



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA EM
AMBIENTES *INDOOR*

CARAÚBAS-RN

2019

MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA EM
AMBIENTES *INDOOR***

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Caraúbas, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Walber Medeiros Lima - UFERSA

Coorientador: Me. Juan Rafael Filgueira Guerra

CARAÚBAS-RN

2019

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

AA447 Almeida, Milena Bezerra de.
e Estudo da aplicação de superfícies seletivas em frequência em
ambientes indoor / Milena Bezerra
de Almeida. - 2019.
64 f. : il.
Orientador: Walber Medeiros Lima. Coorientador: Juan
Rafael Filgueira Guerra. Monografia (graduação) -
Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2019.
1. Superfície Seletiva em Frequência. 2. Caracterização
elétrica . 3. Permissividade elétrica. I. Lima, Walber
Medeiros, orient.
II. Guerra, Juan Rafael Filgueira, co-orient.
III. Título.

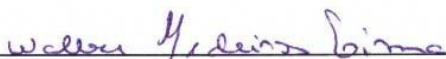
MILENA BEZERRA DE ALMEIDA

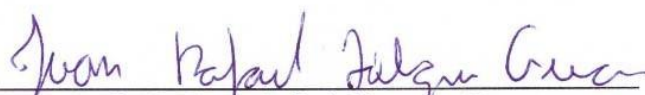
**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA EM
AMBIENTES *INDOOR***

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Caraúbas, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

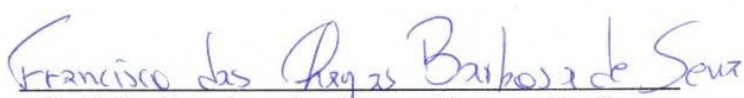
Defendida em: 19 de março de 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Walber Medeiros Lima
Presidente


Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra
Membro


Prof. Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia
Membro


Prof. Dr. Francisco das Chagas Barbosa De Sena
Membro

*Ao meu avô e eterno velhinho José Almeida
(In memoriam) e minha avó, Terezinha
Tavares da Silva (In memoriam).*

Dedico a Deus e a minha família, que são
peças fundamentais para eu ter chegado até
aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela Tua graça e infinita generosidade, pois em todo momento sinto a Tua mão me amparando e o Teu amor me guiando.

Aos meus pais, Rita Maria de Almeida Medeiros e Bezerra e Marciel Eloi Bezerra, pelo amor, ensino e dedicação a mim, sem os quais não teria chegado até aqui.

Aos meus irmãos, João Marcos Bezerra de Almeida e Ramon Rogeris de Medeiros Bezerra pelo cuidado e apoio.

A toda minha família, em especial minha avó Benigna Medeiros de Almeida, a matriarca da família que nos sustenta com sua sabedoria e amor.

Ao meu namorado, Fernando Thailson de Morais Gama, por ter estado comigo em todos os momentos, mostrando seu companheirismo e atenção. A quem tenho muito amor.

A todos os meus amigos que trago a longa data e aqueles que a UFERSA me presenteou.

Ao meu orientador Prof. Dr. Walber Medeiros Lima e ao coorientador Me. Juan Rafael Filgueira Guerra, por todo o conhecimento repassado, a quem tenho muita admiração e respeito.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os
seus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios 16:3

RESUMO

No presente trabalho é proposto um estudo sobre a aplicação de superfície seletiva em frequência *single-band* que filtre os sinais de 2,45 GHz de acordo com o padrão *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 802.11 em um ambiente *indoor*. Nesta perspectiva, realizou-se a caracterização elétrica em 20 amostras de materiais de construção civil com o intuito de explorar a permissividade elétrica desses materiais, e com isso investigar o comportamento de uma superfície seletiva em frequência com *patch* condutor que atue como um filtro rejeita-faixa nessas amostras. A caracterização elétrica dos materiais foi feita através do método da linha coaxial em uma faixa de frequência de 1 à 10 GHz. Desse modo foi extraído os valores de permissividade nas frequências desejadas. Diante desses valores, simulou-se as superfícies seletivas em frequência para uma amostra de cada tipo de material, à vista disso os resultados para o coeficiente de transmissão em relação a frequência foram obtidos utilizando o *software ANSOFT HFSS*. Através da análise dos dados computacionais adquiridos é possível verificar o comportamento característico de filtro rejeita-faixa com largura *single-band* em todas as amostras.

Palavras-chave: Superfície Seletiva em Frequência; Caracterização elétrica; Permissividade elétrica.

ASBTRACT

In the present work is proposed a study about the application of a frequency selective on single-band surface that filters the 2.45 GHz signal according to the standard Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) 802.11 in an indoor environment. In this perspective, it was made the electrical characterization in 20 samples of civil construction materials in order to explore the electrical permissiveness of these materials, and thus investigate the behavior of a selective surface in frequency with conductor patch which acts as a reject-band filter on these samples. The electrical characterization of the materials was done through the coaxial line method in a frequency range of 1 to 10 GHz, in this way, the permittivity values were extracted at the desired frequency. At these values, the frequency selective surfaces were simulated for a sample of each type of material, in view of this the results for the transmission coefficient with respect to frequency were achieved using the ANSOFT HFSS software. The results obtained by the simulations it's possible check the behavior in reject-band filter with width single-band in all samples.

Keywords: Frequency Selective Surface; Electrical characterization; Electrical permittivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Tipos de elementos de uma FSS.....	17
Figura 02	– Filtros e seus comportamentos: (a) rejeita-faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-baixa; (d) passa-alta.....	18
Figura 03	– Grupo1: N-polos conectados pelo centro.....	19
Figura 04	– Grupo 2: espiras	19
Figura 05	– Grupo 3: elementos de interior sólido.....	20
Figura 06	– Grupo 4: combinações.....	20
Figura 07	– Sistema de Medição para uma FSS.....	22
Figura 08	– Medidor de precisão de uma FSS.....	23
Figura 09	– Medição em câmara anecóica.....	23
Figura 10	– Combinação de uma FSS com uma antena WLAN.....	24
Figura 11	– Configuração da superfície de absorção/transmissão de camada dupla e dimensões.....	25
Figura 12	– Rede de duas portas para ilustrar as ondas de tensão usadas para calcular os parâmetros S.....	27
Figura 13	– Formulação da matriz de espalhamento.....	28
Figura 14	– Ação de um campo elétrico externo em um átomo.....	34
Figura 15	– Campo elétrico alternado incidindo em um dielétrico.....	35
Figura 16	– Modelo de dipolo atômico.....	36
Figura 17	– Comportamento da permissividade relativa em função da variação na frequência em um material genérico.....	41
Figura 18	– <i>Setup</i> para medição da permissividade pelo método da linha coaxial.....	49
Figura 19	– Circuito genérico para representação de linha de transmissão.....	48
Figura 20	– Relação entre o <i>probe</i> em materiais líquidos ou sólidos e representação do franjamento do campo EM.....	50
Figura 21	– <i>Probe</i> utilizado no experimento.....	51
Figura 22	– <i>Setup</i> de simulação.....	52
Figura 23	– Permissividade relativa das madeiras.....	53
Figura 24	– Perda de inserção da FSS simulada para a madeira.....	55
Figura 25	– Dimensões da FSS simulada para a madeira.....	55

Figura 26	– Permissividade relativa dos tijolos.....	56
Figura 27	– Perda de inserção da FSS simulada para o tijolo.....	56
Figura 28	– Dimensões da FSS simulada para o tijolo.....	57
Figura 29	– Permissividade relativa dos concretos.....	57
Figura 30	– Perda de inserção da FSS simulada para o concreto.....	58
Figura 31	– Dimensões da FSS simulada para o concreto.....	58
Figura 32	– Permissividade relativa do gesso, tijolo e arranjo gesso e tijolo.....	59
Figura 33	– Perda de inserção da FSS simulada para o gesso.....	60
Figura 34	– Dimensões da FSS simulada para o gesso.....	61
Figura 35	– Perda de inserção da FSS simulada para o conjunto de gesso e tijolo.....	61
Figura 36	– Dimensões da FSS simulada para o conjunto de gesso e tijolo.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	– Permissividade elétrica e tangente de perdas das madeiras em 2,45 GHz.....	54
Tabela 02	– Permissividade elétrica e tangente de perdas dos tijolos em 2,45 GHz.....	55
Tabela 03	– Permissividade elétrica e tangente de perdas dos concretos em 2,45 GHz.....	58
Tabela 04	– Permissividade relativa e tangente de perdas para o gesso e PVC.....	59
Tabela 05	– Permissividade relativa e tangente de perdas do gesso, tijolo e arranjo gesso e tijolo.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos.....	15
2	SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA	16
2.1	INTRODUÇÃO	16
2.11	Filtros	17
2.2	FORMAS DE ELEMENTOS DE UMA FSS	19
2.3	TÉCNICAS DE ANÁLISE E MEDIÇÃO DE FSS	21
2.3.1	Técnicas de Análise	21
2.3.2	Técnicas de Medição	22
2.4	ESTADO DA ARTE	24
2.5	APLICAÇÕES DE FSS	25
2.5.1	Aplicações para WLAN	26
3	PARÂMETROS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA.....	27
3.1	INTRODUÇÃO.....	27
3.2	MATRIZ DE ESPALHAMENTO S	27
3.3	COEFICIENTE DE REFLEXÃO E TRANSMISSÃO.....	29
3.3.1	Coeficiente de Reflexão S (1,1)	29
3.3.2	Coeficiente de Transmissão S (2,1)	29
3.4	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	30
4	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA	32
4.1	INTRODUÇÃO.....	32
4.2	MEIO DIELÉTRICOS.....	32
4.3	PERMISSIVIDADE COMPLEXA.....	32
4.4	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE PERMISSIVIDADE.....	41
4.5	INFLUÊNCIA DA PERMISSIVIDADE NA FSS.....	43
5	MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	44
5.1	INTRODUÇÃO.....	44
5.2	ESQUADRIAS.....	44
5.2.1	Madeiras.....	44

5.2.1.1	Ipê – <i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart.) Standl., Bignoniaceae.....	44
5.2.1.2	Roxinho - <i>Peltogyne lecointei</i> Duckei, <i>Peltogyne confertiflora</i> (Hayne) Benth Caesalpiniaceae.....	45
5.2.1.3	Muiracatiara - <i>Astronium lecointei</i> Ducke, Anacardiace.....	45
5.2.1.4	MDF – Medium Density.....	45
5.2.1.5	MDP – Medium Dentity Particleboard.....	45
5.2.1.6	Maçaranduba - <i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Standl., Sapotaceae.....	46
5.2.1.7	Angelim – <i>Hyemenolobium petraeum</i> Ducke Fabaceae.....	46
5.2.2	Policloreto de Vinila – PVC.....	46
5.3	ALVENARIA.....	47
5.3.1	Tijolos.....	47
5.3.2	Concreto.....	47
5.3.3	Gesso.....	47
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
6.1	MATERIAIS.....	48
6.2	MÉTODO DE MEDIÇÃO DA PERMISSIVIDADE – LINHA COAXIAL.....	48
6.2.1	Procedimento experimental.....	50
6.3	SIMULAÇÃO.....	52
7	RESULTADOS.....	53
7.1	RESULTADOS PRÁTICOS E TEÓRICOS.....	53
7.1.1	Madeiras.....	53
7.1.2	Tijolo e concreto.....	54
7.1.3	Gesso	59
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
9	REFERÊNCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

As redes *wireless* são uma forma de conexão entre dispositivos móveis ou fixos e operam por meio de ondas eletromagnéticas que se propagam no espaço. Seu funcionamento se dá mediante à um ponto de acesso que envia os dados através de ondas de rádio que são captadas por uma antena e transmitida para os aparelhos conectados à rede. Essas redes são utilizadas para o acesso de *Wireless Fidelity*, WiFi, em diversos aparelhos (RIBEIRO, 2012).

O WiFi é um agrupamento de especificações para redes locais sem fios (*Wireless Local Area Network* – WLAN) baseado no padrão *Institute of Electrical and Electronic Engineers* – IEEE 802.11. Esse tipo de rede pode ser implementado em locais domésticos, educacionais, corporativos e em lugares públicos, por intermédio de um roteador que facilita o acesso em qualquer tipo de dispositivo (ALECRIM, 2013).

Em consequência da facilidade ao acesso a redes WiFi, existem situações onde deseja-se restringir o sinal a determinados espaços, limitando assim o controle ao acesso à internet. Um exemplo disso são as penitenciárias, onde o sinal de WiFi e redes móveis não podem chegar as celas.

Uma das alternativas para solucionar este problema é o uso de Superfícies Seletivas em Frequência (*Frequency Selective Surface* – FSS). Segundo Campos (2009) as FSS são arranjos bidimensionais periódicos com elementos do tipo *patch* condutor ou de abertura, que operam como um filtro para altas faixas de frequências.

Para isolar um ambiente dos sinais de WiFi utilizando FSS, é preciso analisar como as ondas eletromagnéticas - EM se comportam ao entrar em contato com os diversos tipos de materiais usados na construção desse ambiente. À vista disso, faz-se necessário compreender as características eletromagnéticas desses materiais, de forma a ser possível fazer uso da FSS no confinamento do sinal.

No presente trabalho, fez-se um estudo acerca das características eletromagnéticas dos materiais usados em construção civil, tais como madeiras, tijolos, concretos, gesso e PVC, para projetar superfícies seletivas em frequência de acordo com cada material. Deste modo, a operar como um filtro rejeita-faixa para sinais de rede WiFi que operem na faixa de frequência de 2,45 GHz.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Investigação da aplicação de FSS em materiais usados na construção civil, como filtro para a frequência de 2,45 GHz nos padrões da *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), de acordo com o IEEE 802.11.

