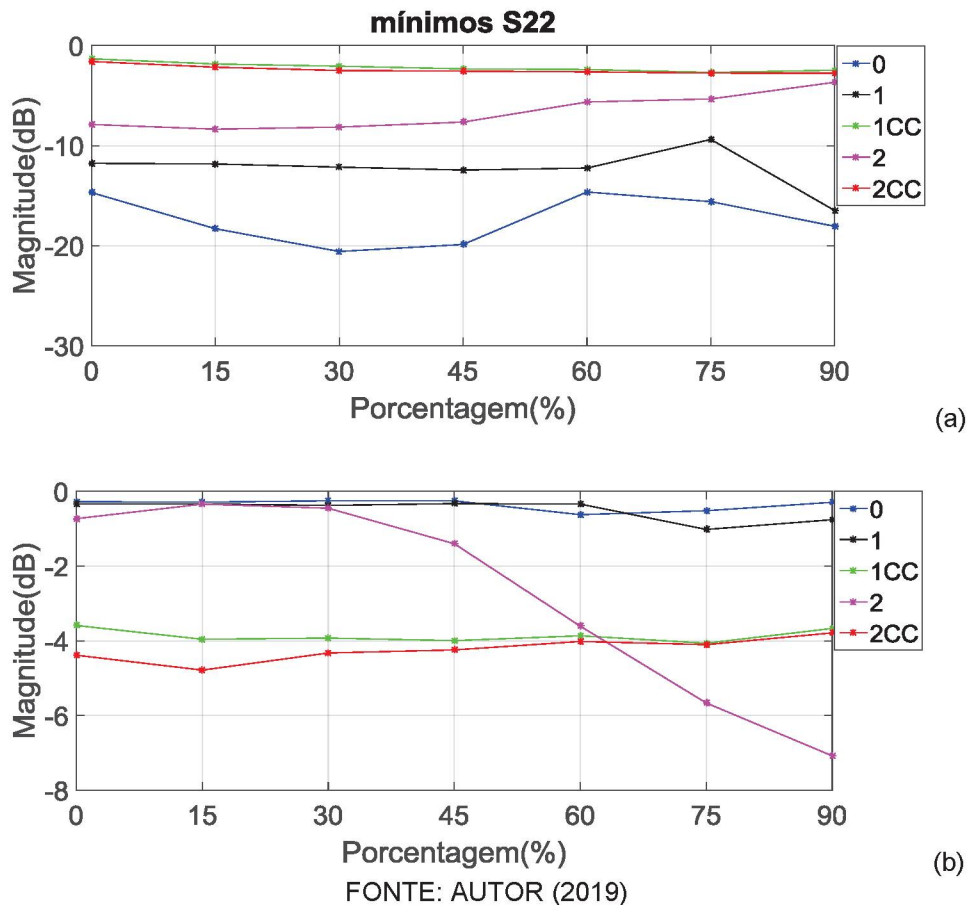
FONTE: AUTOR (2020)

Os GRÁFICOS 9 e 10 apresentam as medidas experimentais dos parâmetros S para as geometrias de ordem 2 e ordem 2CC, respectivamente, a fim de mostrar toda a informação relevante. Todavia, os resultados apresentados nessas configurações geométricas não permitem obter conclusões muito distintas daquelas dos casos anteriores, ou seja, o efeito sensor, com resposta linear não é observado e o que se poderia utilizar é a assinatura da medida em uma ampla banda espectral que é dependente da concentração salina, à exceção da medida do parâmetro de transmissão S_{21} da geometria de ordem 2, conforme mostra o GRÁFICO 9-(b), onde fica nítida a tendência de diminuição da transmissão com o aumento da concentração salina, que é mais pronunciada a partir de uma concentração de 30%. Outra importante conclusão que pode ser obtida da inspeção visual dos GRÁFICOS 6, 7, 8, 9 e 10, é que a ordem fractal e a configuração geométrica alteram significativamente a assinatura, ou seja a dependência dos parâmetros S em função da concentração.

Para corroborar o que foi até aqui discutido, são apresentados no GRÁFICO 11 os resultados para o comportamento dos parâmetros S em função da

concentração na frequência originalmente desejada para a operação do sensor, ou seja, em 2,4 GHz.

GRÁFICO 11 – PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA NA FREQUÊNCIA DE 2,4 GHz, (a) S_{11} , (b) S_{21} .



Pode-se concluir observando o GRÁFICO 11-(a) que as geometrias denotadas por 1, 1CC e 2CC não apresentam resposta sensorial significativa na frequência de 2,4 GHz, pois a magnitude de S_{11} praticamente não varia em função da concentração salina, exceto para a geometria 1, que tem variações para concentrações acima de 60%. Todavia, não permite inferir pelo valor de magnitude se a concentração é maior ou menor que 75%, para um dado valor de magnitude observado. Portanto essas geometrias ficam descartadas. Conclusões similares podem ser obtidas a partir da observação do GRÁFICO 11-(b) para a magnitude da transmissão. Restam as geometrias de ordem 0 e 2 como candidatas ao uso como sensor. É possível perceber observando o GRÁFICO 11-(a) que a geometria de ordem 0 apresenta um decréscimo aproximadamente linear da reflexão, saindo de -15 dB até -20 dB para concentrações salinas variando no intervalo de 0 a 30%. A

partir desse ponto, todavia, não é mais possível prever com base apenas na magnitude de S_{11} em 2,4GHz o valor da concentração salina. Por outro lado, aparentemente a geometria de ordem 2 apresenta uma resposta aproximadamente linear na escala dB para a magnitude da reflexão em todo o intervalo de concentrações, tendo uma variação da magnitude na ordem de 5 dB para a concentração salina variando de 0% a 90%. Observando agora transmissão S_{21} nessa estrutura fractal de ordem 2, conforme mostra o GRÁFICO 11 –(b), a partir de uma concentração de 30% até 90% a magnitude da transmissão varia pouco mais que 6 dB. O comportamento é aproximadamente linear com o aumento da concentração na faixa entre 45% e 75%.

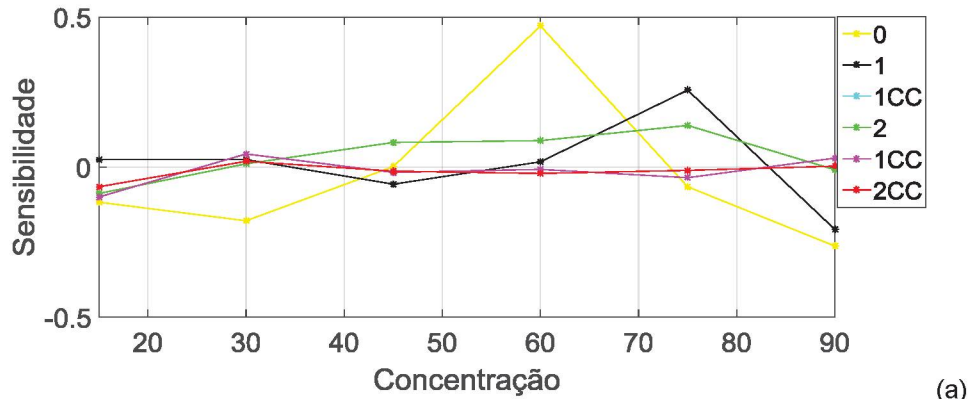
Para fins de análise é possível determinar a sensibilidade das diversas geometrias à concentração salina, utilizando a equação abaixo,

$$S = \frac{\partial M}{\partial P} \quad (26)$$

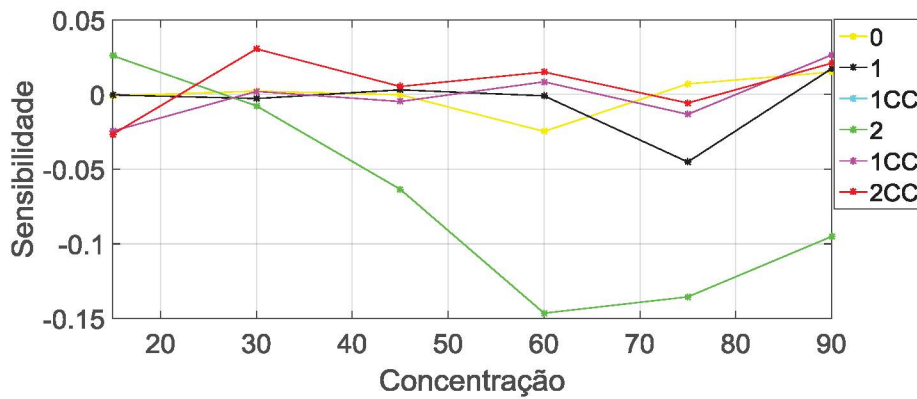
onde S aqui é a sensibilidade, M é a magnitude do parâmetro considerado, podendo ser reflexão ou transmissão e P é o valor da concentração em valores percentuais. A unidade de medida adotada aqui é o dB/percentual de concentração. Para um sensor ideal esse parâmetro resulta em uma constante, indicando linearidade.

O GRÁFICO 12 mostra a sensibilidade dos dispositivos construídos em função da concentração, na frequência de 2,4GHz. Observa-se que a melhor resposta de sensor para concentrações salinas entre 0 e 30% é a da geometria de referência, que é aproximadamente linear e tem valor de -0,17 dB/percento quando considerada a sensibilidade da reflexão, apresentada no GRÁFICO 12-(a). Já a geometria de ordem 2 apresenta-se como a melhor alternativa para concentrações acima de 30%, tendo a maior sensibilidade no parâmetro de transmissão para a faixa de concentração salina que vai de 30% a 90%, conforme observa-se no GRÁFICO 12-(b). Todavia a resposta não é linear em toda a faixa. Na região mais próxima da linearidade, entre 45% e 75%, o valor médio de sensibilidade fica próximo de -0,12 dB/ porcentagem.

GRÁFICO 12 – FATOR SENSIBILIDADE, (a) S_{11} , (b) S_{11}



(a)



(b)

FONTE: AUTOR (2020)

Para finalizar a apresentação dos resultados obtidos, tem-se que, apesar de haver uma sensibilidade não desprezível em duas das geometrias propostas, a medida em uma única frequência não apresenta requisitos fundamentais para um sensor, a saber: i) capacidade de predição fiel em toda a faixa de concentração salina na água e ii) linearidade em toda a faixa. Conforme observado nos gráficos, o comportamento não linear ocorre também para outras frequências. A alternativa é a comparação da resposta medida atual com uma assinatura previamente estabelecida para dada concentração. No entanto isso implica tornar o aparato de medida mais sofisticado e caro, pois necessitaria da medida em amplo espectro de microondas e processamento de dados posteriormente, o que torna a solução pouco competitiva quando comparada a soluções mais simples de determinação de impedância ou condutividade em frequências mais baixas.

5. CONCLUSÃO

Na presente dissertação propôs-se a fabricação e caracterização de sensores de concentração de NaCl em solução aquosa, utilizando a geometria de anéis ressonantes, com modificações para a indução de ordem fractal. Foi possível a fabricação de geometrias de anéis fractais em ordens 1 e 2, que foram comparadas com a geometria de referência, dita de ordem 0. Uma pequena modificação, conectando-se os anéis internos aos externos, também foi estudada, dando origem às geometrias 1CC e 2CC. A partir das simulações realizadas no software ADS e esses resultados foram comparados aos obtidos experimentalmente, através do uso do VNA no laboratório LCE da UFPR. Perceberam-se discrepâncias entre simulação e experimento no que se refere principalmente aos valores de magnitude dos parâmetros S. No entanto, as frequências de ressonância tiveram boa concordância. Uma vez que o trabalho teve foco experimental, não buscou-se elucidar a origem dessas discrepâncias.

Na etapa seguinte, os dispositivos foram caracterizados do ponto de vista de resposta à concentração salina em solução aquosa depositada sobre os dispositivos. Previamente à caracterização foi feito um teste para determinar qual era a quantidade de massa necessária para recobrir toda a área do sensor. Todos os resultados mostrados na dissertação consideraram essa quantidade, e para cada concentração salina foram realizadas 10 medidas e posteriormente tomadas as médias, com a finalidade de eliminar o ruído indesejável e também a imprecisão na deposição da amostra da solução aquosa sobre a área ativa do sensor. Cabe destacar que as medidas foram realizadas em temperatura de 20°C e nenhuma tentativa de buscar efeitos de sensibilidade cruzada foi feita.

Como resultado central verificou-se que de todas as geometrias propostas, a geometria de ordem 0, usada como referência, e a geometria de ordem 2 foram as que apresentaram a resposta mais próxima do que se espera de um bom sensor na frequência de 2,4GHz, ou seja, responder de forma fiel e linear em toda a faixa. Os dispositivos aqui fabricados não tiveram resposta linear e nem responderam em toda a faixa, embora para a geometria 0, a resposta foi aproximadamente linear na medida de magnitude de reflexão, com sensibilidade de -0,17 dB por percentual de concentração salina, entre 0 e 30%. Já para a geometria 2 a resposta é apreciável entre 30% e 90% de concentração, tendo resposta aproximadamente linear na

medida da magnitude de transmissão para concentrações entre 45% e 75%, com sensibilidade média de -0,12 dB/porcento nessa faixa. Observando-se os gráficos obtidos experimentalmente, pôde-se constatar que, embora uma medida em frequência única não apresente resposta adequada como sensor, existe uma assinatura característica dependente da concentração salina, quando se analisa uma banda espectral maior, entre 1 GHz e 6 GHz. No entanto, essa solução é mais complexa do que o uso de métodos de impedância e condutividade em frequências mais baixas, o que indica que as geometrias aqui adotadas não apresentaram uma resposta satisfatória quando aplicadas como sensores.

Como perspectivas para trabalhos futuros que possam dar continuidade apontam-se o aprimoramento dessa geometria através do uso de técnicas mais sofisticadas de fabricação, que permitam levar o fractal a ordens maiores do que 2, alterações na geometria fractal adotada, visando maximizar a sensibilidade do sensor, a análise do comportamento dessas mesmas estruturas em outras frequências e o efeito de sensibilidade cruzada, variando-se a temperatura nas medidas. Como comentário adicional, nota-se que aumento da concentração salina na solução aquosa sobre o dispositivo naturalmente aumenta a condutividade do meio acima do substrato dielétrico. Nesse caso, há uma tendência de maior absorção da radiação que passa para o meio aquoso, devido ao aumento da condutividade, o que deveria atenuar a onda transmitida com o aumento da concentração salina. Isso de fato é observado para a estrutura com a geometria fractal de ordem 2, que tem a melhor sensibilidade no parâmetro de transmissão. Todavia, seria necessário levar em conta ainda efeitos de fase, e também o fato de que a permissividade dielétrica da água é da ordem de 16 vezes maior do que a do FR4, fazendo com que as linhas do campo elétrico passem a se concentrar acima do substrato, complicando a análise física do comportamento dos parâmetros de transmissão e reflexão ainda mais, pois ocorre uma competição entre o valor maior de permissividade dielétrica da água, que tende a trazer as linhas do campo elétrico para a região onde há a solução aquosa e a condutividade da solução que depende da concentração, e que tende a expulsar as linhas de campo elétrico, por efeito pelicular. A análise teórica e simulações também cabem como perspectivas de continuidade do presente trabalho.

Tendo em vista que foi publicado o artigo intitulado “Dimensionalidade fractal e invariância de escala em circuitos elétricos AC e linhas de transmissão”, na Revista Brasileira de Ensino de Física em 10 de janeiro de 2020.

6. REFERÊNCIAS

AHMED, H. S.; SALIM, A. J.; ALI, J. K. A Compact Dual-band Bandstop Filter Based on Fractal Microstrip Resonators, Microwave Research Group, Department of Electrical Engineering, University of Technology, Iraq, 2015.

ASSIS, T. A. D., VIVAS MIRANDA, J. G., MOTA, F. D. B., ANDRADE, R. F. S., CASTILHO, C. M. C. D. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de ensino de física*, 30(2), 2304-1, 2008.

ATISTA, Y. M. V.; Análise de estruturas inspiradas em fractais aplicadas em antenas e superfícies seletivas de frequência, Natal, 2018.

AYQUIPA, S. A. M.; Contribuição ao Estudo, Simulação e Caracterização Eletromagnética de Dispositivos de Micro-ondas Baseado na Fita de Mobius: Microstrip e Guia de Onda Coplanar na Configuração Back-to-Back, 2017.

BACKES, A. R. BRUNO, O. M. Técnicas de estimativa da dimensão fractal: um estudo comparativo. *INFOCOMP Journal of Computer Science* 4.3 , 2005.

BANICA, F. G. *Chemical sensors and biosensors: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2012.

BERNOU, C., REBIÈRE, D., PISTRE, J. Microwave sensors: a new sensing principle. Application to humidity detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 68(1-3), 88-93, 2000.

CASTRO, B. L. V.; Miniaturização de um Amplificador de Baixo Ruído em Micro-ondas, P. 1-83, 2017.

CÉSAR, R.; SILVA, M. Modelagem de um Filtro de Microfita com Linhas Acopladas e Deformações DGS no Plano Terra. *Semana Acadêmica* p. 1–14, 2015.

COLTRO, W. K. T., PICCIN, E., CARRILHO, E., JESUS, D. P. D., SILVA, J. A. F. D., SILVA, H. D. T. D., LAGO, C. L. D. Microsistemas de análises químicas: introdução, tecnologias de fabricação, instrumentação e aplicações. *Química Nova*, 30(8), 1986-2000, 2007.

DINCER, C., BRUCH, R., COSTA-RAMA, E., FERNÁNDEZ-ABEDUL, M. T. MERKOÇI, A., MANZ, A., URBAN, G. A., GÜDER, F. Disposable Sensors in

Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring. *Advanced Materials*: 1806739. doi:10.1002/adma.201806739, 2019.

DJORDJEVIĆ, A. R. et al. Wideband frequency-domain characterization of FR4 and time-domain causality. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 43, n. 4, p. 662–667, 2001. FEDERAL, U. et al. Número de ordem PPgEEC : M396 Natal, RN, 2013.

DURICKOVIC, I., MARCHETTI, M., CLAVERIE, R., BOURSON, P., CHASSOT, J. M., FONTANA, M. D. Experimental study of NaCl aqueous solutions by Raman spectroscopy: Towards a new optical sensor. *Applied spectroscopy*, 64(8), 853-857. 2010.

ESTEVIÃO, A.; JUNIOR, F. A. A.; Projeto e Analise de Circuitos Acopladores e Divisores de Sinais na Faixa de Radiofrequencia Utilizando Microlinha de Fita. *Revista Telecomunicações*, v. 16, n.01, p.1-11, 2014.

JACKSON, B., JAYANTHY, T. A novel method for water impurity concentration using microstrip resonator sensor. In *Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change 2010 (RSTS & CC-2010)* (pp. 376-379). IEEE, 2010.

KAPILEVICH, B., LITVAK, B. Microwave sensor for accurate measurements of water solution concentrations. In *2007 Asia-Pacific Microwave Conference* (pp. 1-4). IEEE, 2007.

KOROSTYNSKA, O., ORTONEDA-PEDROLA, M., MASON, A., AI-SHAMMA'A, A. I. Flexible electromagnetic wave sensor operating at GHz frequencies for instantaneous concentration measurements of NaCl, KCl, MnCl₂ and CuCl solutions. *Measurement Science and Technology*, 25(6), 065105, 2014.

KOROSTYNSKA, O., MASON, A., AL-SHAMMA'A, A. Monitoring of Nitrates and Phosphates in Wastewater: Current Technologies And Further Challenges. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 5(1), 2012.

LACERDA, A. B. BACHER L. E., OLIVEIRA, C., ALLGAYER, M., RODRIGUES, M. A. S. A CONDUTIVIDADE DA ÁGUA COMO INDICADOR DE EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE ELETRODIÁLISE, inovamundi, Editora Feevale,. v. 8. p. 4-8. 2015.

MAZZAROPI, M. Sensores de Movimento e Presença, Rio de Janeiro, 2007.

MEDEIROS, T.E. L. Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica. Universidade Federal rural do semiárido Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Mossoró, 2013.

MELILLO, B. Conformal coating stripping method and composition. U.S. Patent n. 3,625,763,1971.

MORAES, M.; Desenvolvimento de uma antena quadribanda GSM integrada. Campinas, SP, 2013.

MORRIS, D. Keysight Technologies, Lakeside, Cheadle Royal Business Park, Stockport SK8 3GR, 2014.

NASCIMENTO, P. F. SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS MANDIBULARES E FORÇAS DE MORDIDA, Curitiba, 2018.

NUNES, R. S. R. Geometria Fractal e Aplicações, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto Janeiro, 2006.

OORT, J. V. Fractais. Nasser. Disponível em: <[HTTP://JASSER.NL/ABOUT/FRACTAL-GEOMETRY/](http://jasser.nl/about/fractal-geometry/)>. Acesso em: 10 de Ago. de 2019.

OPENSTAX, Water. Rice University. OpenStax and Cnx Biology. 2015.

ORTONEDA-PEDROLA, M., KOROSTYNSKA, O., MASON, A., & AL-SHAMMA'A, A. I. Real-Time Sensing Of Nacl Solution Concentration at Microwave Frequencies Using Novel Ag Patterns Printed On Flexible Substrates . In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 450, No. 1, p. 012016, 2013.

PODHOSTNIK, J.; Fractal Structures, Ljubljana, 2012

POZAR, D. M.; Microwave Engineering, editora John Wiley & Sons, Inc. United States of America, 2011.

ROSEN, R. Mass spectrometry for monitoring micropollutants in water. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 246-251, 2007.

SADIKU, Matthew NO. Elementos de Eletromagnetismo, terceira edição, 2004.

SILVA, J. E. S. et al, Análise fractal da vascularização da membrana corioalantóide de embriões de codornas japonesas (*Coturnix japonica*), 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, 2008.

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F. P. Métodos de pesquisa. Editora da UFRGS, p. 31–42, 2009. SUITE, D. Micro wave. p. 7–8, [s.d.].

SOUZA, L. A. "Compostos iônicos: definição e características principais"; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/compostos-ionicos-definicao-caracteristicas-principais.htm>>. Acesso em 13 de novembro de 2019.

TREVISAN, M. G.; POPPI, R. J. Química analítica de processos. *Química Nova*, 2006, 29.5: p 1065-1071.

VUČKOVIĆ, V. et al, The Fractal Nature Approach in Ceramics Materials and Discrete Field Simulation, *Science of Sintering*, 50, p. 371-385, 2018.

WENDLING, M. Sensores. UNESP. Guaratinguetá, 2010.

WENTWORTH, S. M. Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de transmissão. Editora Bookman, 2009.

WERLANG, V. Estudo Teórico Experimental da Condutividade – Soluções Iônicas. Ponta Grossa, 2015.

YAMAUCHI L. C., ZENTENO B. P., ASTETE A. M. LUNA E. B. Guía de Prácticas de Química Universidad de Ciencias Aplicadas (UPC). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas-UPC. Perú, 2013.

7. APÊNDICE

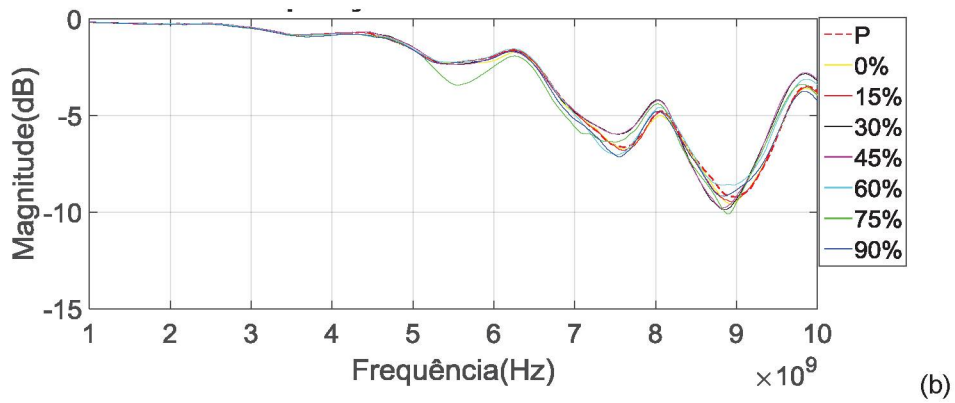
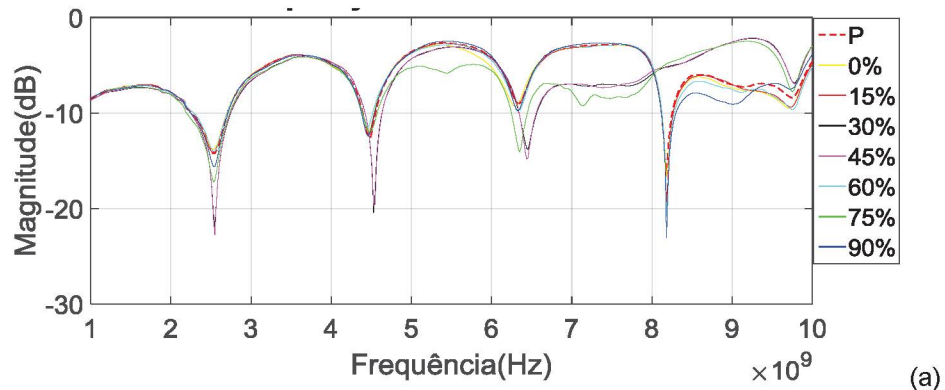
Dados experimentais coletados com diferentes quantidades de soluções de NaCl inseridas na placa, para as 5 diferentes geometrias fractais, onde para a análise foram utilizados amostras de solução com diferentes proporções, 1g, 3g, 5g, 7g, 9g e 11g, aqui temos os dados para as primeiras 5 quantidades, uma vez que 11g já esta descrita no interior deste trabalho.

Cada amostra estudada foi experimentada obedecendo as mesmas característica de montagem e fabricação. A seguir temos gráficos que demonstram o comportamento dos parâmetros transmissão e reflexão (Parâmetros S) de cada uma das proporções.

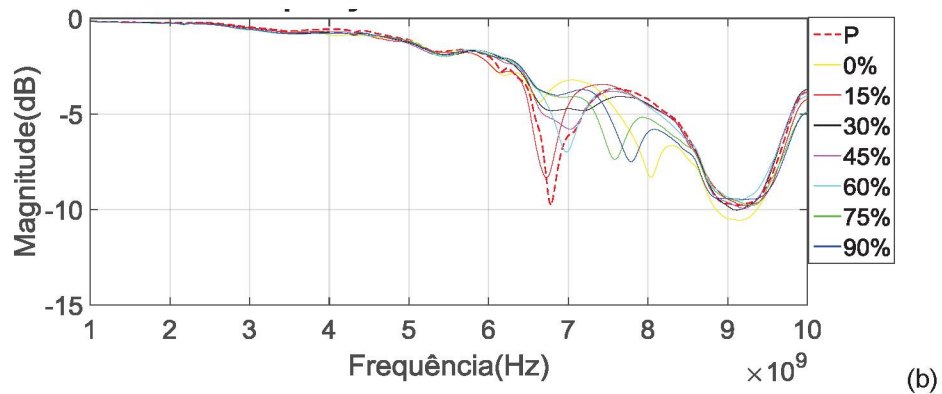
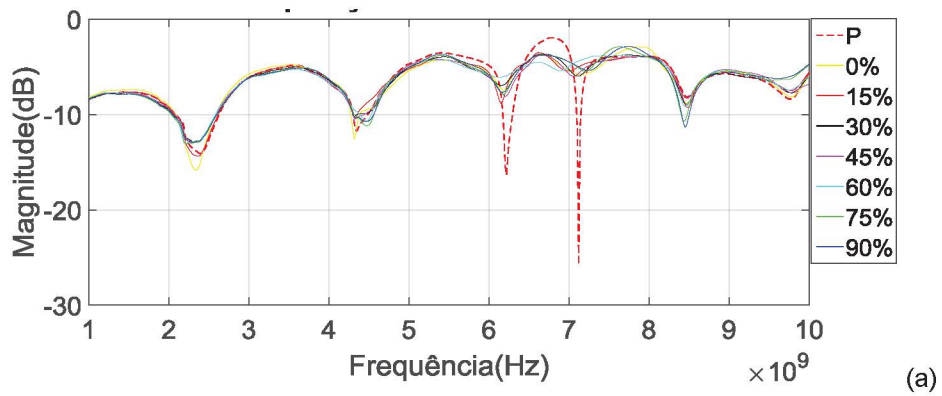
Foram efetuados 10 ensaios experimentais para cada amostra, que consequentemente nos proporcionaram o cálculo da média, utilizado para descrever os parâmetros S, dessa forma podemos comparar como cada onda eletromagnética se comporta para as diferente quantidades de solução salina.