1.1.2 Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca das superfícies seletivas em frequência;
- Caracterização elétrica dos materiais de construção civil, tais como: madeiras, tijolos, concretos, gesso e PVC;
- Simular a superfície seletiva em frequência utilizando o *software ANSOFT HFSS*;
- Fixar a geometria mais adequada para cada tipo de material.

2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

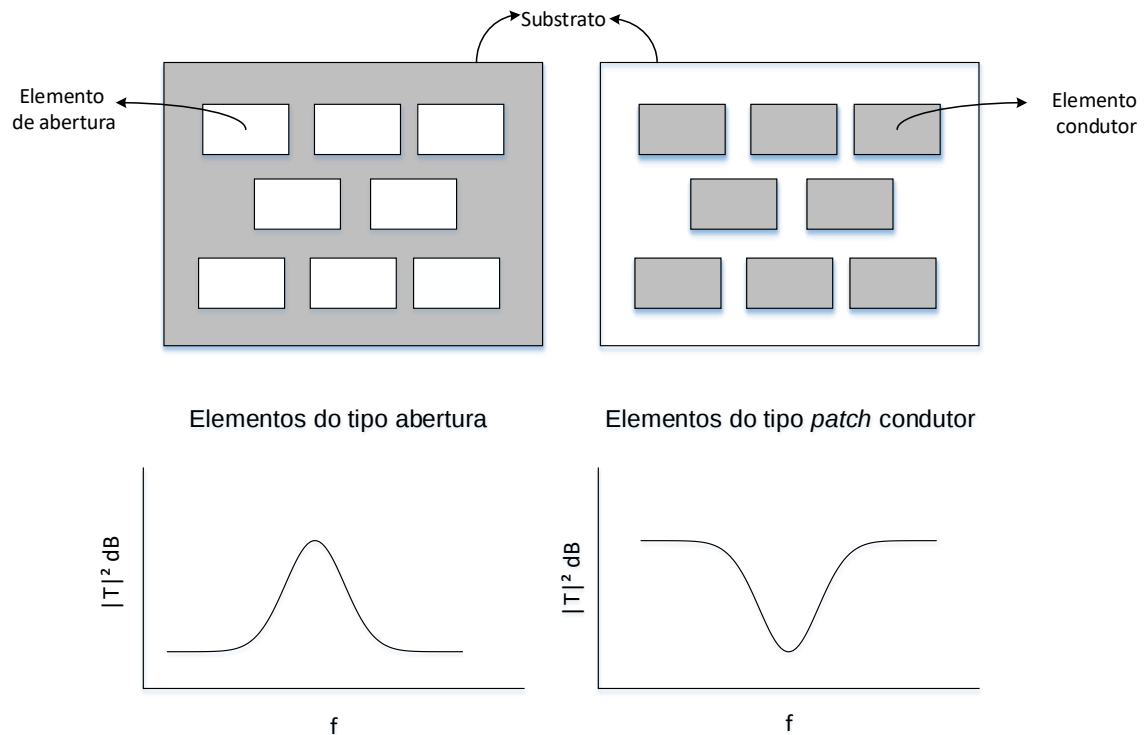
Historicamente, o conhecimento acerca dos princípios físicos das Superfícies Seletivas em Frequência (*Frequency Selective Surface* - FSS) esteve diretamente ligado com o experimento de grades de difração óptica, utilizadas para decompor um feixe de luz não monocromático em suas ordens espectrais, esse processo foi descoberto em 1786, pelo físico americano David Rittenhouse (CAMPOS, 2009).

Devido a essa investigação, é possível demonstrar a dependência das respostas em frequência em razão das dimensões físicas, tal resposta é fundamental para qualquer anteparo com elementos condutores ou de abertura espaçados periodicamente (CAMPOS, 2009). Pertinente a esse experimento, pode-se provar que superfícies condutoras apresentam diferentes propriedades de transmissão de acordo com a frequência da onda incidente. Em razão disso, essas superfícies são intituladas de Superfície Seletiva em Frequência (BRAZ, 2014).

As FSS são estruturas compostas por arranjos de elementos periódicos do tipo *patch* condutor, do tipo abertura ou até mesmo uma combinação entre ambos (NÓBREGA, 2013).

As FSS com elementos de abertura possuem características semelhantes à de um filtro passa-faixa, conforme as aberturas entram em ressonância com a frequência da onda incidente, a superfície torna-se “transparente” para a onda até que ela seja totalmente transmitida. Em contrapartida, as FSS com elementos do tipo *patch* condutor funcionam como um filtro rejeita-faixa, na medida em que os *patches* entram em ressonância com a frequência da onda incidente, irradiam potência na direção da reflexão. Com isso, quando os elementos estiverem totalmente em ressonância, a estrutura se comportará como um perfeito condutor, fazendo com que ocorra a reflexão da onda (CAMPOS, 2009).

Figura 01 – Tipos de elementos de uma FSS



Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

2.1.1 Filtros

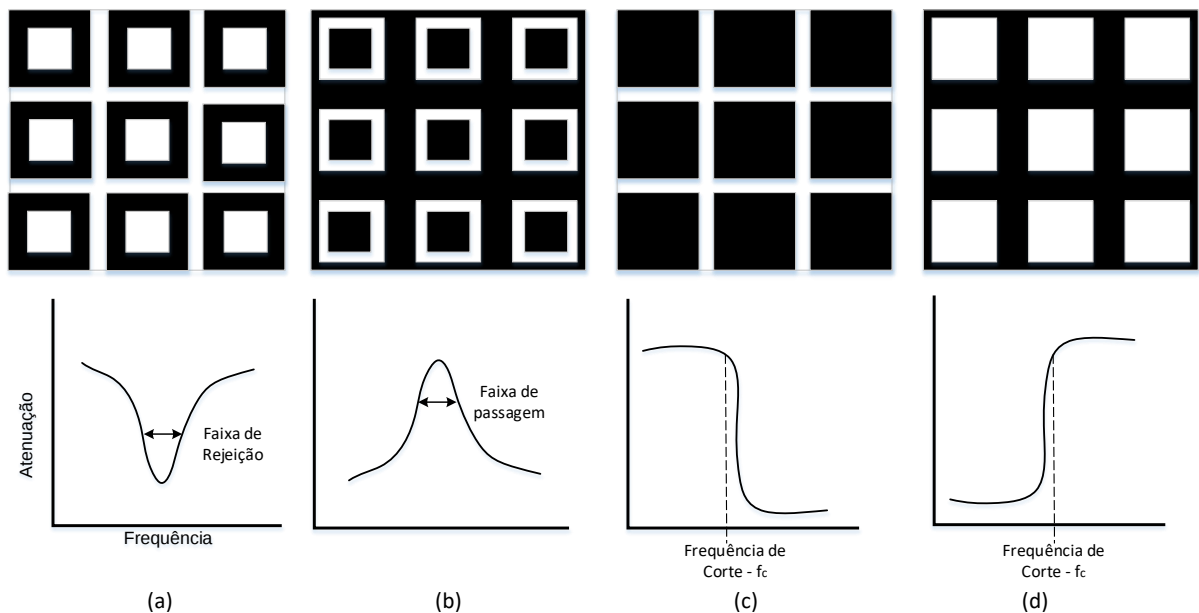
Filtros são circuitos que apresentam comportamento de acordo com a frequência aplicada, ou seja, a amplitude dos sinais de saída provém da frequência do sinal sobreposta na entrada. Essa definição pode ser usada para descrever vários circuitos, porém pode-se realçar a principal característica dos filtros por meio da seletividade, que diz respeito a sensibilidade que o filtro apresenta para determinadas faixas de frequência (NASCIMENTO, 2000). Dentre os filtros, os principais modelos são: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa.

- O filtro passa-baixa possibilita que sinais de frequência inferiores a um limite estabelecido, a frequência de corte, sejam transmitidos e os demais acima desse limite sejam atenuados;
- O filtro passa-alta atua de forma oposta ao filtro passa-baixa, permitindo a passagem de sinais superiores à frequência de corte e atenuando os que são inferiores a mesma;

- O filtro passa-faixa é constituído por duas frequências de corte, uma inferior e outra superior, os sinais que estiverem fora da faixa de frequência definida, serão atenuados;
- O filtro rejeita-faixa tal como o filtro passa-faixa, exibe duas frequências de corte, inferior e superior, mas executa de forma contrária, atenuando os sinais que estiverem na mesma faixa que a frequência de corte e permitindo a passagem das demais frequências (NASCIMENTO, 2000).

O comportamento de acordo com a resposta em frequência de cada filtro, é ilustrado na Figura 02.

Figura 02 – Filtros e seus comportamentos: (a) rejeita-faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-baixa; (d) passa-alta.



Fonte: Adaptado de Silva, 2014.

Os filtros ainda podem ser definidos como ativos ou passivos. Os filtros passivos são compostos apenas por componentes passivos, como resistores, capacitores e indutores. Os filtros ativos utilizam elementos passivos na sua composição associados a elementos ativos, como transistores e amplificadores operacionais (MUSSOI, 2004).

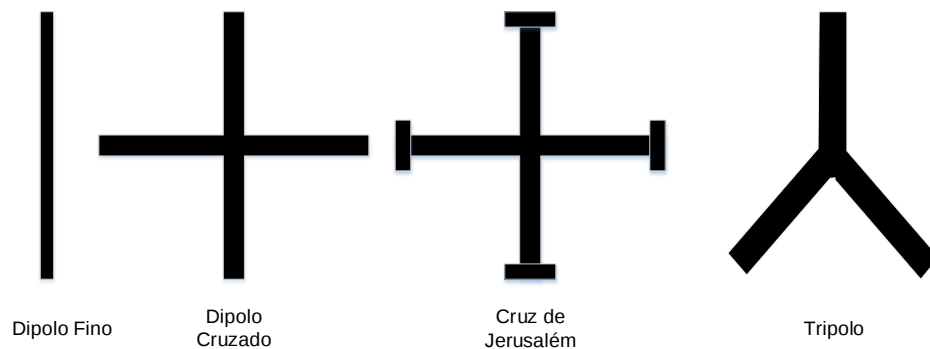
À vista disso, uma FSS comporta-se como um filtro passivo de onda eletromagnética, sendo assim, resume-se a um circuito que no espaço livre realiza filtragem de faixas de frequências de acordo com o que foi projetado.

2.2 FORMAS DE ELEMENTOS DE UMA FSS

A forma do elemento implantada na FSS é de suma importância para sua concepção. De acordo com Munk (2000), os elementos são organizados em quatro grupos:

- Grupo 1: N-polos conectados pelo centro. Os mais típicos elementos desse grupo são: dipolo fino, cruz de Jerusalém, dipolo cruzado e tripolo. Vistas na Figura 03.

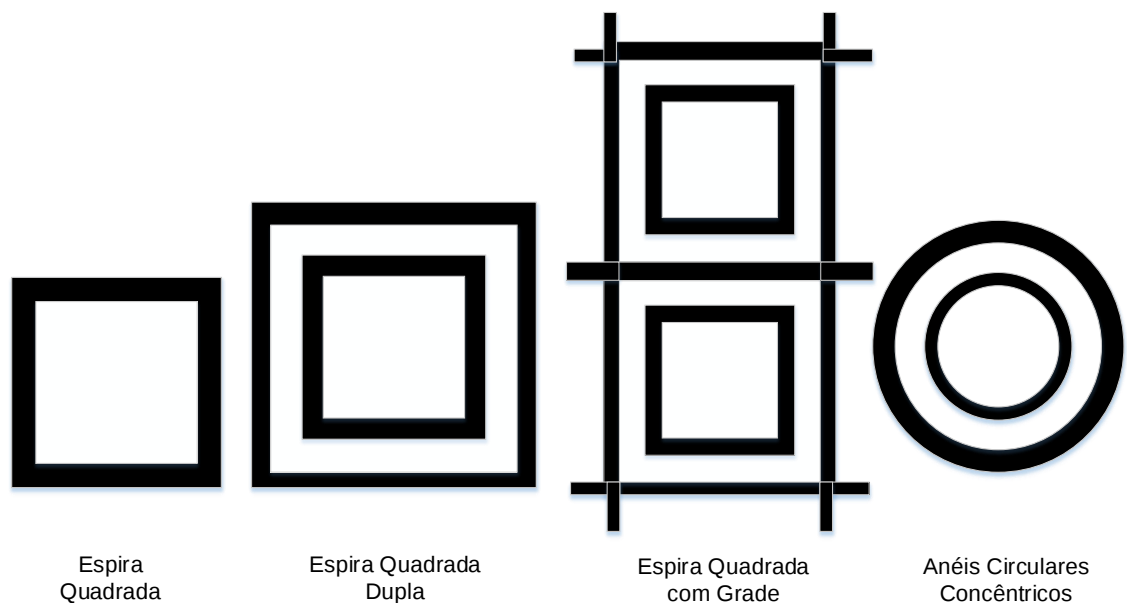
Figura 03 – Grupo 1: N-polos conectados pelo centro.



Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

- Grupo 2: esse grupo é composto por espiras, ilustradas na Figura 04, os modelos mais comuns são: espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grade e anéis circulares concêntricos.