A seguir temos os gráficos de comparação de resultados entre Magnitude e porcentagem de NaCl e o comportamento da sensibilidade de resposta para cada geometria, sempre visando os parâmetros S_{11} e S_{21} .

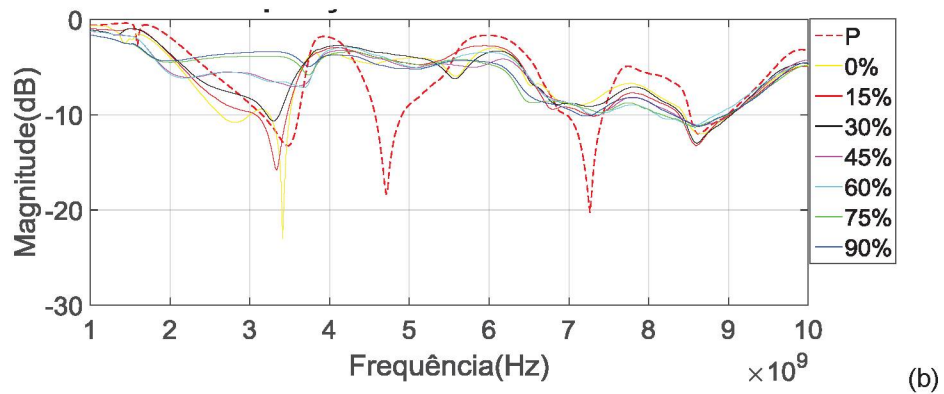
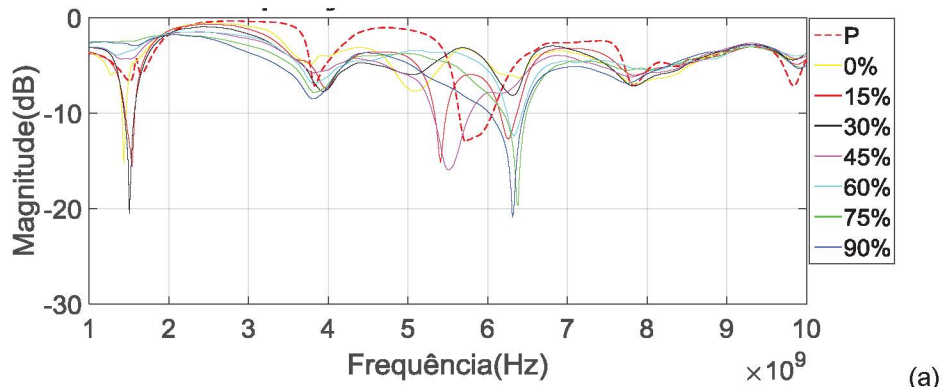
- Comparação De Soluções

GRÁFICO 13 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

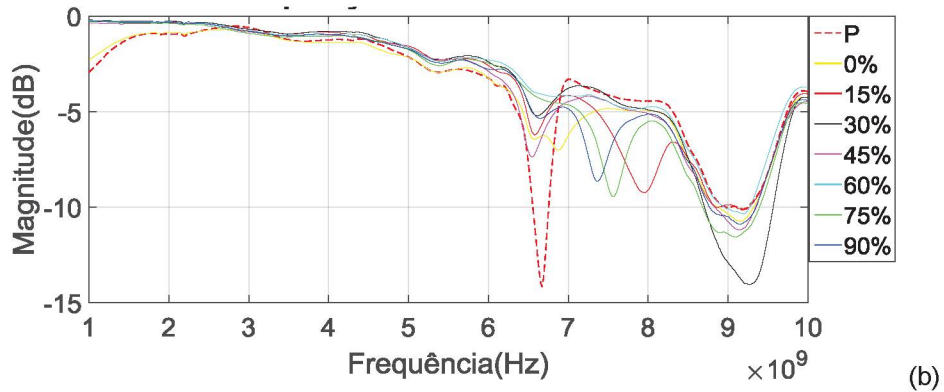
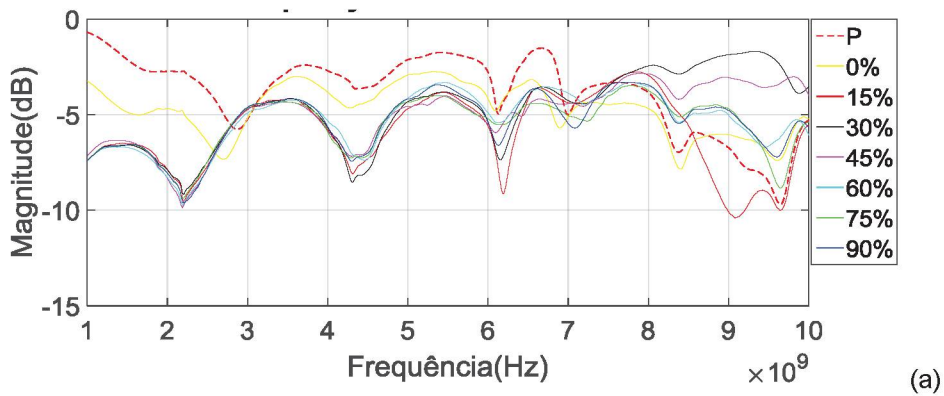
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 214 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

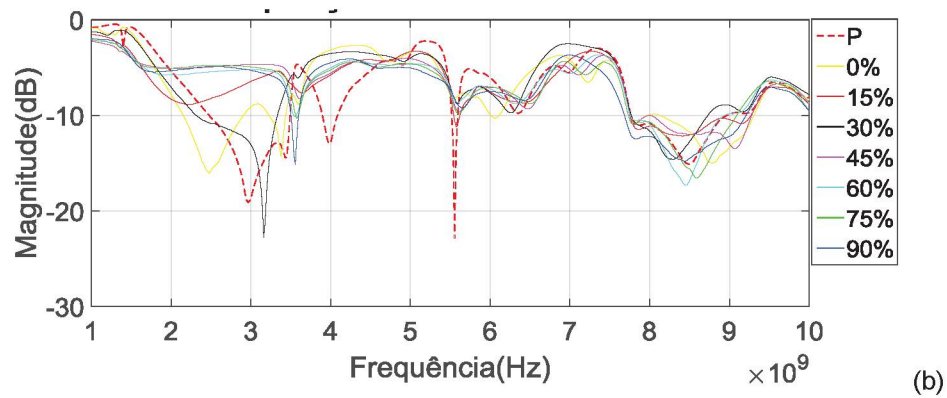
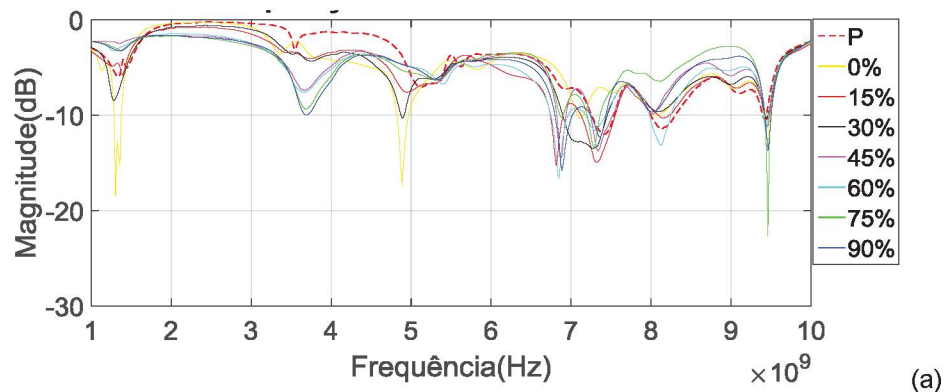
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 315 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

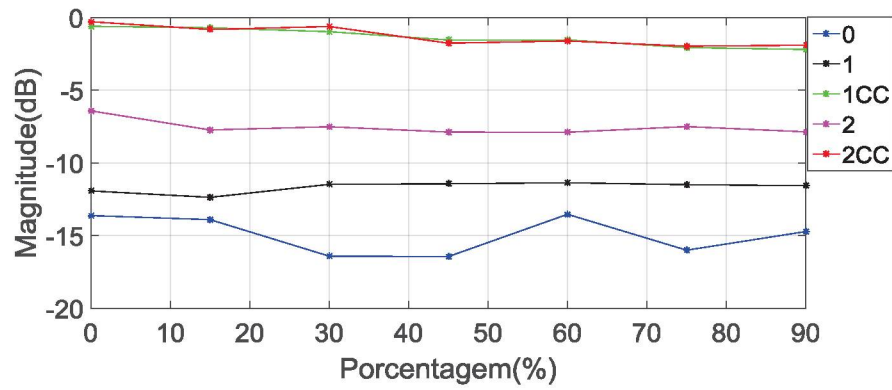
GRÁFICO 416 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

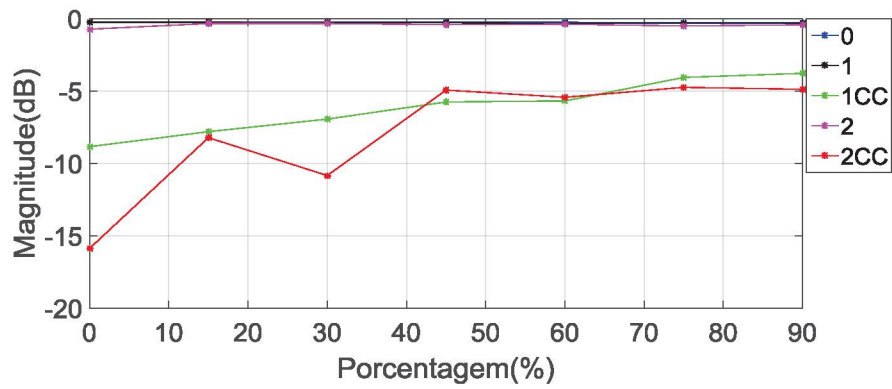
GRÁFICO 5 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

- Comparação de soluções em termos de porcentagem

GRÁFICO 617 -- PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

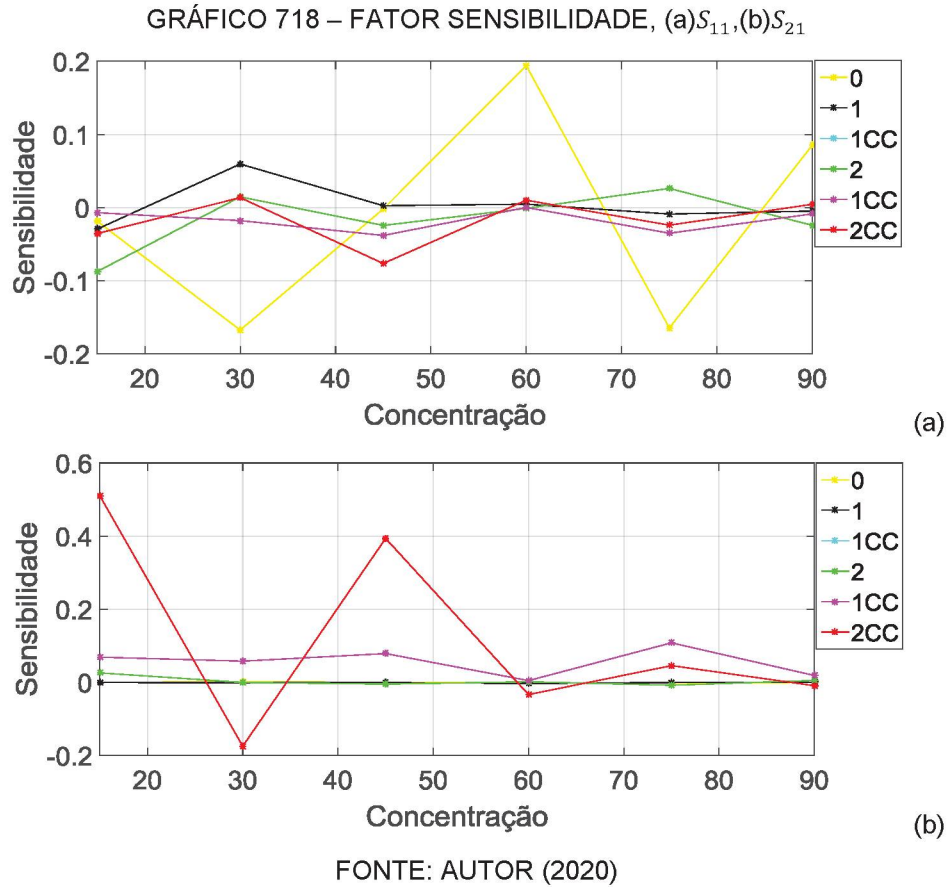
(a)