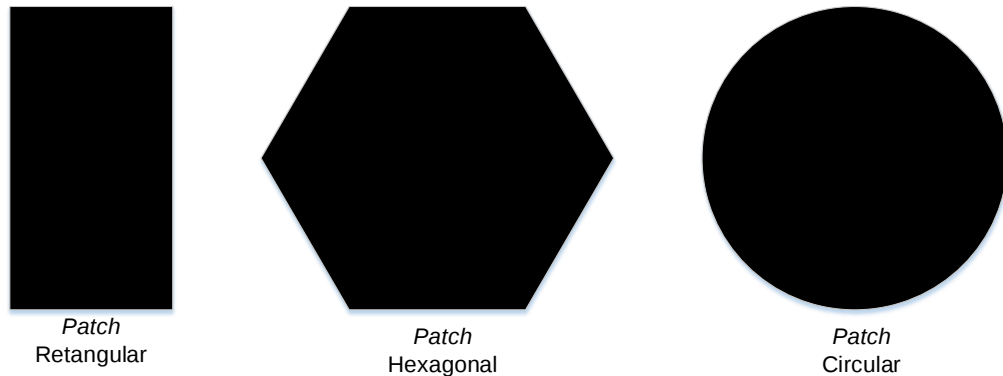
Figura 04 – Grupo 2: espiras.



Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

- Grupo 3: elementos de interior sólido ou tipos diversos de *patches*, como os *patches* retangulares, hexagonais e circulares. A Figura 05 mostra os elementos desse grupo.

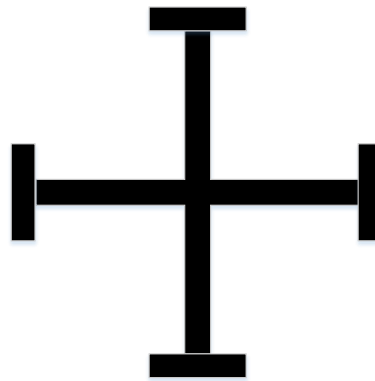
Figura 05 – Grupo 3: elementos de interior sólido.



Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

- Grupo 4: é formado por combinações de elementos típicos, como o exemplo ilustrado na Figura 06.

Figura 06 – Grupo 4: combinações.



Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

O projeto de uma FSS pode ser feito a partir de elementos de qualquer forma geométrica, com meio comprimento de onda, obtido pela frequência de operação, espaçadas de forma periódica uma da outra (NÓBREGA, 2013). Quando as dimensões dos elementos forem múltiplas de meio comprimento de onda, esse elemento irá ressoar e propagar uma energia, logo, o evento resultante da propagação proveniente de cada elemento do arranjo é reconhecido como uma transmissão ou reflexão (ARAÚJO, 2014).

2.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE E MEDIÇÃO DE FSS

Devido à preocupação contínua de se explicar o comportamento de uma FSS de acordo com os parâmetros de projeto, diversas técnicas numéricas têm sido aplicadas para análise, dispondo sempre de um equilíbrio entre precisão nos resultados, análise do tipo de elemento e tempo computacional (SILVA, 2014).

2.3.1 Técnicas de Análise

Existem na literatura variados métodos de análise para sistematizar o comportamento eletromagnético – EM das FSS (CAMPOS, 2009). São aplicadas várias técnicas numéricas para a análise de FSS que podem ser categorizadas em: técnica de teoria de circuitos, técnicas de expansão modal e técnicas iterativas (SILVA, 2014). Algumas dessas técnicas são brevemente relatadas a seguir.

Foram desenvolvidas fórmulas simples e aproximadas para coeficiente de transmissão e reflexão, para FSS com *patches* condutores ou aberturas retangulares. Este tipo de análise minimiza o tempo de exercício computacional e gera resultados satisfatórios para alguns tipos de estruturas. Porém, as fórmulas apresentam limitações e podem não ser muito úteis em algumas aplicações (CAMPOS, 2009).

O método do circuito equivalente trata-se de uma simples análise, mas que proporciona resultados satisfatórios. Nesse método os vários segmentos de fitas que compõem os *patches* em um arranjo são formados como componentes indutivos ou capacitivos de uma linha de transmissão. A solução desse circuito fornece características de transmissão e reflexão das FSS. Esta técnica usa uma aproximação quase-estática para resolver os itens do circuito e proporciona uma rápida resposta computacional (CAMPOS, 2009).

Outro método para análise é o método de expansão modal, que oferece uma análise ampla capaz de ceder detalhes de compreensão física de sua operação, simultaneamente com respostas de frequência e polarização. Contudo, o método demanda um elevado tempo computacional, o que o torna inviável para projetos mais complexos (LANGLEY, LEE E SC., 1985).

Uma técnica bastante difundida, atualmente, é a Técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain* – FDTD), baseado no uso de Equações Diferenciais Parciais (EDP). O FDTD viabiliza a análise de qualquer tipo de elemento, assim

como as perdas dielétricas ou magnéticas e a análise de estruturas não-homogêneas. O ponto negativo dessa técnica é o demasiado trabalho computacional (CAMPOS, 2009).

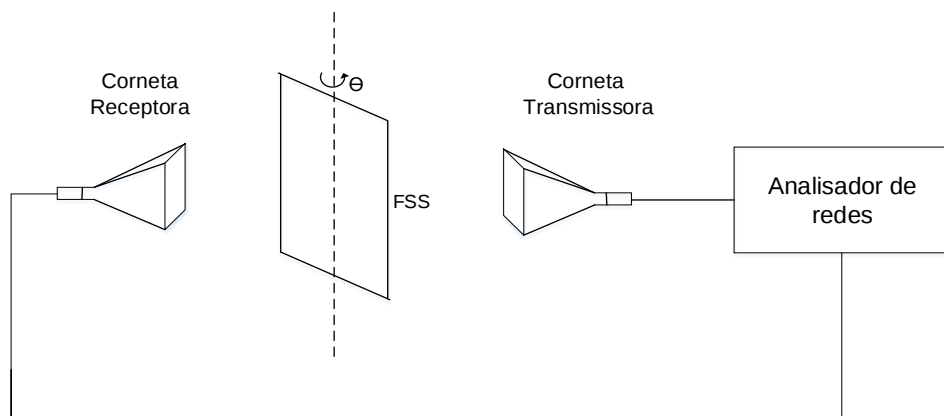
De acordo com Campos (2009), o método da linha de transmissão equivalente juntamente com o método de Galerkin é uma análise de onda completa que gera resultados precisos, além disso simplifica o manuseio matemático.

O Método das Ondas (*Wave Concept Iterative Procedure – WCIP*), apresenta uma redução nos esforços computacionais, comparado a outros métodos de onda completa. Baseia-se na relação entre a onda refletida e incidente em um circuito para demonstrar o comportamento de uma estrutura (SILVA NETO, 2013).

2.3.2 Técnicas de Medição

Vários métodos têm sido utilizados para realizar a medição das propriedades de transmissão e reflexão de uma FSS. Um dos métodos empregados pode ser visto na Figura 07, onde a FSS sob teste é posicionada entre duas cornetas, de ganhos padrões, que atuam como antenas receptora e transmissora. Com isso, é possível medir as características de transmissão Transversal Magnética - TM e Transversal Elétrica -TE do painel de teste, em razão da alteração da polaridade nas antenas de vertical para horizontal (WU, 1995).

Figura 07 - Sistema de Medição para uma FSS.



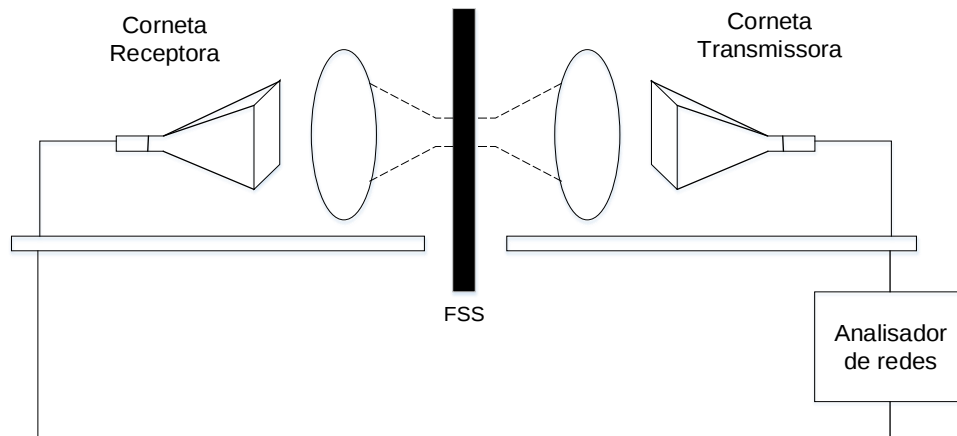
Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

A configuração apresentada neste medidor também pode ser usada para medir as características de reflexão de uma FSS. Contudo, pode haver erro nos dados obtidos, por efeito das difrações ocasionadas nas bordas do painel de teste (WU, 1995).

A técnica que usa um medidor com antenas cornetas e lentes, mostrado na Figura 08, apresenta uma boa precisão. As lentes transformam as ondas esféricas em um feixe colimado

de ondas planas. Diante disso, essa configuração pode ser usada em medições mais precisas das características de espalhamento, polarizações TE e TM (WU, 1995).

Figura 08 - Medidor de precisão de uma FSS.

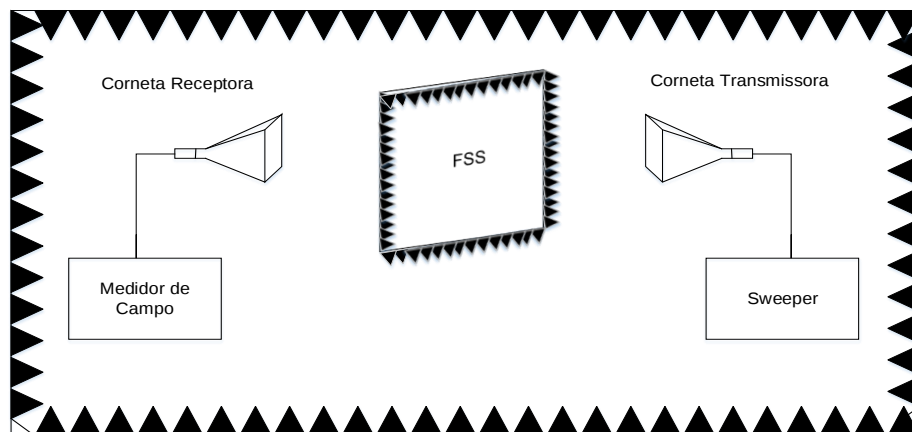


Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

A técnica de simulação do guia de ondas propicia uma alternativa para medições do desempenho de transmissão e reflexão de uma FSS. Todavia, é uma técnica que apresenta limitações, como para a polarização TE, além de produzir erros, dentre outros aspectos (CAMPOS, 2009).

Na outra técnica, vista na Figura 09, a medição é feita por um medidor de campo e um gerador de varredura. As antenas são separadas por uma grande distância, assegurando a existência de ondas planas. Os absorvedores na FSS eliminam as difrações nas bordas, enquanto os absorvedores da câmara anecóica eliminam as reflexões em torno da câmara (CHANG, YOO E McSPADDEN, 1992).

Figura 09 - Medição em câmara anecóica.

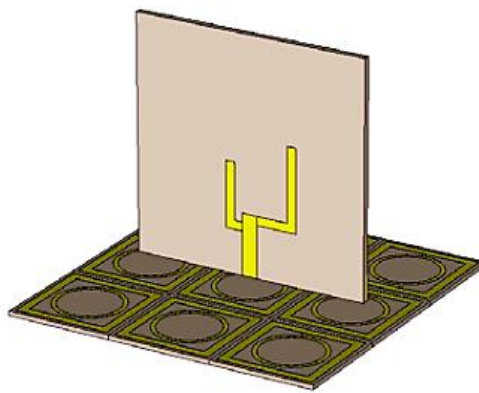


Fonte: Adaptado de Campos, 2009.

2.4 ESTADO DA ARTE

Em Liu et al. (2012), investiga-se um método combinatório de uma FSS banda dupla com antenas que operam no serviço *Wireless Local Area Network* – WLAN, vista na Figura 10, e a influência que ela causava sendo usada como plano de reflexão. Desenvolve-se uma FSS semelhante a um filtro rejeita-faixa, cuja frequência central coincidia com a frequência de operação de uma antena WLAN, 2,45 e 5,8 GHz, com os resultados obtidos observa-se que houve uma melhoria do ganho da antena quando a FSS é posta como plano de reflexão.

Figura 10 – Combinação de uma FSS com uma antena WLAN.



Fonte: Liu et al., 2012.

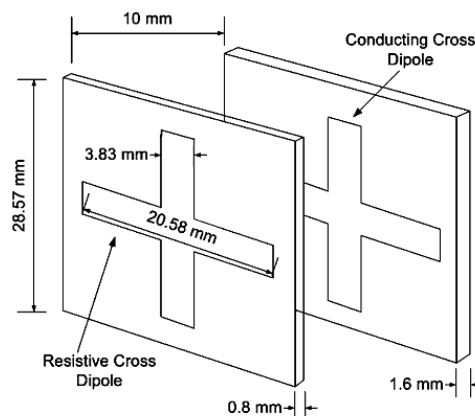
Em Raspopoulos et al. (2011), propõe a implantação de uma FSS em ambientes *indoors* para redes *Wireless*, além disso é analisado o efeito na propagação de ondas de rádio. Para tanto, foi composta uma estrutura para restringir a propagação de ondas de rádio em áreas internas, além disso a FSS também pode ser utilizada para canalizar as ondas de rádio para outra área de interesse. Considerações práticas acerca da inserção da FSS nas paredes dos edifícios e a distância entre a FSS e a parede de suporte também foi analisada. Realizou-se simulações em um ambiente interno de pequena escala construído e medido em uma câmara anecóica, com o intuito de validar a proposta de aplicação da FSS em ambientes *indoors*. Os resultados obtidos demonstram, portanto, a possibilidade da implantação de FSS para restringir ou canalizar sinais *wireless* em um ambiente *indoor*, usados para aumentar a cobertura do sinal de frequências específicas de operação.