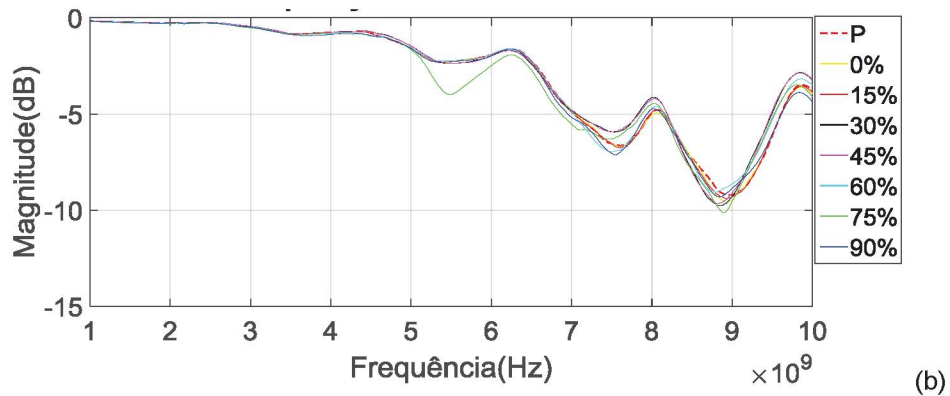
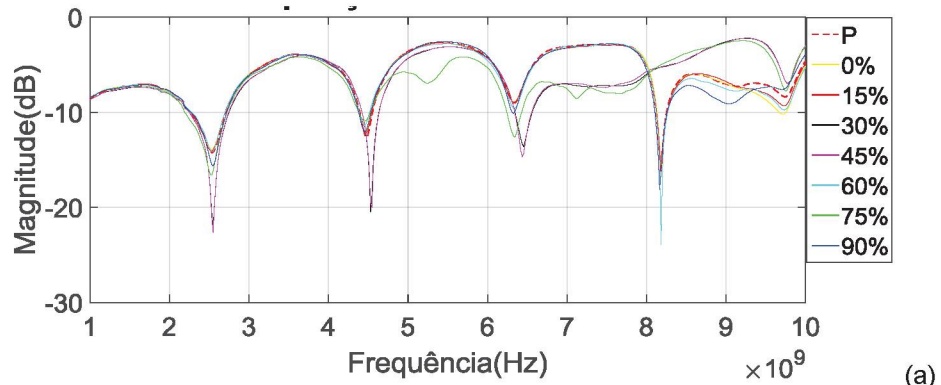
(b)

FONTE: AUTOR (2020)

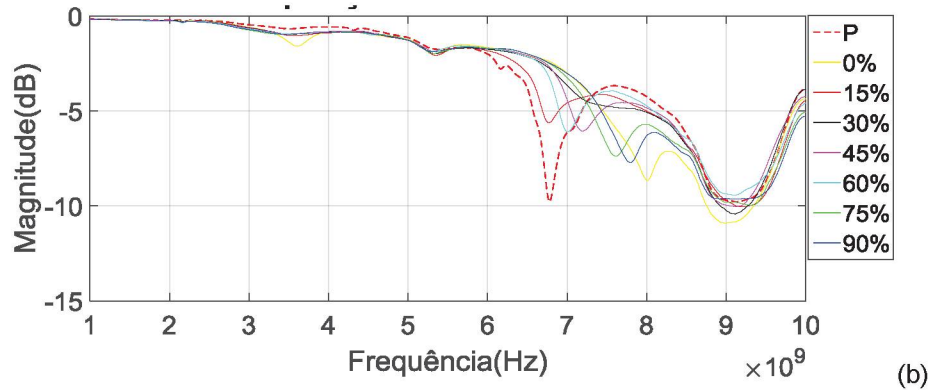
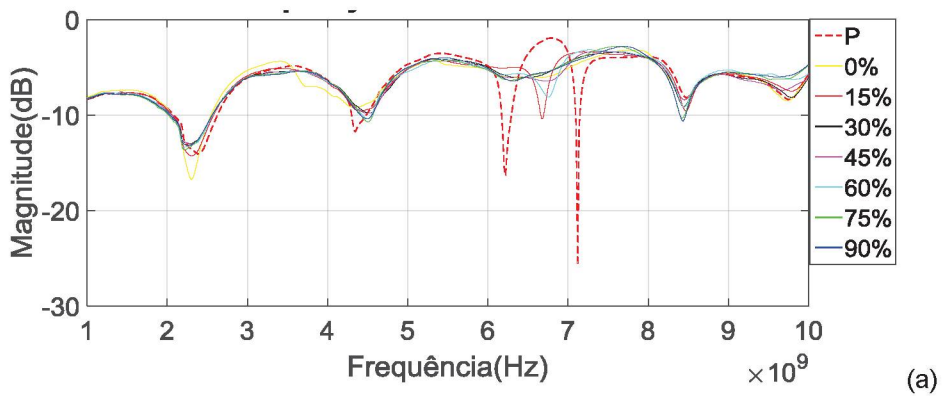
- Fator sensibilidade



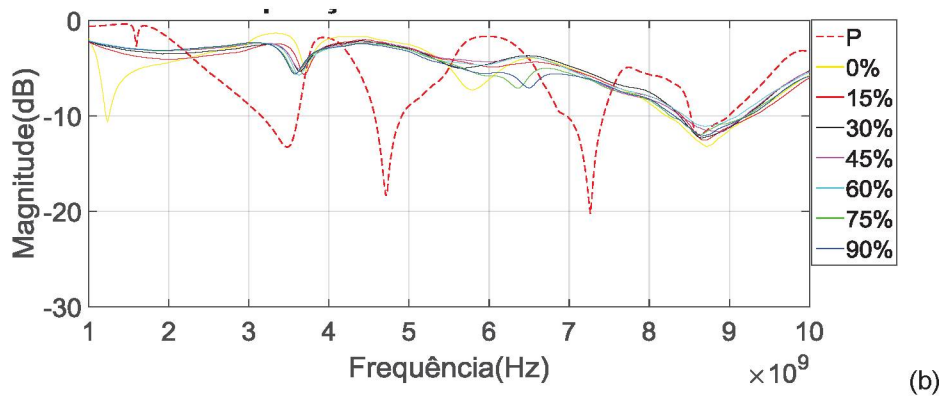
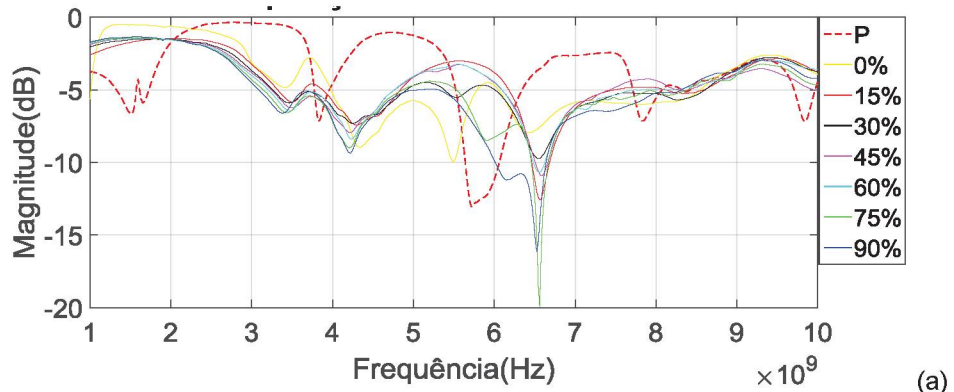
- Sistema Experimental utilizado três grama (3g) de solução na placa
 - Comparação de soluções

GRÁFICO 8 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

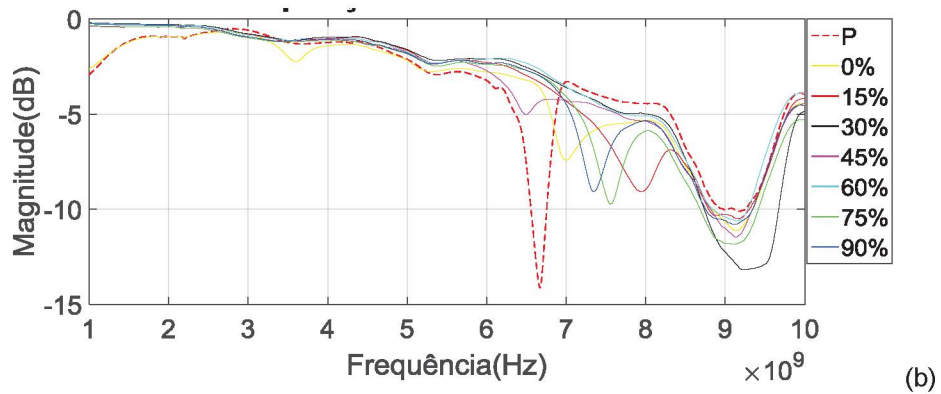
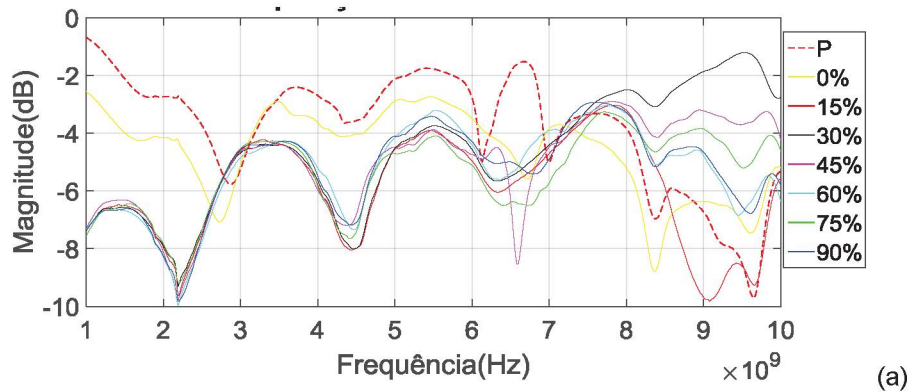
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 919 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

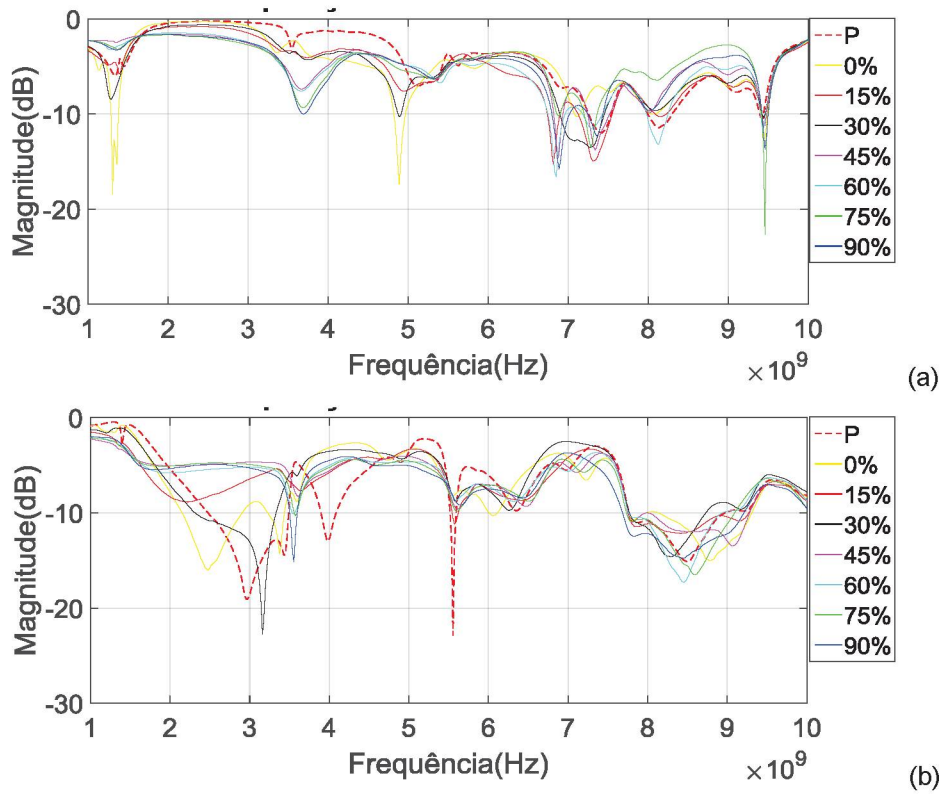
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 10 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

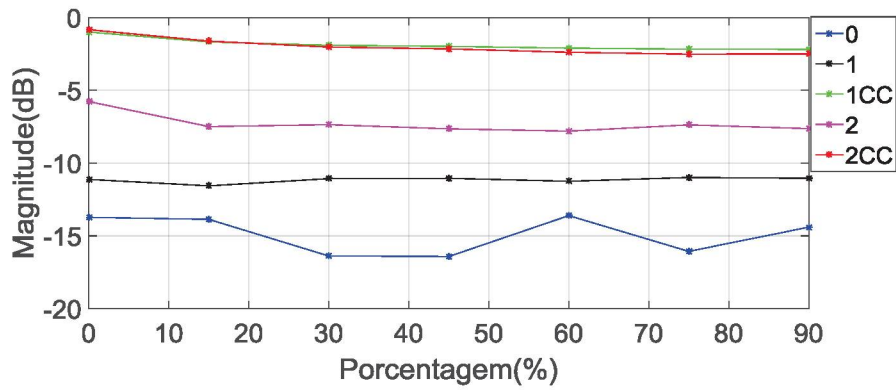
GRÁFICO 1120 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