Os *Femtocells* (FC) são projetados para melhorar a qualidade, cobertura e capacidade das redes *wireless*, mas proveniente da implantação dos FC, há uma interferência nos sinais em ambientes *indoor*. Habbib et al. (2016), investigam a mitigação de interferência e eficiência WLAN em edifícios modernos usando técnicas de economia de energia e FSS. Para

casos de roteadores WLAN que alimentam mais de um cômodo, é utilizada uma FSS, passa-faixa, juntamente com um *RadioClear* (RC), dessa forma há uma melhor transmissão do sinal. Com essa técnica a interferência dos sinais podem ser diminuídas e sucede uma melhoria na segurança e na disponibilidade da rede WLAN.

Em Kiani et al. (2006) apresenta uma FSS de absorção/transmissão para uma rede local sem fio, que opera em uma frequência de 5 GHz, o diferencial nesta superfície é que ela é capaz de absorver ao invés de refletir os sinais de WLAN, permitindo a propagação de sinais de celular. A FSS consiste em duas camadas, uma condutora e outra resistiva, ambas com dipolos cruzados, mostrada na Figura 11, a distância adotada entre as duas camadas é inferior à um quarto de comprimento de onda. Oriundo da combinação da FSS resistiva (absorção) e a condutora (reflexão), somente os sinais WLAN que foram refletidos serão absorvidos pela camada resistiva da FSS, que permite a passagem, sem atenuação, de sinais de telefonia móvel.

Figura 11 – Configuração da superfície de absorção/transmissão de camada dupla e dimensões.



Fonte: Kiani et al., 2006.

2.5 APLICAÇÕES DE FSS

De acordo com Munk (2000) as aplicações de FSS se intensificaram em meados da década de 1960, devido ao grande potencial para aplicações militares. Desde então, as aplicações de FSS têm sido alvo de estudo para profissionais da área, devido ao seu vasto funcionamento em diversas frequências do espectro EM.

A aplicação mais conhecida das FSS é o anteparo posicionado na porta do forno de micro-ondas. Este anteparo age de forma equivalente a um filtro passa-faixa, que permite a

passagem de frequência de luz visível, mas retém as frequências de micro-ondas em torno de 2,45 GHz (PEIXOTO NETO, 2016).

Outra significativa aplicação das FSS é encontrada em radomes, que funcionam como um filtro passa-faixa agrupado com uma antena para restringir a seção reta de radar (*Radar Cross Section* – RCS) da antena fora de sua banda de operação (MUNK, 2000).

No campo de micro-ondas, as propriedades seletivas dos arranjos periódicos são bastante utilizadas para se alcançar um melhor desempenho das antenas refletoras, como exemplo têm as antenas do tipo banda dupla (*dual band*), banda tripla (*tri band*) e multi-banda (CAMPOS, 2009). Um exemplo desta aplicação é o uso de uma FSS como sub-refletor dicróico para uma antena banda dupla, possuindo dois alimentadores, para um a FSS é completamente transparente e para o outro alimentador ela é completamente opaca, isto é, a antena é capaz de atuar em duas bandas de frequência, sendo alimentada por duas fontes independentes e distanciadas (SILVA, 2014).

Na área de infravermelho, há a utilização de FSS como janelas eficientes, no qual implanta-se uma fina cobertura metálica em janelas modernas, afim de atingir uma economia de energia. A FSS opera como um filtro, o revestimento impossibilita a radiação eletromagnética na região infravermelha e torna-se transparente para a parcela visível do espectro, desta maneira despreza a transferência de calor de fora para dentro do local no verão e vice-versa no inverno (SILVA SEGUNDO, 2014).

2.5.1 Aplicações para WLAN

As redes locais sem fio funcionam através de portadoras de rádio ou infravermelho, e instituem a comunicação de dados através dos pontos de redes. Os dados são modulados na portadora de rádio e transmitidos por meio das ondas eletromagnéticas.

A aplicação de FSS em redes WLAN são encontradas em edificações, para o controle de sinais em ambientes *indoor*, a fim de refletir ou absorver frequências nas faixas de 2,45 e 5,8 GHz, enquanto permite a passagem de outros sinais, como o de telefonia móvel, sem atenuação. Ainda pode haver a implantação de FSS em materiais de construção civil ou em outros tipos de estruturas, com o intuito de bloquear os sinais de redes WLAN (NÓBREGA, 2013).

3. PARÂMETROS DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

3.1 INTRODUÇÃO

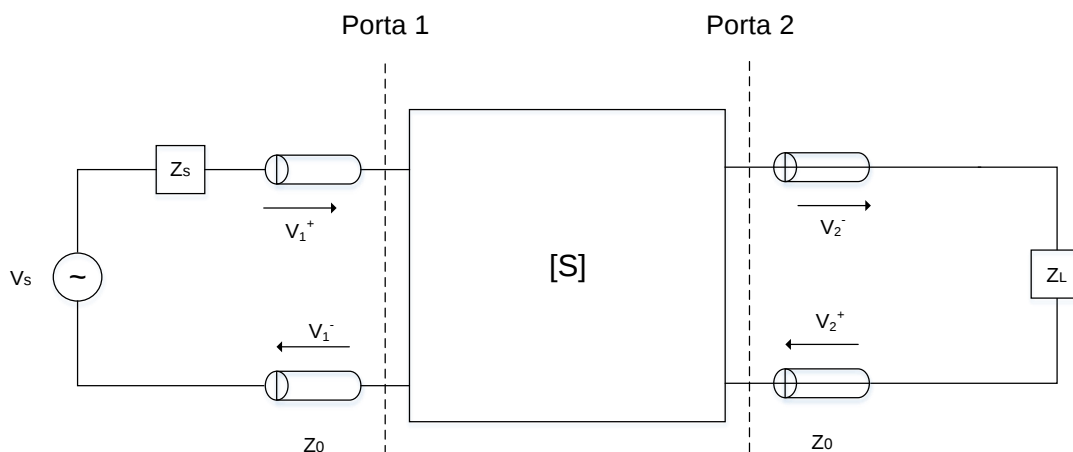
Em baixas frequências a rede pode ser caracterizada por vários parâmetros, sendo que curtos-circuitos e circuitos abertos são fundamentais para a medição desses parâmetros. Em casos de frequências elevadas as medidas possuem uma maior dificuldade, uma vez que em altas frequência são difíceis de obter curtos ou circuitos abertos. Desse modo, é necessário um outro conjunto de parâmetros para fazer a caracterização de dispositivos com larga faixa de frequência, como as FSS (CÉSAR,2014).

Parâmetros de espalhamento S, ou parâmetro S, é uma maneira útil para a solução da caracterização em altas frequências. As matrizes de espalhamento são constantemente usadas para caracterizar redes multiportas, principalmente em altas frequências. São utilizadas para reproduzir dispositivos de micro-ondas, como amplificadores e circuladores, e são facilmente associadas aos conceitos de ganho, perda e reflexão (WENTWORTH, 2006).

3.2 MATRIZ DE ESPALHAMENTO S

Na abordagem de parâmetros S que possuem a mesma impedância característica (Z_0) em todas as portas, os parâmetros de espalhamento correspondem a razões de ondas de tensão entrando e saindo pelas portas, mostrado na Figura 12 (WENTWORTH, 2006).

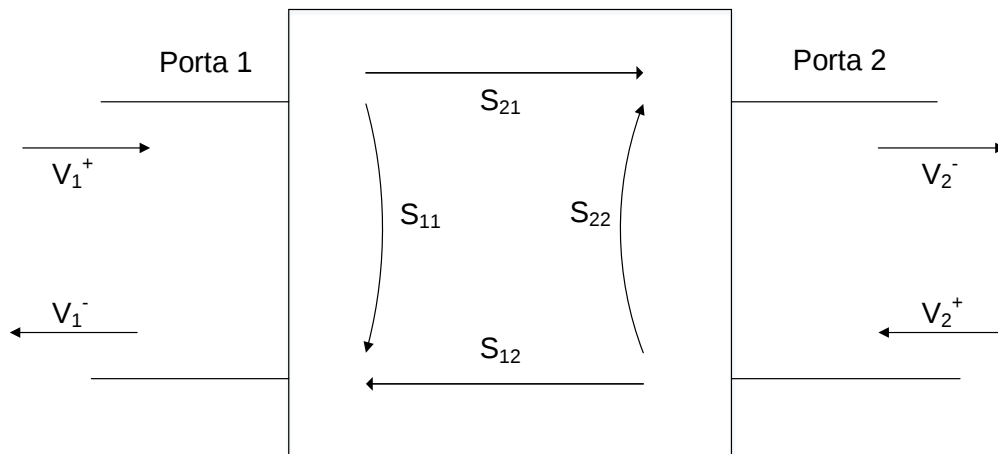
Figura 12 – Rede de duas portas para ilustrar as ondas de tensão usadas para calcular os parâmetros S.



Fonte: Adaptado de Wentworth, 2006.

Reportando-se a Figura 12, V_1^+ corresponde à onda de tensão incidente na porta 1, no qual parte dessa onda é refletida contribuindo com a onda de tensão que sai pela porta 1, V_1^- , e a outra parte é transmitida para a porta 2, contribuindo para V_2^- . Da parcela transmitida, parte é refletida na carga e entra na porta 2 como V_2^+ . Desta porção V_2^+ , parte é refletida contribuindo com V_2^- e parte é transmitida contribuindo com V_1^- . Na Figura 13 é possível visualizar a elaboração mais simplificada da matriz de espalhamento (WENTWORTH, 2006).

Figura 13 – Formulação da matriz de espalhamento.



Fonte: Adaptado de Wentworth, 2006.

Percebe-se que V_1^- compõem-se da parte refletida de V_1^+ juntamente com a parcela que foi transmitida de V_2^+ . Isto pode ser escrito em termos dos parâmetros de espalhamento como:

$$V_1^- = S_{11} \cdot V_1^+ + S_{12} \cdot V_2^+ \quad (1)$$

Analogamente, escreve-se V_2^- como:

$$V_2^- = S_{21} \cdot V_1^+ + S_{22} \cdot V_2^+$$

Na forma matricial, isto é escrito:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (2)$$

Abreviando, tem-se:

$$[V]^- = [S] \cdot [V]^+ \quad (3)$$

[S] é estabelecida como uma matriz de espalhamento de duas portas (WENTWORTH, 2006).

3.3 COEFICIENTE DE REFLEXÃO E TRANSMISSÃO

Um parâmetro de espalhamento S_{ij} é definido como a fração da onda de tensão que sai pela porta i e entra na porta j (WENTHORTH, 2006):

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq j} \quad (4)$$

Por ser um parâmetro complexo, possui módulo e fase, sendo que a fase desses parâmetros é de acordo com a determinação exata de onde as tensões terminam (TRINTINALIA, 2014):

$$S_{ij} = |S_{ij}| e^{j\phi_{ij}} \quad (5)$$

Qualquer elemento da matriz S representa uma função de transferência. Quando $i \neq j$: função de transferência da porta j para i ; quando $i = j$: reflexão intrínseca (CÊSAR, 2014).

3.3.1 Coeficiente de Reflexão $S(1,1)$

O parâmetro S_{11} representa o coeficiente de reflexão na sua entrada, quadripolo na porta 1, quando não há onda incidente na porta 2, isto é, quando a linha de transmissão à sua direita está terminada com uma carga perfeitamente casada com a linha. Com referência a esse parâmetro é estipulada as perdas de retorno de entrada. Analogamente para o parâmetro S_{22} para a porta 2, saída, estima-se as perdas de retorno de saída (TRINTINALIA, 2014).

A perda de retorno pode ser descrita como a diferença entra a potência do sinal transmitido e a potência do sinal refletido, causado pelas variações na impedância de ligação e canal (TRINTINALIA, 2014).

3.3.2 Coeficiente de Transmissão $S(2,1)$

O parâmetro S_{21} corresponde ao ganho direto do quadripolo, quando não há onda incidente na porta 2, ou seja, quando a linha de transmissão à sua direita está terminada com uma carga casada perfeitamente com a linha. Analogamente, S_{12} é considerado um ganho complexo reverso. Partindo do pressuposto de que as duas linhas de transmissão, na entrada e na saída, tenham a mesma impedância característica, mediante a esses parâmetros S_{21} e S_{12} é

possível determinar as perdas de inserção. Perda de inserção é a perda de potência de sinal, resultante da inserção de um dispositivo em uma linha de transmissão (TRINTINALIA, 2014).

3.4 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Ondas planas são ondas eletromagnéticas que estão muito distantes da fonte, já que à medida que a onda se afasta da fonte, sua frente de onda fica com um contorno cada vez mais plano (FREEDMAN, YOUNG, 2009). Na propagação de uma onda plana no espaço, quando ela atinge uma superfície, com algum ângulo em relação a interface dessa superfície, define-se esse ângulo como ângulo de incidência, que é formado entre o raio incidente e a reta normal a superfície (HAYT, 2013).

Diante de experimentos concluiu-se que o raio incidente, o raio refratado (transmitido), o raio refletido e a normal da superfície estão contidos em um único plano. O plano que envolve esses raios é ortogonal ao plano da interface das superfícies (FREEDMAN, YOUNG, 2009).

Quando uma onda plana incide em uma região de diferentes materiais, o ângulo que o raio incidente faz com a normal da superfície é chamado de ângulo de incidência, θ_a , parte dessa onda é refletida com a mesma angulação de incidência, o ângulo entre o raio refletido e a normal da superfície é denominado ângulo de reflexão, θ_r . Sendo assim, para qualquer comprimento de onda:

$$\theta_r = \theta_a \quad (6)$$

esta relação constitui a chamada lei da reflexão (FREEDMAN, YOUNG, 2009).

A onda que incide dentro da superfície ainda se divide em outras duas ondas, uma refletida e uma transmitida, esse fenômeno é conhecido como refração. A refração possui um ângulo, θ_b , de acordo com a onda que foi incidida, a razão entre o seno dos ângulos é igual ao inverso da razão entre os dois índices de refração:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (7)$$

Ou

$$n_a \cdot \sin \theta_a = n_b \cdot \sin \theta_b \quad (8)$$

a Equação 8 constitui a lei de refração ou lei de Snell (FREEDMAN, YOUNG, 2009).

O ângulo de incidência é um dos principais fatores que influenciam a resposta em frequência de uma FSS. É interessante que a FSS funcione de forma estável em uma vasta gama de ângulos de incidência. Esta instabilidade na resposta pode ser vista pelas equações de circuito equivalente, onde as equações que calculam os valores indutivos e capacitivos dependem do ângulo de incidência, portanto a frequência de ressonância de uma FSS também está de acordo com o ângulo de incidência (FILGUEIRA, 2016).

4. PERMISSIVIDADE ELÉTRICA

4.1 INTRODUÇÃO

A permissividade elétrica de um meio é a propriedade física que define como o campo elétrico interage com este meio, ou a forma que um meio se polariza devido à aplicação de um campo elétrico. Quanto maior a permissividade, maior será a facilidade de um campo elétrico penetrar no meio, ou seja, quanto mais permissivo um meio, mais linhas de campo estarão contidas dentro dele, sendo assim, uma elevada permissividade elétrica está relacionada a um bom dielétrico (GRIFFITHS, 2014).

4.2 MEIOS DIELÉTRICOS

Os meios podem ser classificados com base em suas características elétricas e magnéticas, como a permissividade, permeabilidade e condutividade. Em relação às características elétricas os materiais se dividem em: condutores, semicondutores e dielétricos. Quanto às características magnéticas, os materiais se agrupam em: ferromagnéticos, diamagnéticos, paramagnéticos, antiferromagnéticos e supermagnéticos (HAYT, 2013).

A propagação de ondas em dielétricos como um meio sem perdas, é uma abordagem ideal, porém todos os dielétricos são de alguma maneira meios com perdas (WENTWORTH, 2006). Um dielétrico com perdas é um meio parcialmente condutor, onde a sua condutividade (σ) é diferente de zero, de maneira oposta tem-se um dielétrico perfeito, no qual sua condutividade é zero (SADIKU, 2012).

Os meios dielétricos também podem ser classificados em isotrópicos, quando a permissividade não varia com a direção, então $E_x = E_y = E_z$, e em anisotrópicos onde a permissividade muda de acordo com a direção, $E_x \neq E_y \neq E_z$. (HAYT, 2013).

4.3 PERMISSIVIDADE COMPLEXA

As maneiras pelas quais os processos físicos em um material podem interferir no campo elétrico da onda EM são representados por meio de uma permissividade complexa. Usualmente, a parte real é denominada de ϵ' e a imaginária de ϵ'' :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (9)$$

essa permissividade complexa pode ser gerada pela condução de elétrons livres e lacunas, por relaxamentos de dipolo e oscilações iônicas (HAYT, 2013).

Em casos de materiais condutores, quando um material apresenta condutividade não-nula, isso é refletido em uma permissividade imaginária, resultando em perdas na onda (HAYT, 2013):

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (10)$$

A tangente de perdas é uma medida padrão para quantificar as perdas em um material, o critério pelo qual deve-se analisar se as perdas de um material são grandes ou não, é mediante a essa tangente. Para materiais dielétricos, sua magnitude é:

$$\text{tg } \theta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (11)$$

sendo θ , o ângulo de perdas do meio. E para materiais condutores, a tangente de perdas é dada por (HAYT, 2013):

$$\text{tg } \theta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'} \quad (12)$$

Para materiais dielétricos, percebe-se que a tangente de perdas é relacionada à parte imaginária da permissividade, desta maneira em casos em que a permissividade imaginária é nula, a $\text{tg } \theta$ também será nula e consequentemente o material não teria perdas. Em contrapartida, com uma permissividade imaginária diferente de zero, quanto maior for o seu valor, maior será a $\text{tg } \theta$, por conseguinte o material teria perdas (GRIFFITHS, 2014).

Para materiais condutores, a $\text{tg } \theta$ relaciona-se com a condutividade do material, assim como com a frequência angular. Visto que, para um material com condutividade nula, a $\text{tg } \theta$ consequentemente também seria nula, deste modo o material não apresentaria perdas. Por outro lado, para um material com condutividade não-nula, as perdas desse material seriam

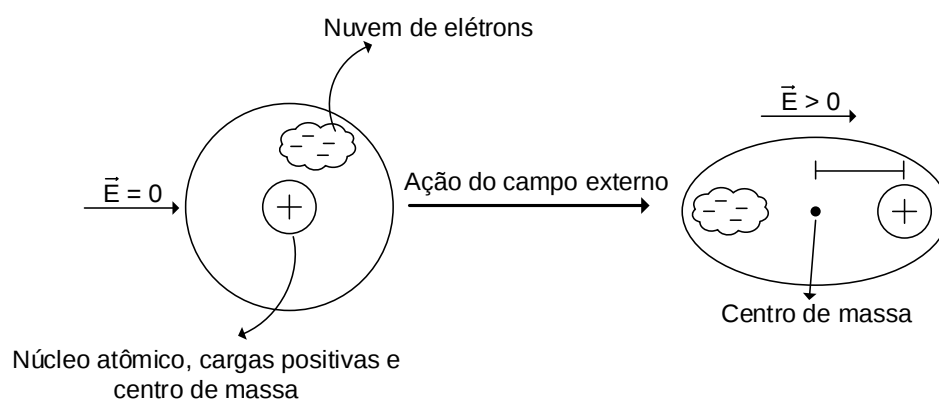
quantificadas de acordo com a magnitude de sua condutividade, a frequência de operação e a permissividade real do material (GRIFFITHS, 2014).

A tangente de perdas é útil para classificar um material como um bom condutor, onde $\tan \theta \gg 1$ e um bom dielétrico, quando $\tan \theta \ll 1$ (WENTWORTH, 2006).

Para entender como ocorre os relaxamentos de dipolo, é preciso estudar a natureza dos materiais dielétricos. Considerando um dielétrico composto por um arranjo de átomos, no qual a ligação entre os átomos origina moléculas específicas eletricamente polares ou apolares, diante disso, determinando-se que um campo elétrico oscilante no tempo incide no interior desse dielétrico, em que sua ação consiste em realizar um trabalho de alinhar os dipolos conforme seu sentido e direção (GRIFFITHS, 2014).

Antes da inserção do campo, as cargas dentro do átomo são arranjadas de forma que o campo resultante seja nulo. Com o campo incidindo no material, as cargas elétricas tendem a se deslocarem para as extremidades dos átomos, conseqüentemente há uma deformação em sua geometria espacial, assim como o deslocamento do seu centro de massa, resultando no surgimento de um dipolo elétrico, processo ilustrado na Figura 14. O quão o átomo se deforma depende do seu tamanho, ou seja, do raio atômico, e da intensidade do campo elétrico. Sendo que, quanto maior for o seu raio atômico, maior será sua capacidade de ser polarizado por um campo elétrico (GRIFFITHS, 2014).

Figura 14 – Ação de um campo elétrico externo em um átomo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A polarização nos átomos é fundamental para o entendimento da maioria das moléculas, já que são compostas por ligações atômicas de átomos diferentes. Em moléculas polares, a polarização frente a um campo elétrico externo é mais fácil, já que há polos definidos, em contrapartida em moléculas apolares a polarização é dificultada, pois o campo

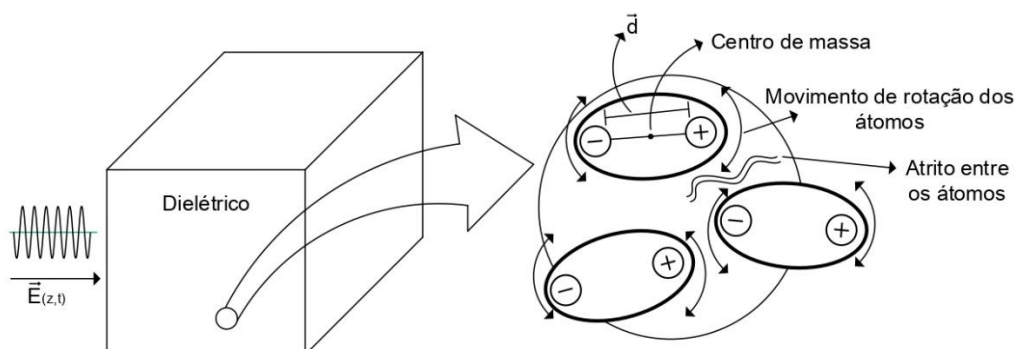
elétrico externo terá que gastar mais energia para primeiramente formar os polos e seguidamente alinhá-los à ele (GRIFFITHS, 2014).

Os polos elétricos só têm seus momentos de dipolo alterado enquanto há um campo incidente, este movimento cessa com o alinhamento dos dipolos. Os momentos quando arranjados e alinhados com o campo externo, fazem com que a intensidade do campo elétrico no interior do dielétrico seja menor do que do campo elétrico externo. Essa característica física é um efeito da interação do campo externo com o somatório dos campos internos do dipolo, ou seja, a intensidade do campo interno do dielétrico vai ser a diferença entre a interação da intensidade do campo externo com o somatório dos campos internos de dipolo (GRIFFITHS, 2014).

É importante delimitar os três tipos de polarização em um material para se compreender o conceito geral de polarização, são elas: a polarização eletrônica que ocorre com a movimentação das cargas nos átomos; a polarização iônica que se deve ao deslocamento dos íons formados nas moléculas; a polarização de orientação é o último tipo de polarização, ocorre quando os momentos de dipolo das moléculas são formados (polarização eletrônica e iônica), e ainda é necessário o alinhamento, dependendo da efetividade desse alinhamento, determina-se o quão o conjunto de dipolos estão direcionados paralelamente ao campo elétrico. O vetor polarização $\vec{P}$ será a soma dos três tipos de polarização (GRIFFITHS, 2014).

Supondo a incidência de um campo elétrico $\vec{E}_{(z,t)}$ variável no tempo que se propaga ao longo do eixo z, em um material dielétrico, como mostrado na Figura 15, os dipolos formados e alinhados vão ter oscilações em sua estrutura, e essas mudanças vão refletir em características como condutividade, permeabilidade e permissividade (GRIFFITHS, 2014).

Figura 15 – Campo elétrico alternado incidindo em um dielétrico.



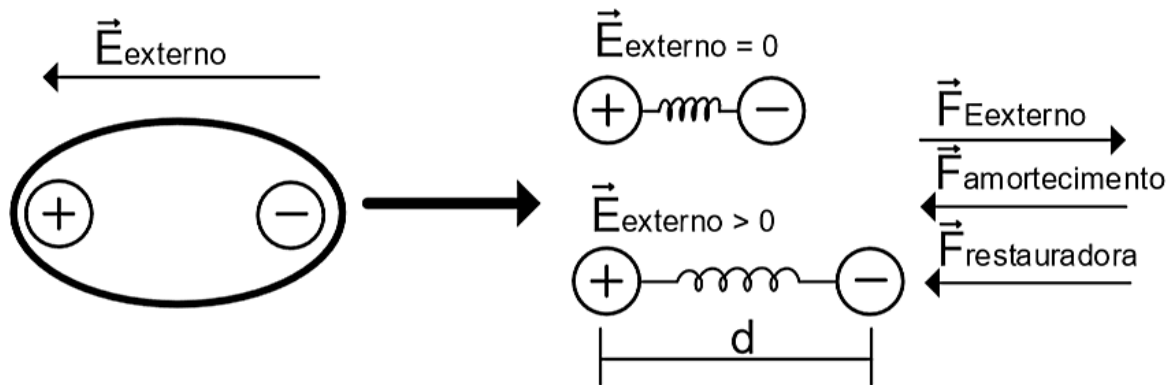
Fonte: Autoria própria, 2019.