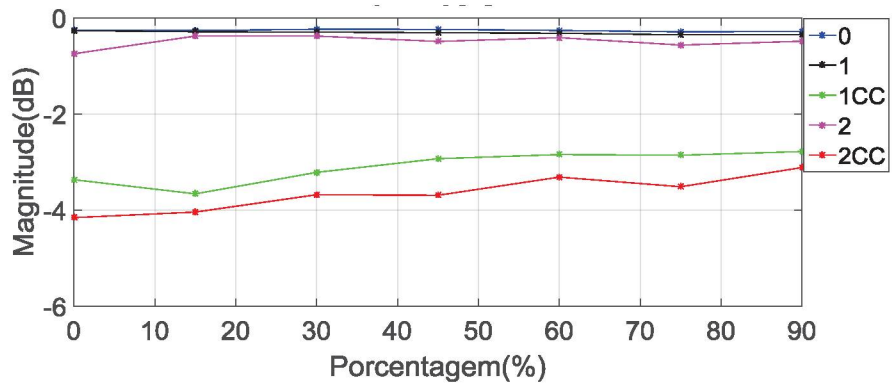
GRÁFICO 12 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

- Comparação de soluções em termos de porcentagem

GRÁFICO 13 – – PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

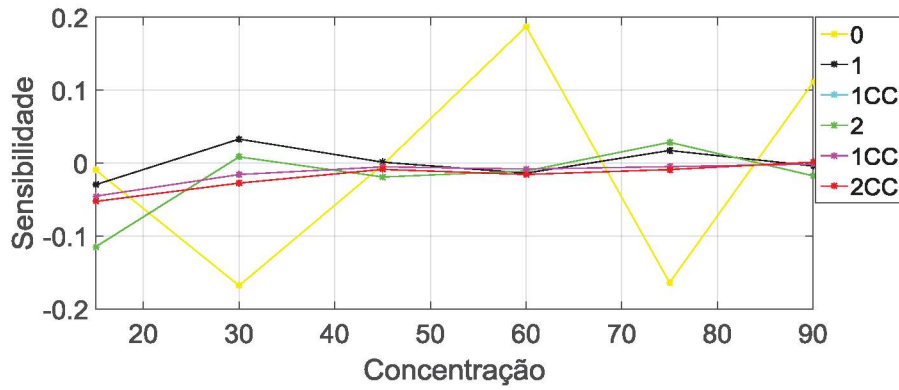
(a)



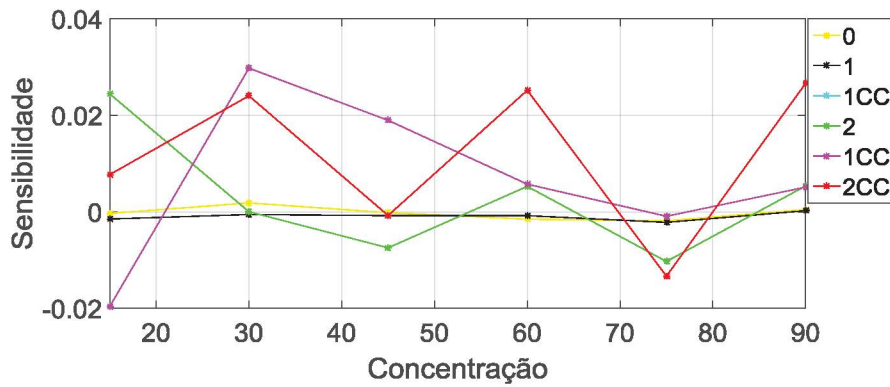
(b)

FONTE: AUTOR (2020)

- Fator sensibilidade

GRÁFICO 14 – FATOR SENSIBILIDADE, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

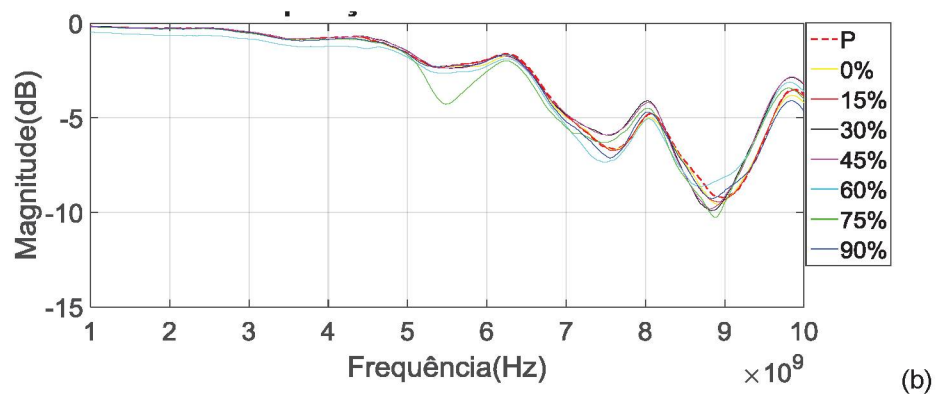
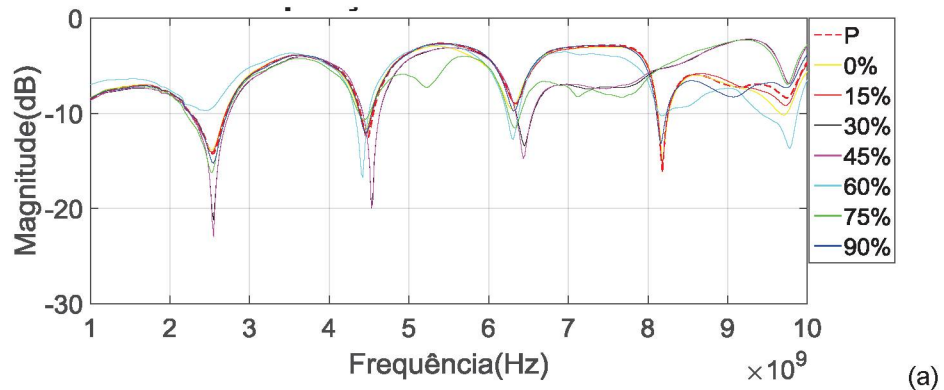
(a)



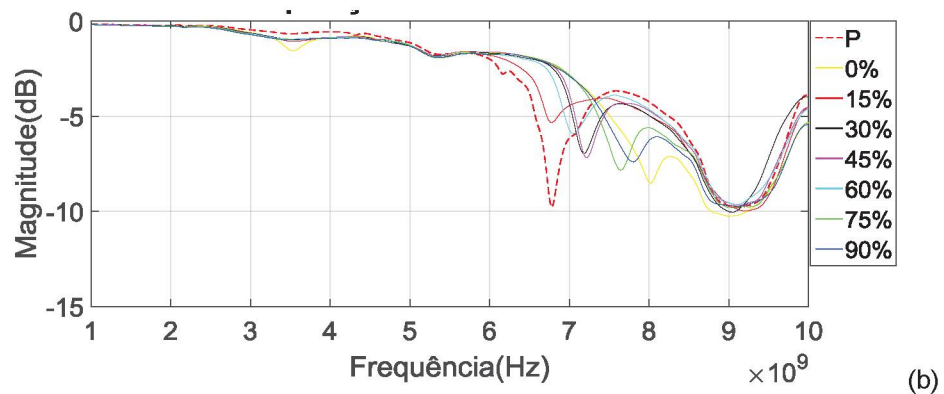
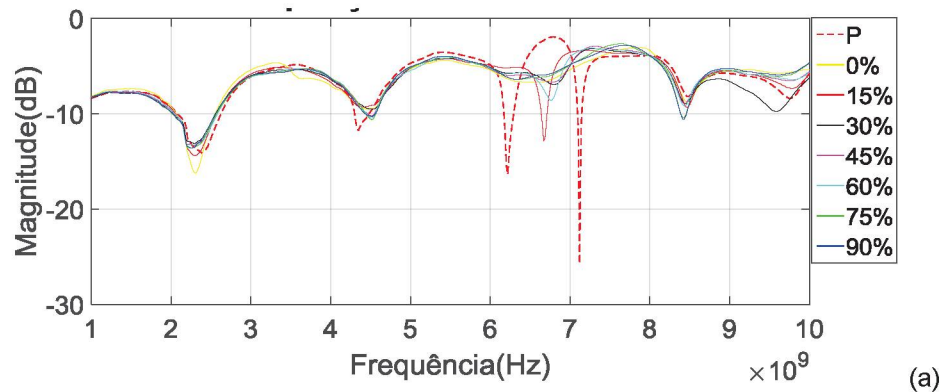
(b)

FONTE: AUTOR (2020)

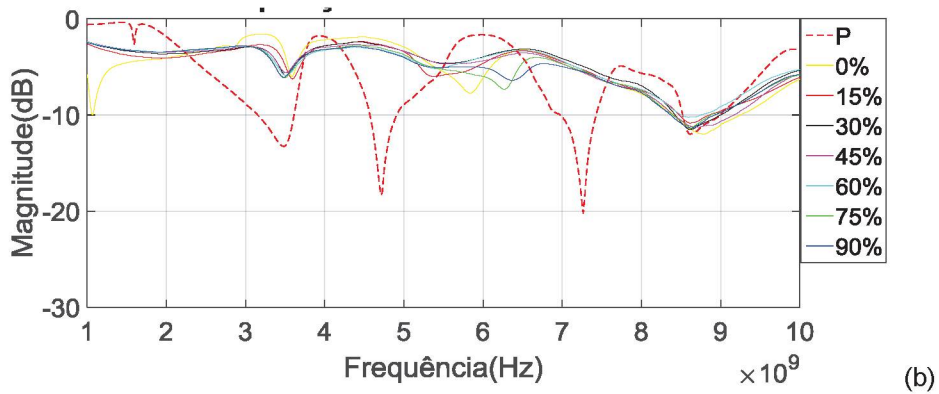
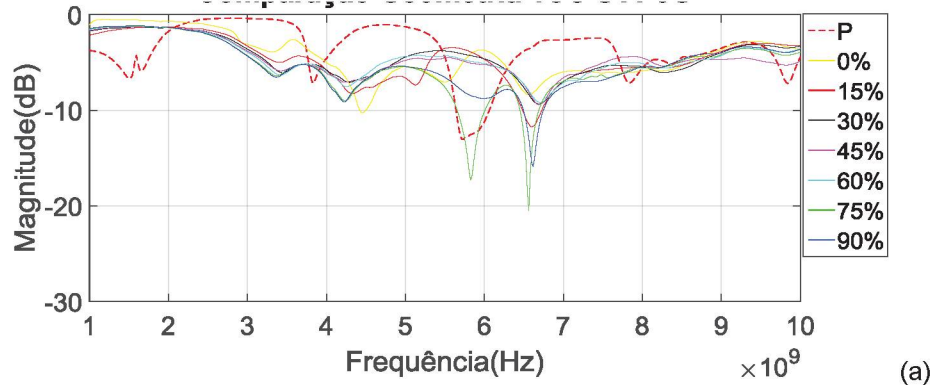
- Sistema Experimental utilizado cinco grama (5g) de solução na placa
 - Comparação de soluções

GRÁFICO 15 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

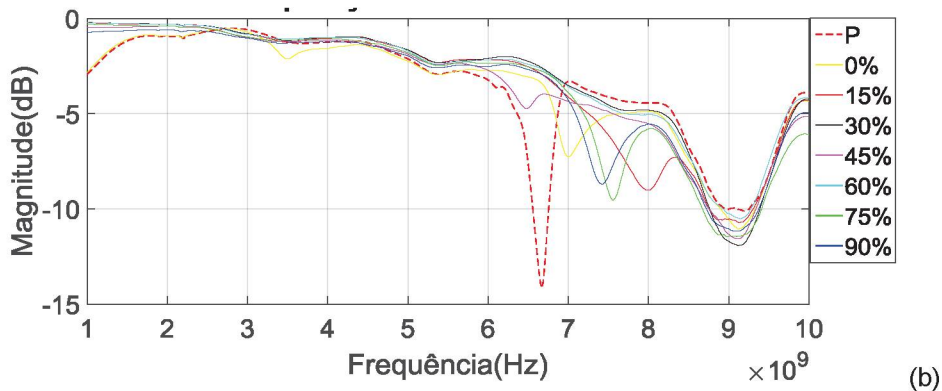
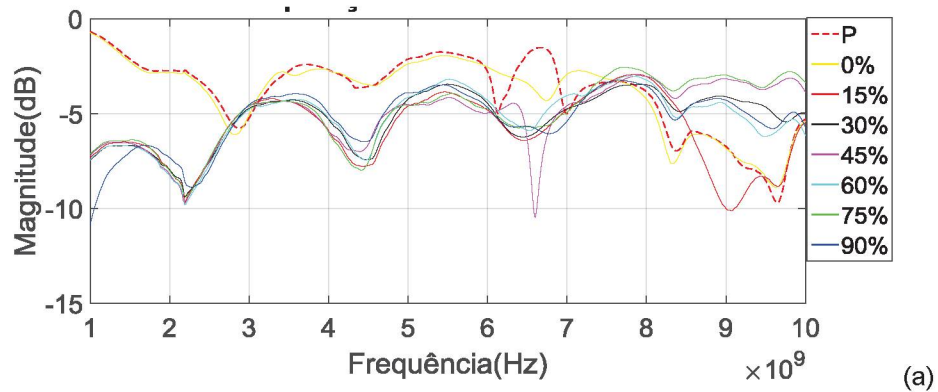
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 1621 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

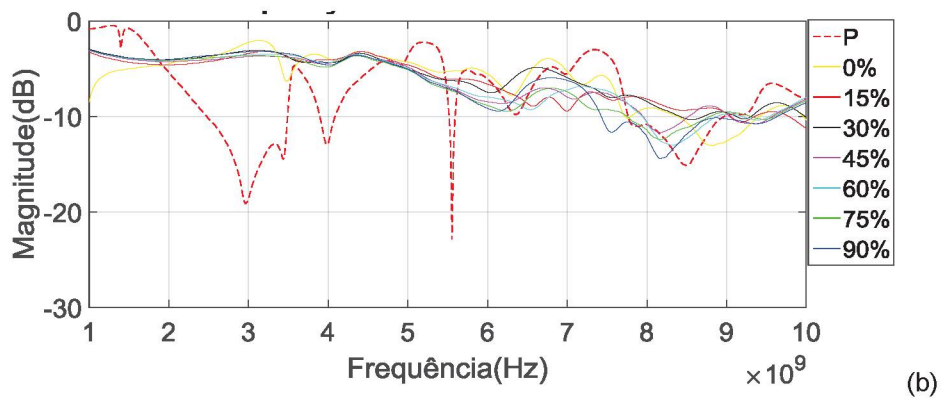
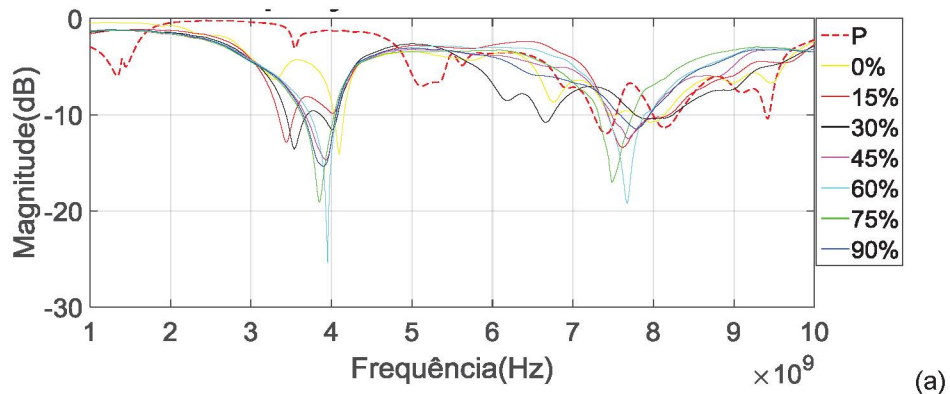
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 17 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

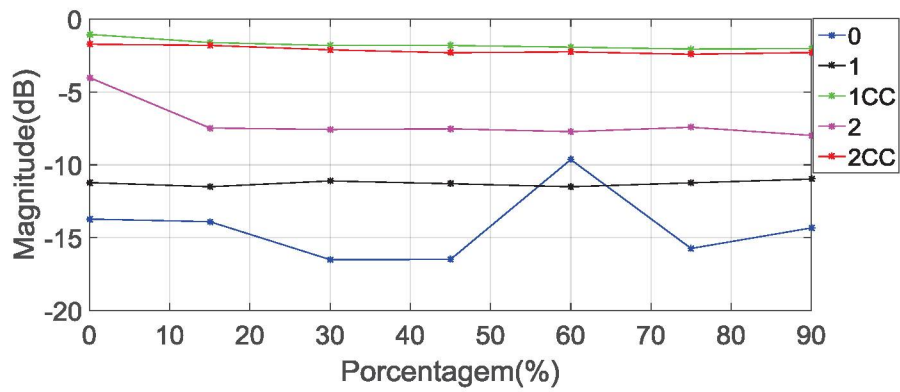
GRÁFICO 1822 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

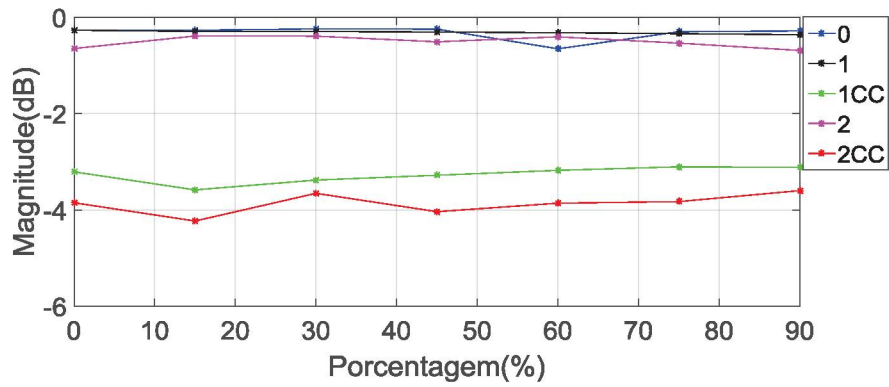
GRÁFICO 1923 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

- Comparação de soluções em termos de porcentagem

GRÁFICO 20 – PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

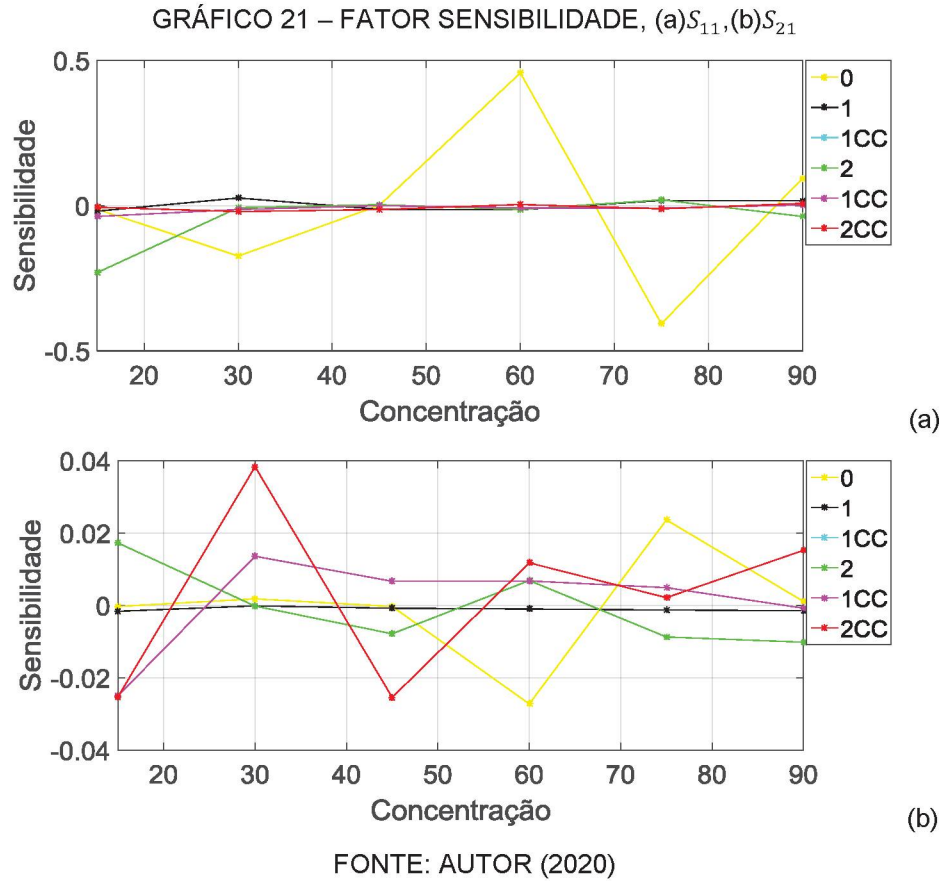
(a)



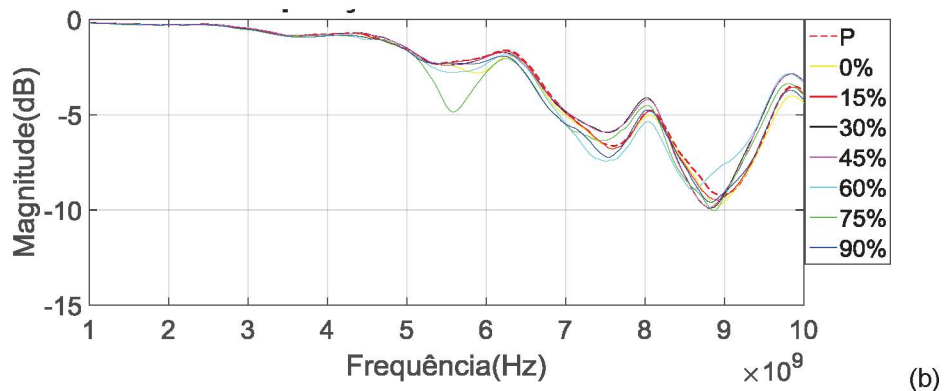
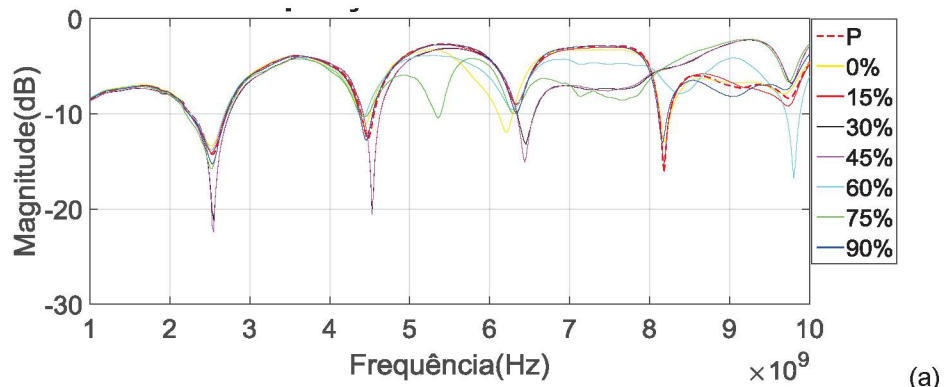
(b)

FONTE: AUTOR (2020)

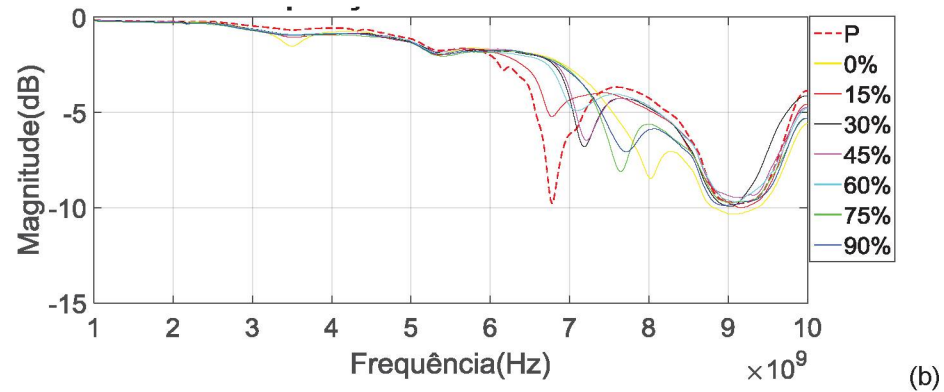
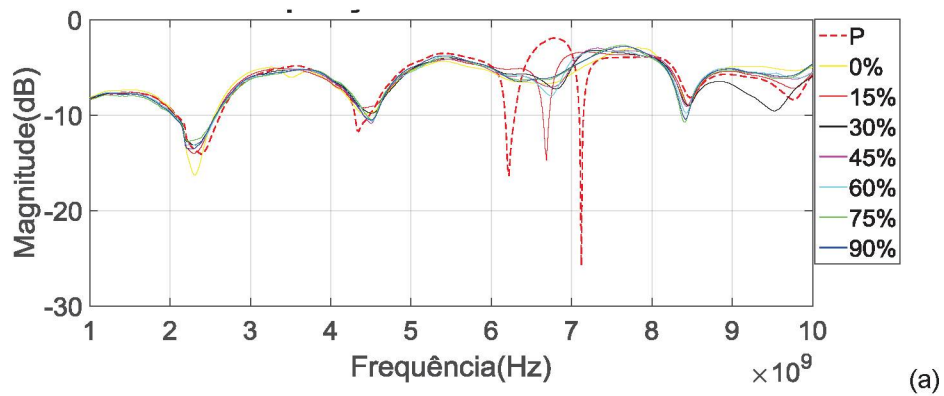
- Fator sensibilidade



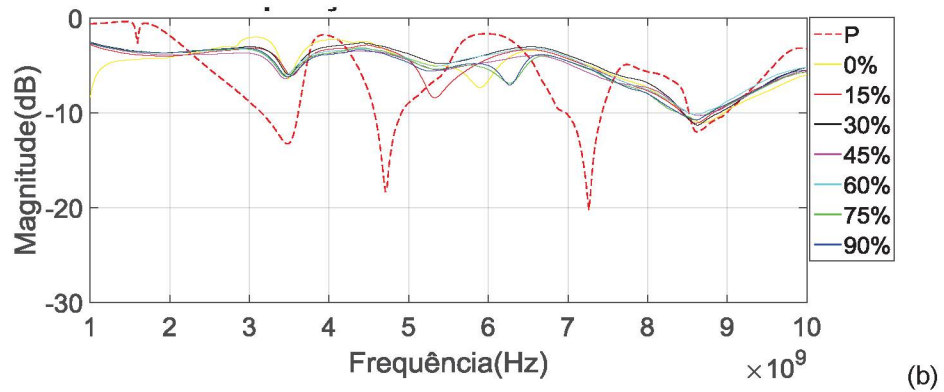
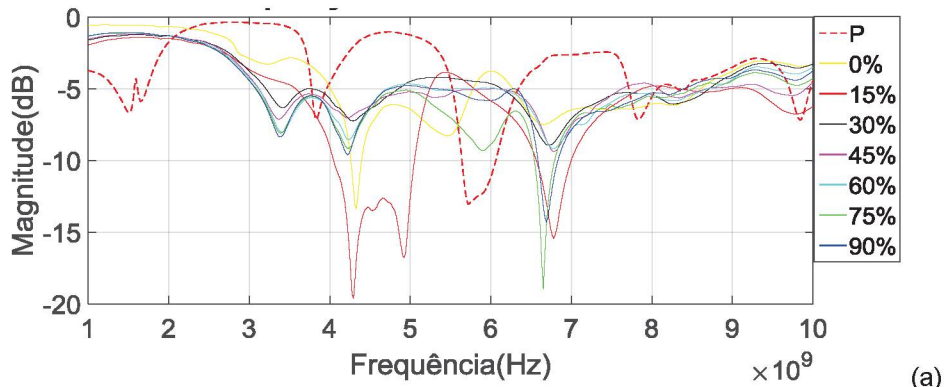
- Sistema Experimental utilizado sete grama (7g) de solução na placa
 - Comparação de soluções