O vetor de polarização $\vec{P}$ terá o mesmo comportamento do campo externo, $\vec{P}_{(z,t)}$, considerando fatores ligados a suscetibilidade em relação a essas oscilações.

$$\vec{P}_{(z,t)} = A\vec{E}_{(z,t)} \quad (13)$$

Primeiramente, considerando os aspectos físicos de uma molécula, já que na presença de um campo elétrico, as oscilações provocadas pelo mesmo, faz com que as moléculas sejam submetidas a praticarem movimentos de frequências e amplitudes variadas, relembrando que esses movimentos serão de formação do dipolo, e rotação com o intuito de alinhar o momento do dipolo $\vec{p}$ com o campo externo $\vec{E}_{\text{externo}}$. Devido a isso, é exemplificado na Figura 16 um sistema mola-onda, onde são postas duas cargas, uma positiva, em uma extremidade, e uma negativa, na outra extremidade. Essa exemplificação é conhecida como modelo de Lorentz, que considera um conjunto de dipolos fixos idênticos no espaço livre e as forças eletrostáticas entre as cargas são representadas por molas (GRIFFITHS, 2014).

Figura 16 – Modelo de dipolo atômico.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando a carga q^- e considerando as cargas que atuam no sistema pode-se definir:

Momento de dipolo:

$$\vec{p}_{(z,t)} = -e\vec{d}_{(z,t)} \quad (14)$$

Força do campo externo:

$$\vec{F}_{e(z,t)} = -e\vec{E}_{e(z,t)} \quad (15)$$

Força de amortecimento, que é contrária ao movimento, por causa das colisões entre as moléculas que integram o material:

$$\vec{F}_{a(z,t)} = -m_e \gamma_d \vec{v}_{(z,t)} \quad (16)$$

onde, m_e é a massa do elétron, γ_d é o coeficiente de amortecimento e $\vec{v}_{(z,t)}$ é a velocidade do elétron n.

Por fim, a força restauradora, que obedece a Lei de Hooke, é dada por:

$$\vec{F}_{r(z,t)} = -K_s \vec{d}_{(z,t)} \quad (17)$$

sendo K_s a constante de elasticidade da mola e $\vec{d}_{(z,t)}$ o vetor deslocamento que reflete a distância entre os polos.

Aplicando a segunda Lei de Newton, onde a soma das forças é igual ao produto da massa pelo vetor aceleração e assumindo a definição de aceleração e velocidade como derivadas do espaço S em relação ao tempo t, é possível chegar a Equação 18 (GRIFFITHS, 2014):

$$-e\vec{E}_{e(z,t)} = m_e \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} + m_e \gamma_d \frac{\partial S}{\partial t} + K_s S_{(z,t)} \quad (18)$$

Considerando que o campo elétrico oscilante possua uma parte real e outra imaginária, $\vec{E}_{(z,t)} = \vec{E}_{(z,t)} \pm j\vec{E}_{(z,t)}$ (retangular) ou $\vec{E}_{(z,t)} = \vec{E}_0 e^{-jkz} e^{j\omega t}$ (fasorial), desta maneira o conjunto de soluções delimitado pelas condições iniciais, irá produzir uma solução para a distância $\vec{d}_{(z,t)}$ com uma porção real e outra imaginária (GRIFFITHS, 2014).

Considerando $K_s = \omega_0^2 m$ e as derivadas de primeira e segunda ordem da distância em relação ao tempo correspondem, respectivamente, a $j\omega$ e $-\omega^2$, então reescreve-se a Equação 18 como:

$$-\frac{e}{m} E_s = -\omega^2 d + j\omega \gamma_d d_s + \omega_0^2 d_s \quad (19)$$

Obtém-se o termo d_s o isolando na Equação 19, e sabendo-se a definição de dipolo $p_s = -ed_s$ e seguidamente o vetor polarização $P_s = Np_s$, sendo N a densidade volumétrica de dipolos, é possível chegar a Equação 20:

$$P_s = \frac{\left(\frac{Ne^2}{m}\right)}{(\omega_o^2 - \omega^2) + j\omega\gamma_d} E_s \quad (20)$$

Sabendo-se que,

$$\vec{P}_s = x_e \varepsilon_o \vec{E}_s \quad (21)$$

Então,

$$x_e \varepsilon_o E_s = \frac{\left(\frac{Ne^2}{m}\right)}{(\omega_o^2 - \omega^2) + j\omega\gamma_d} E_s \quad (22)$$

Com isso, pode-se determinar a Equação 23. Sendo que, o termo ressonância é utilizado para a determinação do valor da suscetibilidade.

$$X_{\text{ressonância}} = \frac{Ne^2}{\varepsilon_o m} \frac{1}{(\omega_o^2 - \omega^2) + j\omega\gamma_d} = X'_{\text{ressonância}} - jX''_{\text{ressonância}} \quad (23)$$

Através de uma suscetibilidade complexa, é possível determinar uma permissividade complexa, mediante a Equação 24:

$$\varepsilon_r = x_e + 1 \quad (24)$$

A parcela real e imaginária da permissividade em relação a suscetibilidade, são expressas por:

$$\varepsilon' = (1 + x'_{\text{ressonância}}) \varepsilon_o \quad (25)$$

$$\varepsilon'' = x''_{\text{ressonância}} \varepsilon_o \quad (26)$$

Em síntese, o fato do campo elétrico que incide no material ser complexo, gera um vetor de deslocamento complexo e faz com que haja uma permissividade elétrica relativa complexa, considerando que o comportamento da permissividade é em consequência do comportamento do dipolo do modelo de Lorentz.

Além dos fatores já descritos, há uma parcela da permissividade que ocorre pelo fato do campo elétrico oscilante que incide no material, gerar a formação e movimentação de dipolos, este processo induz um aquecimento no dielétrico, desse modo as moléculas se opõem ao movimento induzido, para preservar sua orientação natural. Esse aquecimento prejudica a orientação dos dipolos, feito pelo campo, já que há uma agitação nas moléculas dificultando o seu posicionamento forçado. Por conseguinte, quanto maior o tempo em que o campo incide em um sentido, maior a probabilidade do alinhamento da molécula, mesmo com a ação da temperatura (HAYT, 2008).

Diante disto, estabelece uma importante característica dos dipolos, intitulado de relaxamento de dipolo, onde pode-se concluir que quanto menor a frequência da onda incidente, maior será a amplitude da polarização e do alinhamento ao campo, isto é, maior será a permissividade relativa, pois haverá um intervalo de tempo maior para que o campo elétrico possa alinhar os dipolos. Em contrapartida, com uma frequência maior, a amplitude da polarização e o alinhamento do campo serão menores, já que há menos tempo para a formação e alinhamento dos dipolos resultando em uma diminuição da permissividade do material (HAYT, 2008).

O relaxamento de dipolo pode ser expresso analiticamente como:

$$X_{relaxamento} = \frac{\frac{N|\vec{p}|^2}{\epsilon_o}}{3K_bT(1 + j\omega\tau)} \quad (27)$$

Sendo T a temperatura em Kelvin, τ o tempo térmico aleatório e K_b a constante de Boltzmann, que tem o valor de $K_b = 1,38064852 \times 10^{-23}$.

Um último ponto significativo para o entendimento da permissividade é a influência de cargas livres, mesmo um dielétrico possuindo uma condutividade baixa, o estudo deste efeito torna possível analisar por exemplo, as características de um material incomum à aplicação como substrato, possíveis impurezas e a presença de íons livres. Deste modo, é

possível descrever a Equação 28, onde retrata uma parcela adicional à já definida permissividade relativa imaginária ε_r'' (GRIFFITHS, 2014).

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_{rd}'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (28)$$

Definindo ε_{rd}'' como a parcela de permissividade imaginária que corresponde as suscetibilidades de ressonância e relaxamento. Diante da Equação 28, o ω é a frequência que determina o quanto da condutividade do material irá refletir na porção de ε_{rd}'' , ou seja, quanto maior for ω , maior será a contribuição da condutividade no valor de ε_{rd}'' (GRIFFITHS, 2014).

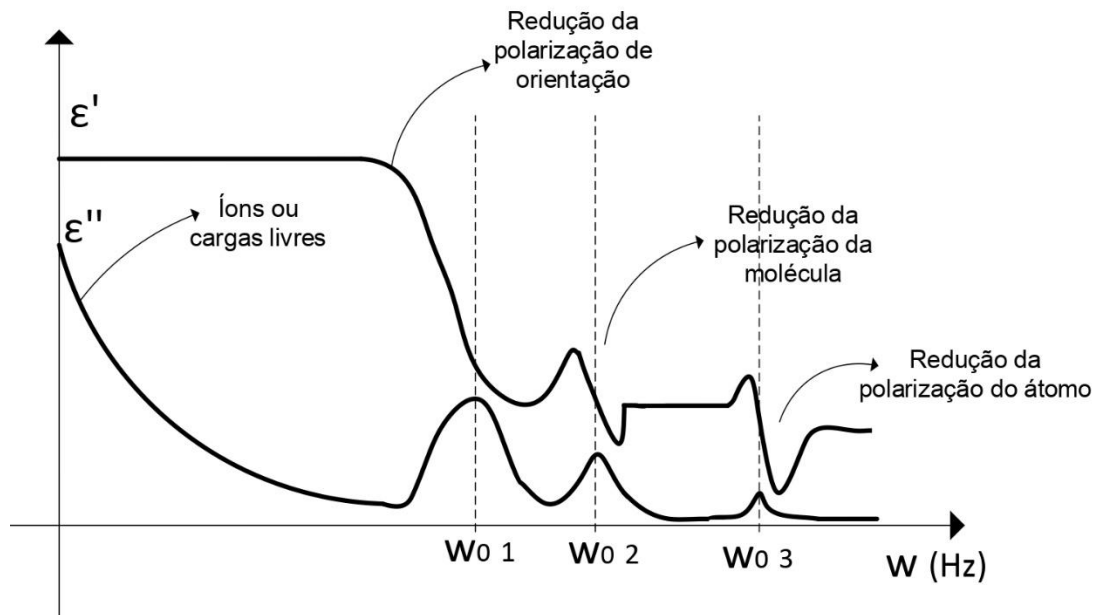
Em moléculas formadas por ligações iônicas, sucede a prevalência da condutividade iônica (σ_i), ou seja, o campo elétrico alinha os íons formando uma corrente iônica (I_i). Essa afirmação esclarece o fato de materiais que possuem água em seu interior, serem prováveis de apresentar altos teores de permissividade imaginária em baixas frequências (HAYT, 2008).

É possível destacar algumas conclusões em relação a permissividade:

- A parcela real da permissividade relativa retrata a capacidade de armazenamento de energia elétrica por meio dos dipolos elétricos em um material, ou seja, o quanto de energia do campo externo pode ser conservado no substrato;
- A parcela imaginária da permissividade relativa aponta as perdas de energia no processo de polarização e alinhamento dos dipolos, essas perdas são verificadas com o aquecimento do substrato, que reduz a suscetibilidade (relaxamento de dipolo) e diminui a permissividade elétrica;
- A permissividade varia diante de diversos fatores como por exemplo, a frequência de onda incidente ω e a temperatura T;
- A presença de impurezas no dielétrico pode ocasionar em uma condutividade relevante acarretando perdas no material, principalmente em baixas frequências.

Diante da análise dos parâmetros referentes ao estudo da permissividade em materiais dielétricos, é possível através da Figura 17 visualizar o comportamento da permissividade relativa em um material genérico, mediante à variações na frequência.

Figura 17 – Comportamento da permissividade em relação à variações na frequência em um material genérico.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE PERMISSIVIDADE

As características eletromagnéticas de um material definem o comportamento das ondas eletromagnéticas que incidem no mesmo. Deste modo, características como permissividade relativa e permissividade complexa são indispensáveis para a determinação do coeficiente de transmissão, de reflexão e a atenuação da onda que se propagam através do material. Para tanto, a aplicação de um método, ao invés de outro, depende do tipo e da informação desejada sobre o material, como sua permissividade (CARVALHO, A.P.; CARVALHO L.P.; CARVALHO J.N, 2016). Algumas técnicas de medição de permissividade são descritas a seguir:

Os métodos fundamentados em transmissão e reflexão são usados para a caracterização de materiais desconhecidos em uma vasta faixa de frequência. Esta técnica propõe a medida dos coeficientes de transmissão e reflexão para uma secção de linha de guia de onda coaxial, sendo parcialmente ou totalmente preenchido com a amostra do material em teste (CARVALHO, A.P.; CARVALHO L.P.; CARVALHO J.N, 2016).

Outro método de transmissão e reflexão aplica a técnica de uma sonda coaxial em aberto. Essa técnica é eficiente para as medições de propriedades dielétricas em uma ampla gama de frequências. A prova de medição de características elétricas 85070 fabricado pela Keysight, usa essa técnica para medir a permissividade elétrica relativa e a tangente de perdas de materiais líquidos e semissólidos. O conjunto de medição deve ser utilizado com um analisador de redes vetorial que responda a faixa de frequência estabelecida, o *software* que acompanha o conjunto de medição é encarregado de fornecer os parâmetros de saída (CARVALHO, A.P.; CARVALHO L.P.; CARVALHO J.N, 2016).

Em casos de materiais desconhecidos em que suas características devem ser fornecidas em uma estreita faixa de frequência e com grande precisão, se faz uso de métodos de ressonância. Os métodos baseados em ressoadores fechados, possuem a melhor precisão inclusive em materiais com baixas perdas dielétricas. Entretanto, ao usar uma técnica de perturbação de cavidade, a elaboração da amostra pode ser complicada para altas frequências. Nesses casos, a cavidade ressonante deve ser maior que a amostra do material. Além disso, as dimensões da amostra devem ser precisas e feitas de uma geometria regular (CARVALHO, A.P.; CARVALHO L.P.; CARVALHO J.N, 2016).