GRÁFICO 22 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

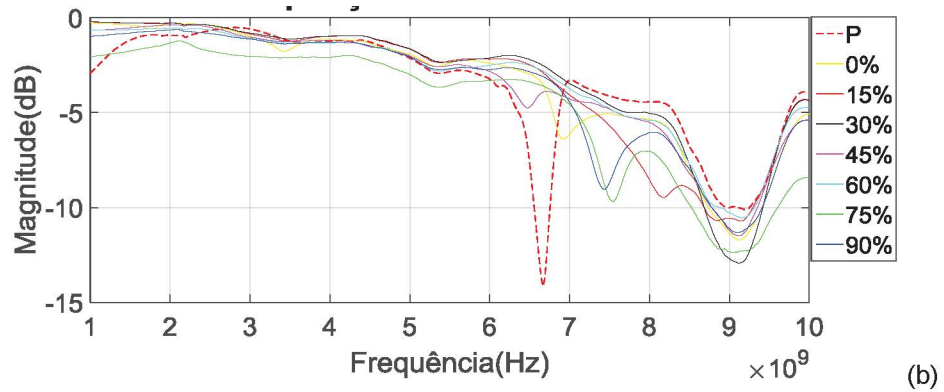
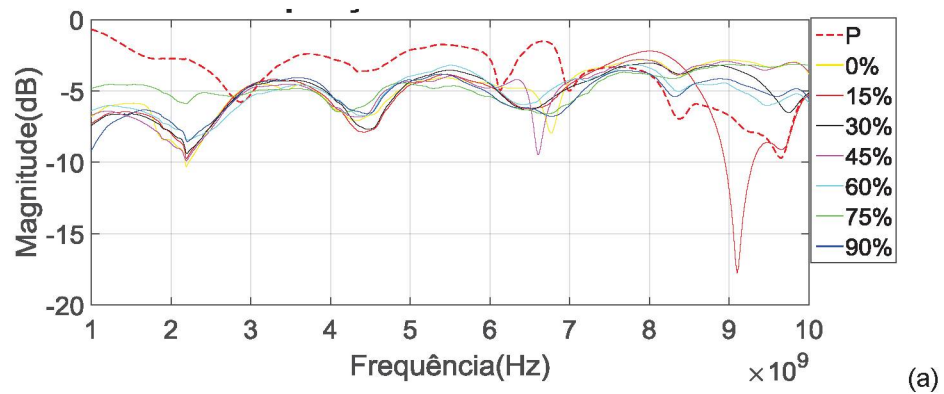
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 23 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

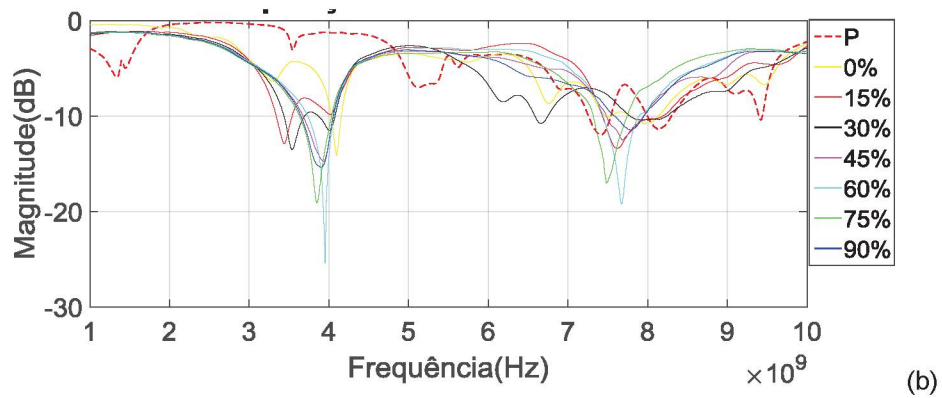
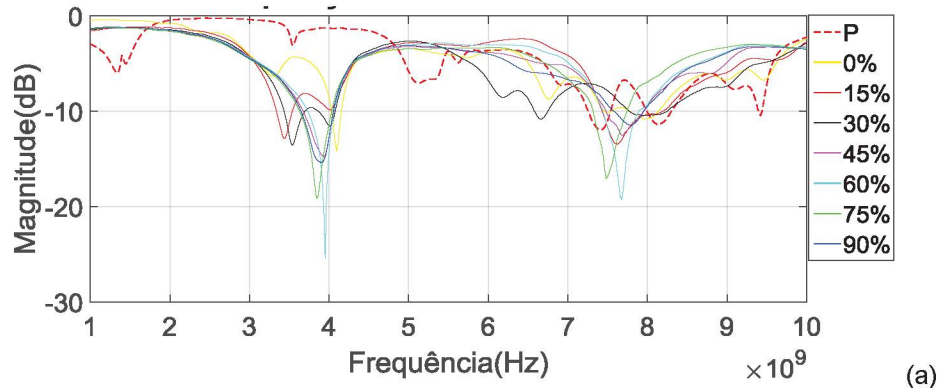
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 24 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

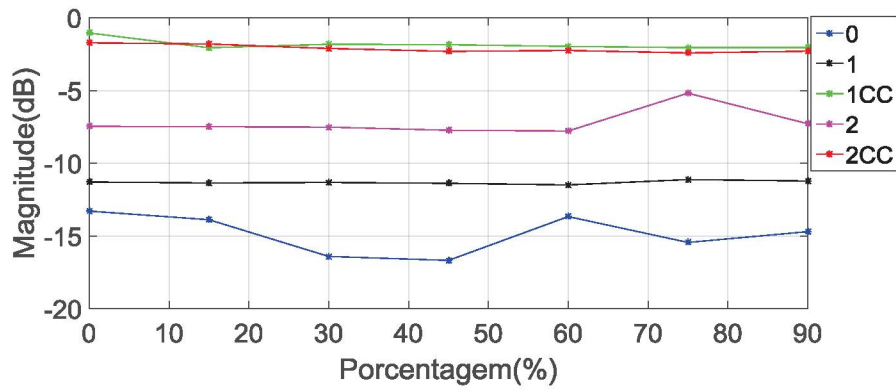
GRÁFICO 25 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

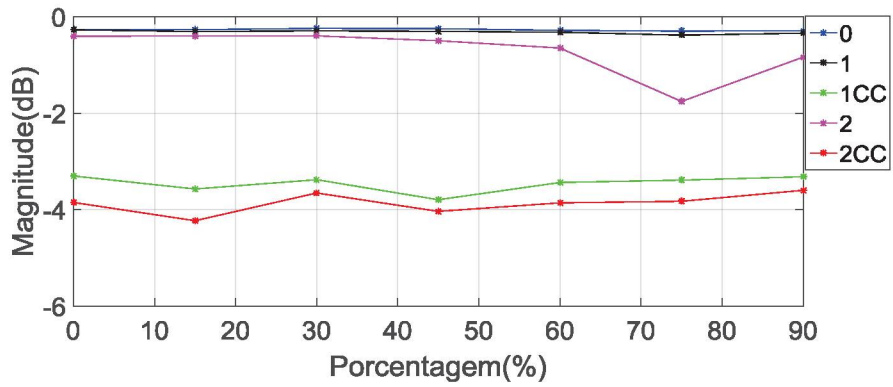
GRÁFICO 26 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

- Comparação de soluções em termos de porcentagem

GRÁFICO 2724 -- PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

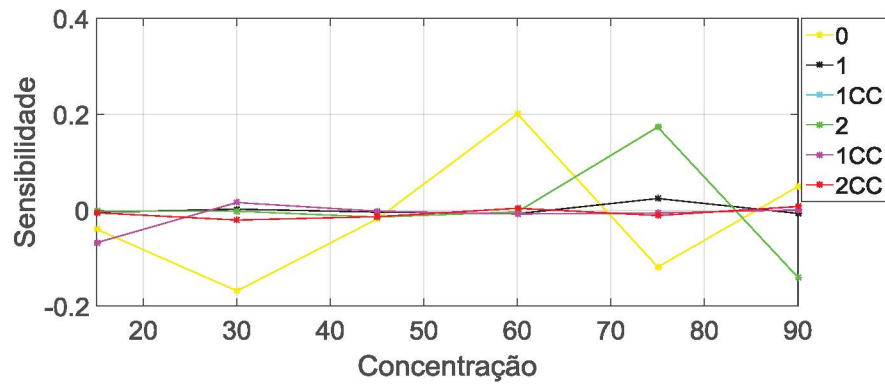
(a)



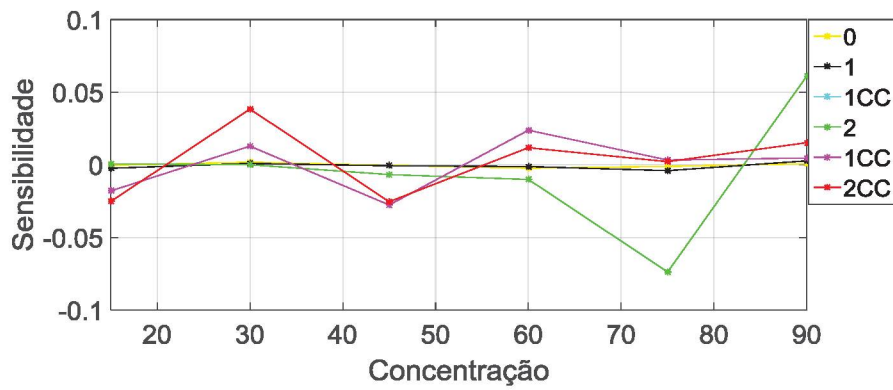
(b)

FONTE: AUTOR (2020)

- Fator sensibilidade

GRÁFICO 2825 – FATOR SENSIBILIDADE, (a) S_{11} ,(b) S_{21} 

(a)

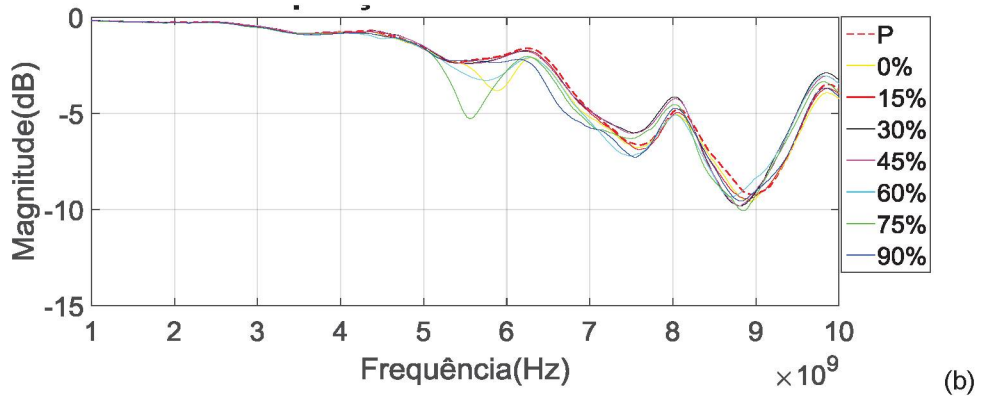
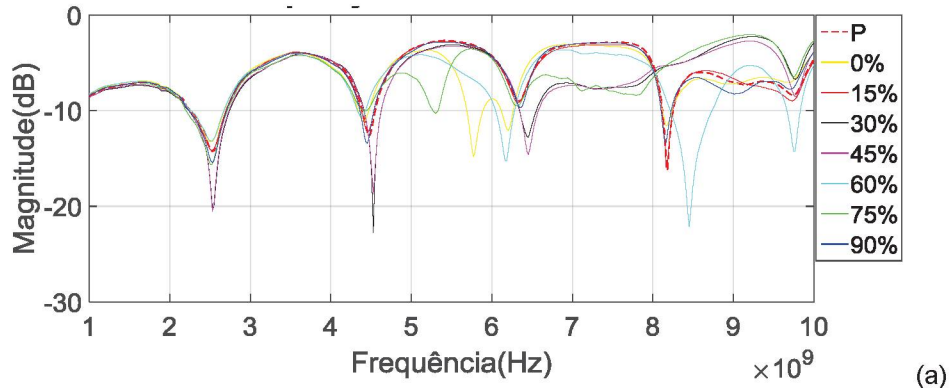


(b)

FONTE: AUTOR (2020)

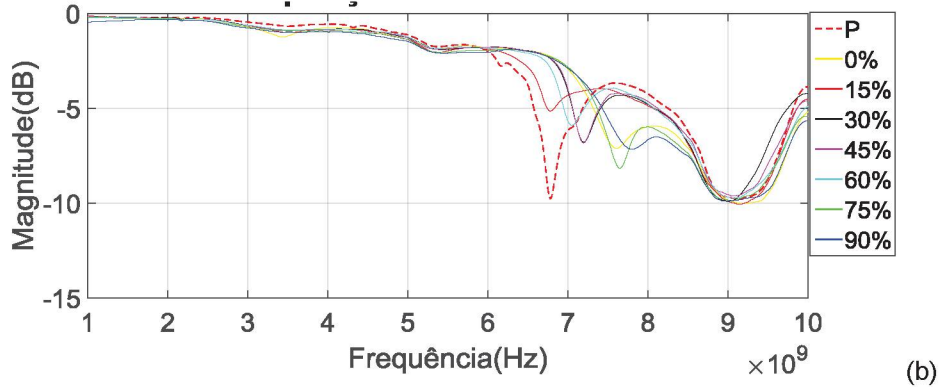
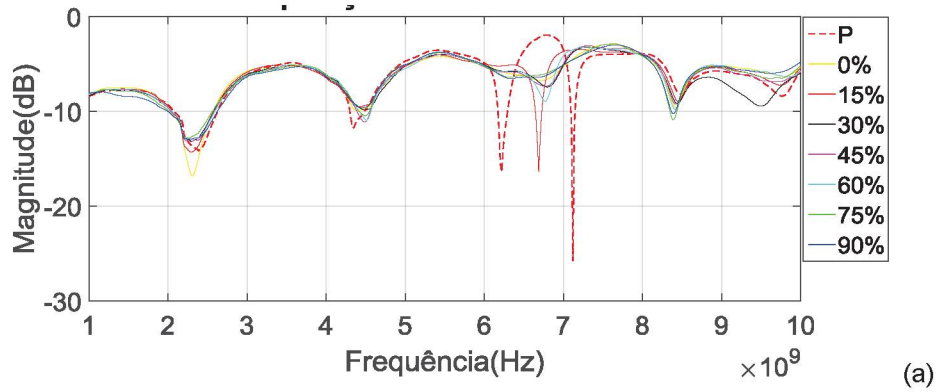
- Sistema Experimental utilizado nove grama (9g) de solução na placa
 - Comparação de soluções