A teoria clássica de Fresnel é utilizada em materiais que têm espessuras maior que o comprimento de onda. O coeficiente de reflexão de uma onda que incide na superfície de um material, pode ser aproximado mediante as equações de Fresnel. Os coeficientes de reflexão e transmissão dependem da frequência, polarização, ângulo de incidência e parâmetros dielétricos do meio (FERREIRA et.al, 2014).

No modelo de multicamada, são consideradas as diversas interfaces de separação de matérias multicamadas, como os materiais utilizados na construção civil. Nesta técnica usa os coeficientes de transmissão e reflexão de Fresnel e amplia para todas as camadas do material, sendo que para cada camada há propriedades dielétricas e espessuras distintas (FERREIRA et.al, 2014).

O método dos modos da linha de transmissão, foi inicialmente proposto para a análise de parede de concreto em bloco, pois trata-se de um método simples para a análise de reflexão e refração de estruturas periódicas. O método supõe uma estrutura multicamada em que cada camada é descrita por uma linha de transmissão. O algoritmo é montado pela sequência dos passos: computação das funções dos modos TE e TM para incidência bidimensional; cálculo da matriz 3-D de transformação de incidência para cada camada periódica ou homogênea que

forma a estrutura; empregando um método de linha de transmissão para resolver o problema de fronteira para toda a estrutura, pode-se definir os coeficientes de transmissão e reflexão (FERREIRA et.al, 2014).

4.5 INFLUÊNCIA DA PERMISSIVIDADE NA FSS

A permissividade elétrica é um dos fatores que podem influenciar no comportamento de uma FSS. O comprimento de onda de uma onda eletromagnética é alterado de acordo com a permissividade do meio. Ademais, substratos com baixas espessuras e altas permissividades são propensos à propagação de ondas de superfícies, fato que pode diminuir a eficiência de antenas combinadas com estruturas periódicas (ARAÚJO, 2014).

A isotropia do substrato, que tem resposta sob a permissividade, também tem efeito no funcionamento da FSS. Em um substrato isotrópico, as ondas eletromagnéticas encontram valores constantes de permissividade elétrica independente da direção do campo elétrico, já os substratos anisotrópicos encontram diferentes valores de permissividade elétrica, de acordo com a orientação do campo elétrico no material (CAMPOS, 2002).

Estas características, como permissividade elétrica, espessura e anisotropia do substrato estão relacionados ao funcionamento de uma FSS, sendo que esses fatores podem alterar o comprimento de onda efetivo do sinal, modificando a frequência de operação da FSS (CAMPOS, 2002).

5. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

5.1 INTRODUÇÃO

Os materiais de construção são definidos como todos os corpos, objetos e substâncias que são utilizados em uma obra de engenharia. Podem ser classificados de acordo com a sua origem ou obtenção, função na obra, aplicação, estrutura interna e natureza. Cada material possui propriedades físicas e mecânicas singulares (PORTAL EDUCAÇÃO, 2018).

5.2 ESQUADRIAS

As esquadrias são elementos das edificações que ligam e constituem os espaços, ou seja, são componentes usados para o fechamento de vãos, que permite o fluxo de pessoas. Os principais tipos de esquadrias são portas e janelas. Podem ser usados vários tipos de materiais para a formação das esquadrias, tais como: madeira, vidro, ferro e policloreto de vinila – PVC (PORTAL EDUCAÇÃO, 2018).

5.2.1 Madeiras

A madeira representa o primeiro tipo de material para a composição de esquadrias, dentre os prós e contras deste tipo de esquadria, pode-se citar o baixo custo, facilidade de execução e montagem, como prós e como contras, a pouca durabilidade e segurança (PORTAL EDUCAÇÃO, 2018). Alguns exemplos de madeiras utilizadas em esquadrias: ipê, roxinho, muiracatiara, *Médium Density Fiberboard* - MDF, angelim, maçaranduba, entre outros.

5.2.1.1 Ipê - *Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl., *Bignoniaceae*

A madeira ipê, ou conhecido como lapacho em alguns países sul-americanos, tem uma altura de 8 a 10 m quando isolada, e pode chegar até a 30 m de altura na floresta, apresenta cerne pardo-acastanhado ou pardo-claro, geralmente uniforme (REMADE, 2018).

Quanto as suas propriedades físico-mecânicas, a madeira é pesada e dura, sendo considerada com alta resistência mecânica e baixa retratibilidade volumétrica e ainda possui grande resistência ao apodrecimento e ao ataque de insetos (REMADE, 2018).

Com relação ao comportamento de secagem do ipê, a secagem ao ar é de média a rápida e demonstra pequenas rachaduras e empenamentos, já a secagem artificial pode acentuar a existência de defeitos (REMADE, 2018).

5.2.1.2 Roxinho - *Peltogyne lecointei Duckei*, *Peltogyne confertiflora* (Hayne) Benth *Caesalpinaceae*

O roxinho, também conhecido como Pau-Roxo, Coataquiçaua, Guarabu, Pau-Roxo-da-Várzea, Violeta e Amarante é uma madeira pesada de cor roxa, sendo considerada uma madeira durável, resistente ao ataque de fungos e ao contato com o solo. Devido à alta impermeabilidade do cerne, sua tratabilidade é dificultada (REMADE, 2018).

5.2.1.3 Muiracatiara - *Astronium lecointei Ducke*, *Anacardiaceae*

A Muiracatiara , também conhecida como, Aroeira, Maracatiara, Sanguessungueira, Aroeirão, Gonçalves-Alves, Maracatiara-Branca, Maracatiara-Vermelha, Muiracatiara-Rajada e Juiracatiara, é uma árvore de grande porte, entre 15 a 20 m e diâmetro de 60 cm, apresenta cerne de cor castanho-avermelhado delineado com faixas verticais castanho-escuro (REMADE, 2018).

A respeito das propriedades físico-mecânicas, é uma madeira pesada que apresenta alta resistência mecânica e baixa retratibilidade. Na secagem natural, a muiracatiara aponta empenamentos e rachaduras, e na extrema secagem artificial, pode apresentar rachaduras profundas e endurecimento superficial (REMADE, 2018).

5.2.1.4 MDF - *Médium Density Fiberboard*.

O MDF é uma chapa fabricada por combinações de fibras de madeira com resinas sintéticas junto com ações de temperatura e pressão. O MDF possui consistência e algumas características mecânicas similares as de madeira maciça. Grande parte dos seus parâmetros físicos de resistência são superiores aos de madeira aglomerada, caracterizando-se também pelo seu bom dimensionamento e alta capacidade de usinagem. As suas chapas são fabricadas de acordo com a utilização final e podem apresentar espessuras que variam de 3 a 60 mm (REMADE, 2018).

5.2.1.5 MDP – *Medium Dentity Particleboard*.

O MDP resulta de um intenso uso de processos de prensas contínuas e modernos classificadores de partículas e softwares de controle e processo, unidos ao uso de resinas e de

madeiras reflorestadas. O MDP é constituído pela junção de partículas de madeira com resinas especiais, por meio de aplicação simultânea de temperatura e pressão, ocasionando em um painel homogêneo e estável (REMADE, 2018).

Com relação aos painéis de MDF, ainda que ambos sejam vistos como painéis de média densidade, na produção do MDP, as partículas de madeira são postas em camadas, fazendo com que as mais finas se aloquem na superfície e as mais delgadas, no núcleo, já no MDF aglutinam-se fibras de madeira (REMADE, 2018).

5.2.1.6 Maçaranduba - *Manilkara huberi* (Ducke) Standl., Sapotaceae.

Também conhecida por Maçaranduba-verdadeira, maparajuba, paralu e maçaranduba-branca. Dentre as árvores da região Amazônica, principal região de sua ocorrência, podem atingir maior porte, entre 30 a 50 m de altura e entre 60 a 120 cm de diâmetro. Apresenta cerne vermelho-arroxeadado, com propensão a tornar-se vermelho-escuro com o tempo (REMADE, 2018).

Entre as propriedades físico-mecânicas, destaca-se o peso da madeira, sua alta retratibilidade volumétrica e durabilidade natural e sua média a alta resistência mecânica. É uma madeira considerada de difícil secagem ao ar, pois apresentam rachaduras, empenamentos e endurecimento superficial, já a secagem superficial tem de ser lenta e controlada (REMADE, 2018).

5.2.1.7 Angelim – *Hyemenolobium petraeum* Ducke Fabaceae.

Outros nomes e espécies afins do angelim: angelim-pedra, angelim-rosa, angelim-grande, angelim-do-Pará, muirarema. Essa madeira é registrada no Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima, em território brasileiro, também encontrada na Guiana, Guiana Francesa e Suriname (REMADE, 2018).

Trata-se de uma madeira dura de cor castanha avermelhada clara, grã irregular, aspecto fibroso e uma textura grossa, além de apresentar uma resistência a ataques de fungos e cupins (REMADE, 2018).

5.2.2 Policloreto de Vinila – PVC

O PVC contém, em peso, 57% de cloro alcançado por meio da eletrólise do sal marinho e 43% de eteno derivado de petróleo. Como todo plástico, o vinil é feito por meio de processos repetitivos de polimerização que convertem hidrocarbonetos, contidos em materiais

como petróleo, em compostos chamados de polímeros. O vinil é basicamente formado por etileno e cloro (INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC, 2019)

5.3 ALVENARIA

Alvenaria é uma etapa da construção civil destinada a criação de estruturas de paredes com elementos unidos com ou sem argamassa, para a construção de paredes, colunas e partes de vedação. Alvenaria pode ser vista como um conjunto de tijolos, blocos ou peças cerâmicas (PEREIRA, 2019).

5.3.1 Tijolos

Os tijolos usados comercialmente podem ser agrupados pelas suas características físico-mecânicas. Os blocos de cerâmica mais comuns são os de 4, 6 e 8 furos e variam de 8 até 15 cm (PEREIRA, 2019).

Os tijolos de cerâmica podem ser classificados, de acordo com a NBR 15270, por ensaios mecânicos de resistência a compressão, absorção de água inicial (AAI), módulos de deformação longitudinal e coeficientes de Poisson (PEREIRA, 2019).

5.3.2 Concreto

O concreto é o produto da mistura de cimento, areia (sílica) e agregados, variando as proporções dos elementos, mas os blocos devem respeitar as condições da NBR 6136 – 2006. Ainda há o uso de aditivos na produção, como os plastificantes, compostos orgânicos que revestem os grãos de cimento, tornando a massa mais fluida e facilitando a sua aplicação. Esses aditivos devem seguir as prescrições da NBR 11768 – 2011 (PEREIRA, 2019).

5.3.3 Gesso

O gesso é o pó de sulfato de cálcio que ao adicionar água, forma uma pasta branca utilizado no acabamento de tetos e paredes. Assim como o cimento, o gesso tem propriedades aglomerantes, que faz com que após a mistura com a água adquira características de “cola” e resistência (PEREIRA, 2019).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi feita com o intuito de realizar a caracterização elétrica dos materiais mais comuns na construção civil, para estudar a aplicação de uma FSS *single-band* do tipo rejeita-faixa que filtre a frequência central de 2,45 GHz, atendendo aos padrões da ISM, de acordo com o IEEE 802.11, intitulado Wi-Fi, em ambientes *indoor*.

Para definir as características elétricas dos materiais, primeiramente foi selecionado um conjunto de amostras de materiais comumente utilizados na construção civil, vistos no item 6.1. Para a medição da permissividade desses materiais foi usado o método da linha coaxial, descrito no item 6.2. Por fim, para realizar o estudo da FSS, foi feito a simulação da FSS para cada material no *software* ANSOFT HFSS, descrito em 6.3.

6.1 MATERIAIS

Os materiais podem ter diferentes características, devido à sua composição, se forem derivados de minerais, ou de acordo com a matéria prima usada em sua produção, em derivados de vegetais (CARVALHO, A.P.; CARVALHO L.P.; CARVALHO J.N, 2016).

Foram selecionadas 20 amostras, todas baseadas na aplicação em construção civil, tanto para alvenaria como esquadria. Dentre elas:

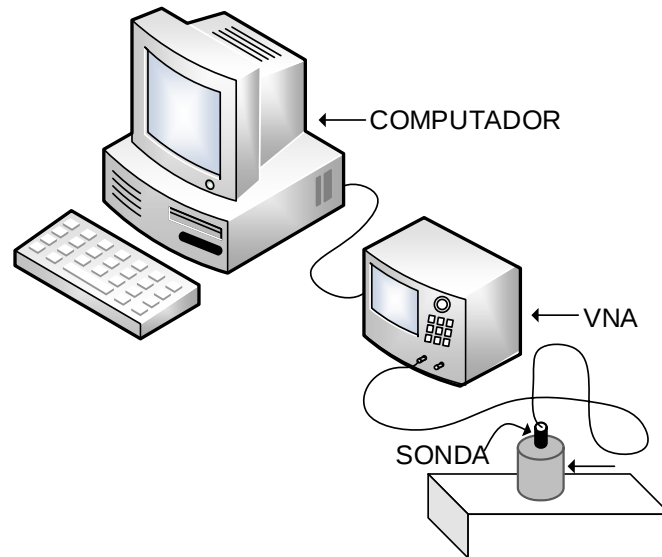
- 8 tipos de madeiras;
- 3 tipos de concretos;
- 5 tipos de tijolos;
- 1 arranjo de tijolo com cimento;
- 1 arranjo de tijolo com gesso;
- 1 forro PVC;
- 1 forro gesso.