GRÁFICO 2926 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 0, (a) S_{11} , (b) S_{21}

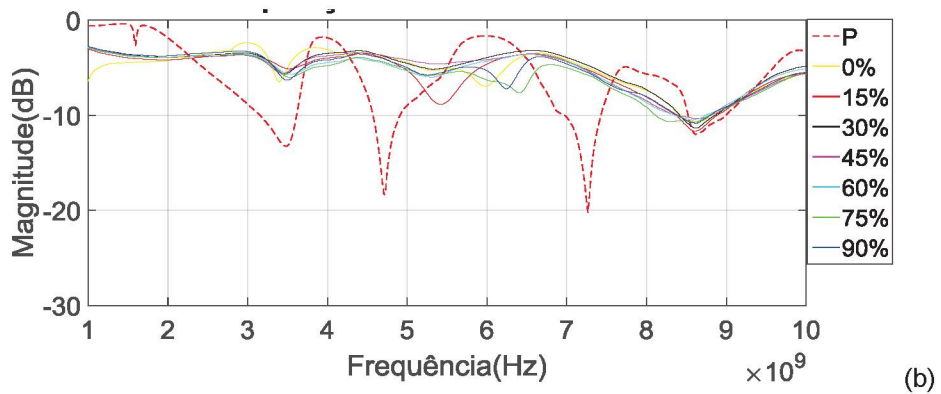
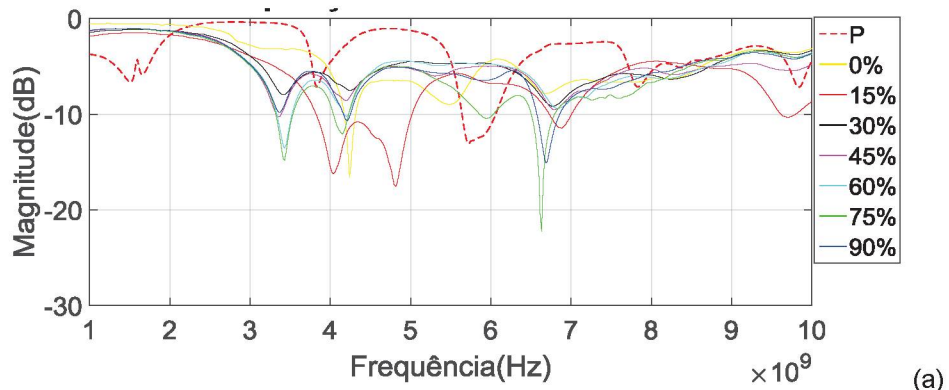


FONTE: AUTOR (2020)

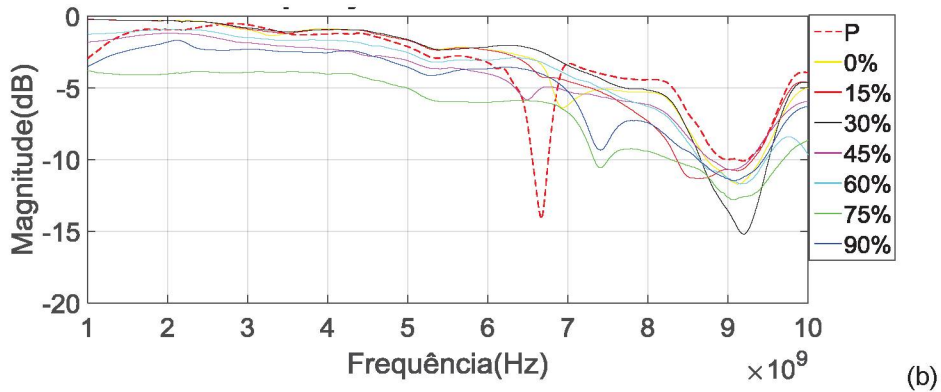
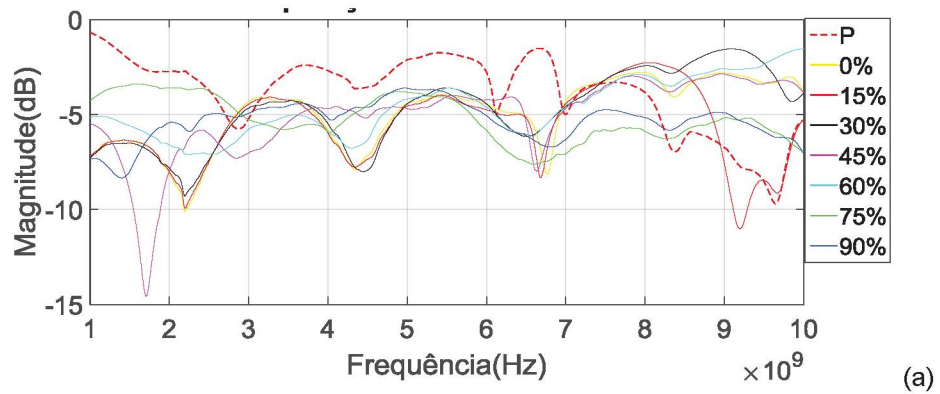
GRÁFICO 30 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1, (a) S_{11} , (b) S_{21}



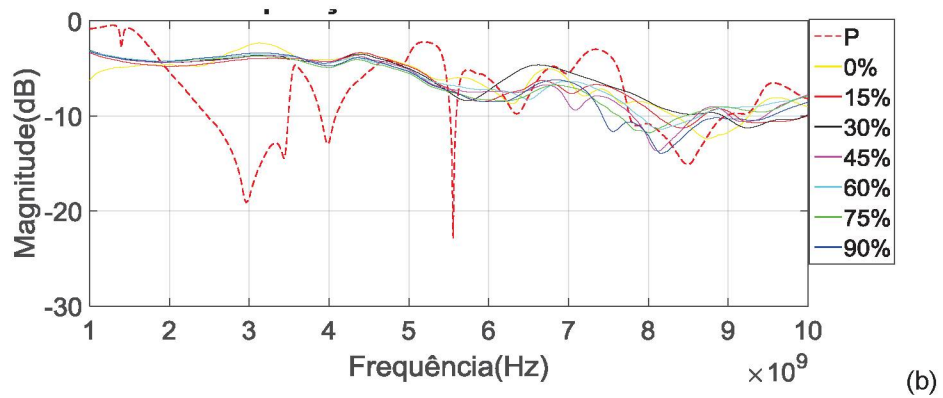
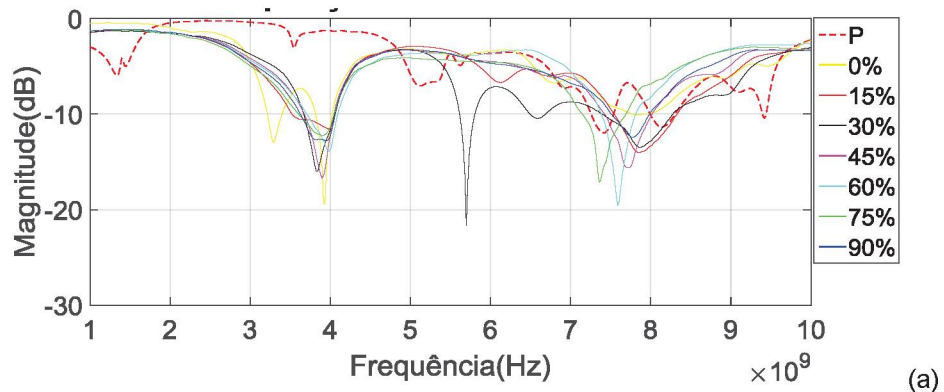
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 3127 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 1CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 32 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

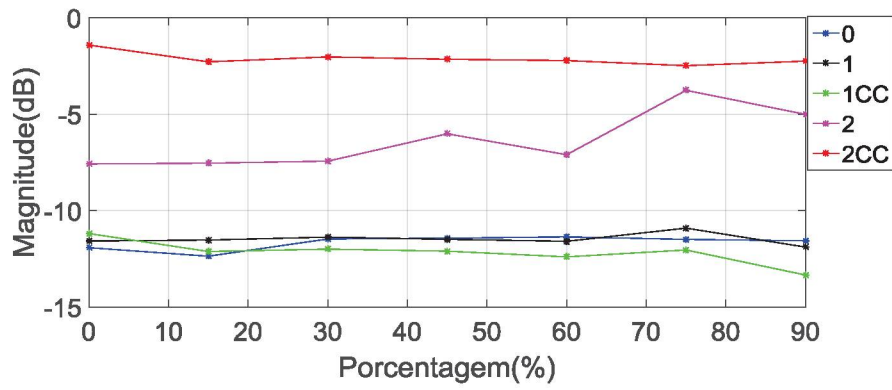
FONTE: AUTOR (2020)

GRÁFICO 3328 – COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES GEOMETRIA 2CC, (a) S_{11} , (b) S_{21} 

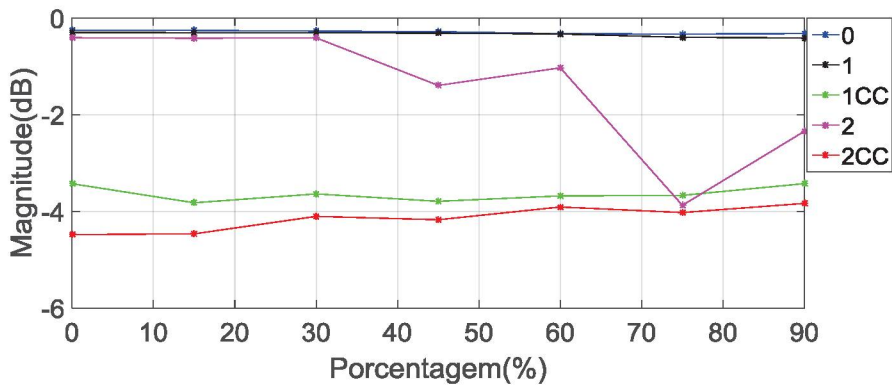
FONTE: AUTOR (2020)

- Comparação de soluções em termos de porcentagem

GRÁFICO 3429 -- PARÂMETROS S EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SALINA, (a) S_{11} ,(b) S_{21}



(a)

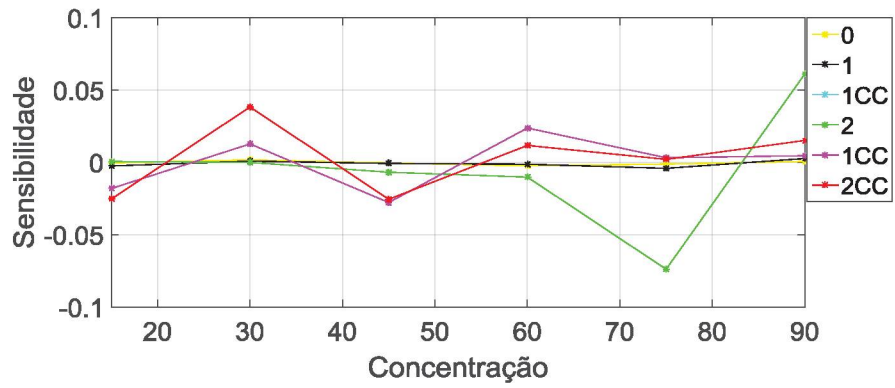


(b)

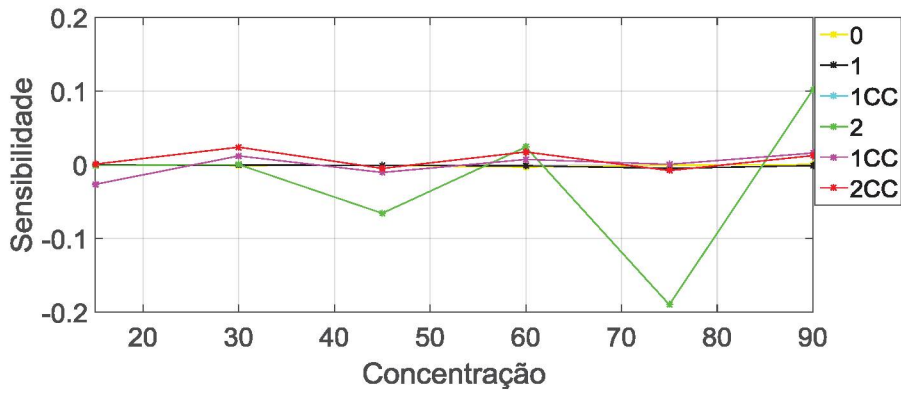
FONTE: AUTOR (2020)

- Fator sensibilidade

GRÁFICO 35 – FATOR SENSIBILIDADE, (a) S_{11} ,(b) S_{21}



(a)



(b)

FONTE: AUTOR (2020)