6.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA PERMISSIVIDADE - LINHA COAXIAL

O método da linha coaxial é descrito pelo uso de uma linha de transmissão truncada que interage com a impedância do meio encontrado no momento do truncamento. Um Analisador de Redes Vetoriais (*Vector Network Analyser* – VNA) gera o sinal da linha de transmissão. Essa interação possibilita o cálculo do coeficiente de reflexão e com o manuseio

matemático desse parâmetro é obtido o valor da permissividade elétrica do meio que está em contato no momento do truncamento. A Figura 18 mostra o *setup* deste método de medição.

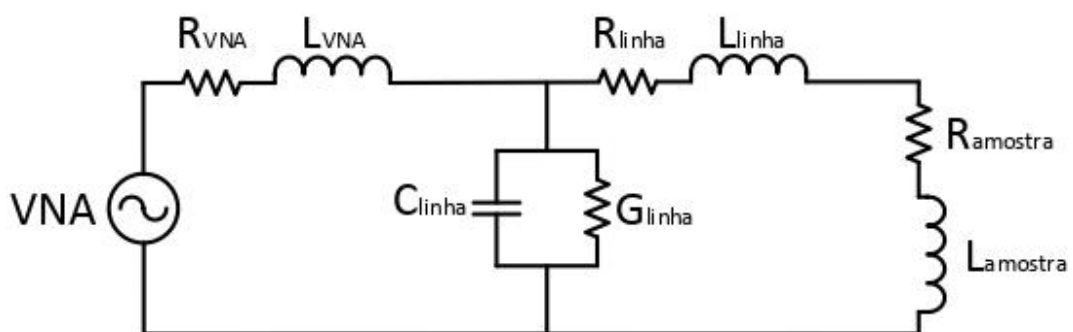
Figura 18 – Setup para medição da permissividade pelo método da linha coaxial.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O VNA é encarregado de emitir e receber o sinal com frequência variáveis mediante a um cabo coaxial interligado ao seu terminal, só é necessária uma conexão, pois apenas o coeficiente de reflexão é de interesse para a medição da permissividade do meio. O computador é importante para garantir uma melhor conexão entre o operador e o VNA, possibilitando configurações em tempo real na operação do analisador. Na ponta do cabo que é conectada à amostra há uma sonda coaxial específica para esse tipo de procedimento, em que existe uma abertura pela qual o sinal é direcionado. A Figura 19 apresenta um circuito genérico que demonstra a configuração dos elementos no método utilizado.

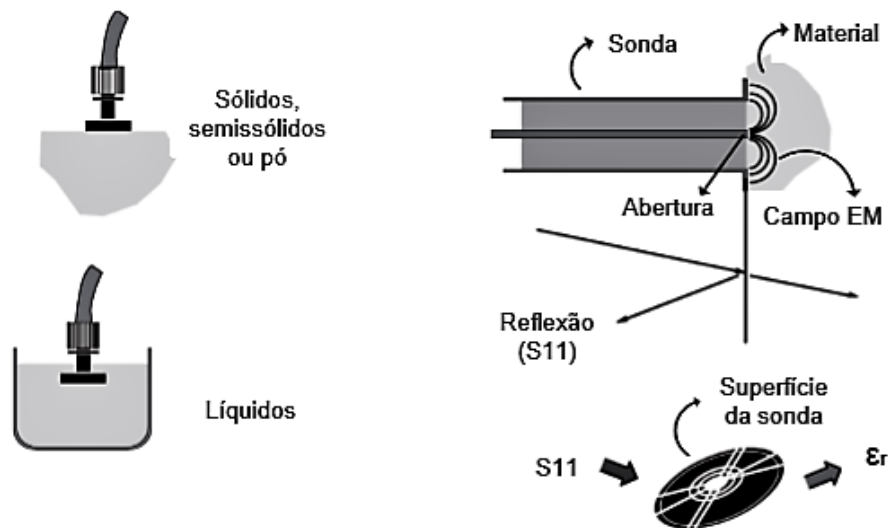
Figura 19 – Circuito genérico para representação de linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de Keysight, 2018.

Por conseguinte, com a sonda posicionada corretamente, a impedância da amostra determina a intensidade da reflexão do sinal enviado pelo VNA, na Figura 20 demonstra como o *probe* interage com a amostra.

Figura 20 – Relação entre o *probe* em materiais líquidos ou sólidos e representação do franjamento do campo EM.



Fonte: Adaptado de Keysight, 2018.

Compreende-se como acontece a interação do campo EM que deixa a linha truncada com a amostra em teste, ele curva-se em direção as extremidades externas do flange delimitando aquela superfície como a impedância da carga Z_L . Esse comportamento indica um franjamento do campo, que é estabelecido pela permissividade do material.

6.2.1 Procedimento experimental

No experimento realizado foram utilizados o VNA 16451B e *Dielectric Probe Kit* 85070, ambos são produzidos pela Keysight. A faixa de frequência estabelecida para os testes foi de 1 a 10 GHz. A sonda usada para a medição foi a *High Temperature Probe*, mostrada na Figura 19, que opera em uma faixa de temperatura de -40 a 200 °C.

A abertura mostrada na Figura 21 assegura o ponto de ruptura, onde o sinal enviado pelo VNA interage com o meio, assim parte do sinal será refletido de acordo com o grau de descasamento de impedância.

Figura 21 – Probe utilizado no experimento.



Fonte: Keysight, 2018.

O procedimento foi realizado seguindo os passos a seguir:

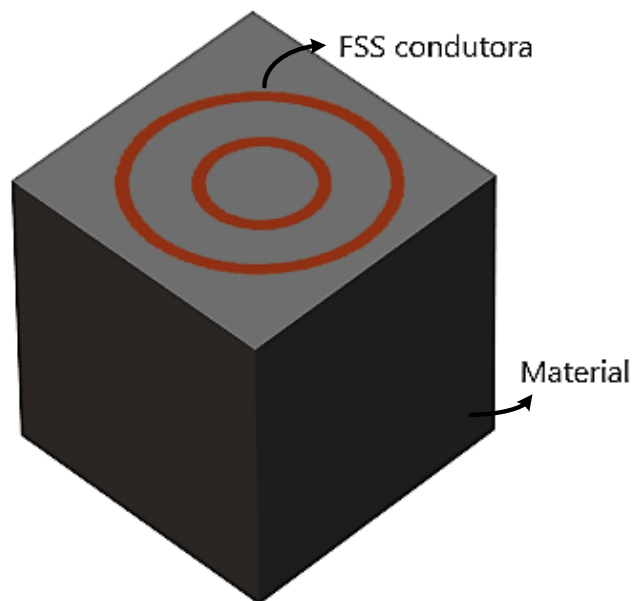
- Preparou-se as amostras, afim de apresentar um nível adequado de limpeza, e para diminuir possíveis interferências das partículas indesejadas, as superfícies sólidas das amostras foram lixadas com a finalidade de reduzir eventuais porosidades do meio e tornando o material mais adepto ao uso;
- Conectou-se o cabo coaxial específico no VNA e ligou-se a sonda no terminal aberto do cabo, evitando dobras e curvas marcantes, já que nestes pontos podem gerar descasamentos de impedância e com isso ocasionar erros na medição;
- Primeiramente realizou-se a medição da permissividade de um material conhecido, para assegurar um ponto de referência no VNA para as medições seguintes. O fabricante indica que a primeira medição seja feita em água destilada e não ionizada, ar e curto-circuito;
- Certificou-se que a amostra do material, em casos de sólidos, estivesse com uma superfície plana para entrar em contato com a sonda;
- Posicionou-se a sonda corretamente e através de um comando específico, o VNA emite variadas faixas de frequência, de acordo com o que foi determinado na configuração do equipamento;
- Com os dados salvos, o analisador expõe os dados calculados de permissividade relativa real e imaginária dos materiais.

6.3 SIMULAÇÃO

Após a caracterização elétrica dos materiais, analisou-se o comportamento de uma FSS do tipo *patch* com elementos circulares. Essa geometria foi fixada para a simulação das FSS devido à sua simplicidade e autonomia no que diz respeito ao ângulo de incidência.

Com a delimitação dos dados de permissividade dos materiais, da geometria e da frequência foi realizado por intermédio do método heurístico as dimensões das FSS para cada material. Esse método foi utilizado por causa da sua facilidade de definir as dimensões para a estrutura. Com as dimensões das FSS estabelecidas foi realizada as simulações no *software ANSOFT HFSS*. No *setup* de simulação, como mostrado na Figura 22, o substrato da FSS é o próprio material. Das simulações são extraídas as perdas de inserção da FSS simulada.

Figura 22 – Setup de simulação.



Fonte: Autoria própria, 2019.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 RESULTADOS PRÁTICOS E TEÓRICOS

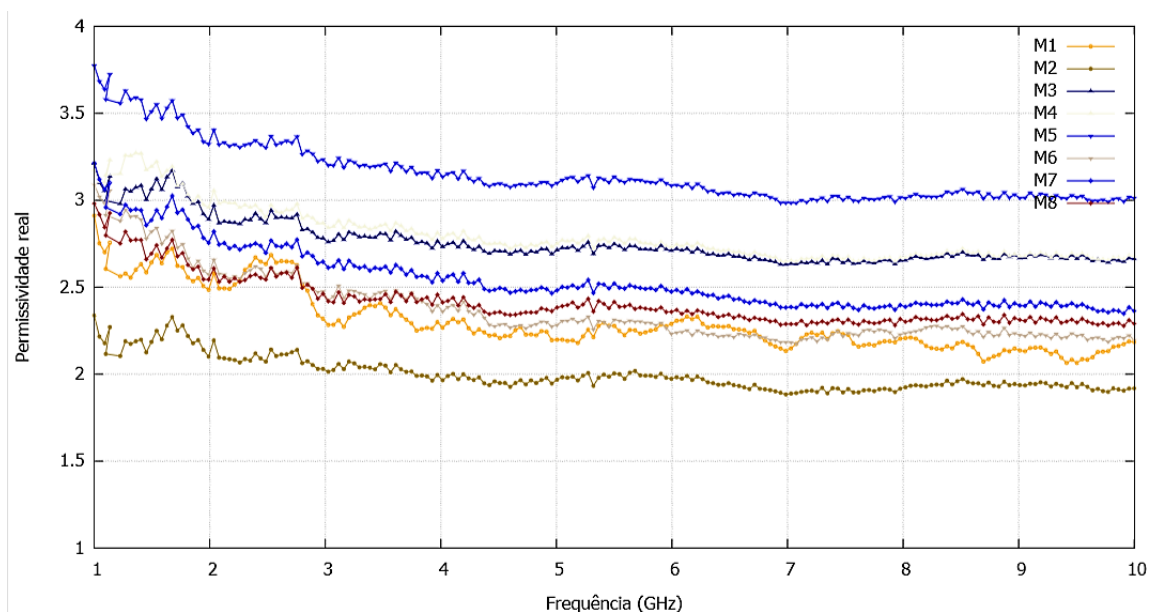
Foi caracterizado eletricamente os materiais, em uma faixa de frequência de 1 – 10 GHz para se ter conhecimento dos valores de permissividade elétrica dos mesmos e assim dimensionar e simular uma FSS para cada material. A seguir será mostrado os resultados da permissividade dos materiais e como a FSS se comporta no mesmo.

Para a simulação, a espessura dos materiais foi de 50 mm com um passo de 0,01 GHz, em todas amostras em uma faixa de frequência de 1 – 4 GHz, utilizando -10 dB como referência.

7.1.1 Madeiras

Todas as amostras apresentaram valores maiores nas primeiras frequências, e tiveram comportamentos parecidos. As placas de madeiras que apresentaram melhores desempenhos foram a MDF claro (M5), a MDF escuro (M3) e a MDP (M4), que a partir de 3 GHz alcançaram maiores valores de permissividade, em relação as demais amostras de madeiras, considerando variações quase lineares em alguns trechos. Os valores de permissividade em relação a frequência das madeiras são apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Permissividade relativa das madeiras.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Esses resultados podem ser explicados pela adição de resina sintética que possui moléculas orgânicas polares e a redução da anisotropia das fibras, pois no processo de fabricação do MDF e da MDP, o material é submetido a etapas de homogeneização mecânica, fazendo com que os mesmos tenham uma maior facilidade de serem polarizados. O Roxinho (M2) foi o que apresentou menor variação em todo o processo e a MDF claro a que obteve uma maior variação.

Na Tabela 01 é mostrado os valores de permissividade das madeiras em 2,45 GHz e suas respectivas tangentes de perdas, percebe-se que os valores são bem semelhantes, e suas tangente de perdas variam aproximadamente de 0,13 a 0,2, o que indica o quão grande é a permissividade imaginária em relação a permissividade real.

Tabela 01 – Permissividade elétrica e tangente de perdas das madeiras em 2,45 GHz.

Material: Madeira	Permissividade real (ϵ')	Permissividade imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas (σ)
M1 - Muiracatiara	2,647	0,5462	0,206347
M2 - Roxinho	2,09	0,3544	0,169569
M3 – MDF escuro	2,892	0,3974	0,137414
M4 - MDP	2,94	0,4825	0,164116
M5 – MDF claro	3,321	0,4977	0,149864
M6 – Muiracatiara rajada	2,606	0,5309	0,203722
M7 – Angelim Pedra	2,738	0,5739	0,209606
M8 - Ipê	2,554	0,4539	0,177721

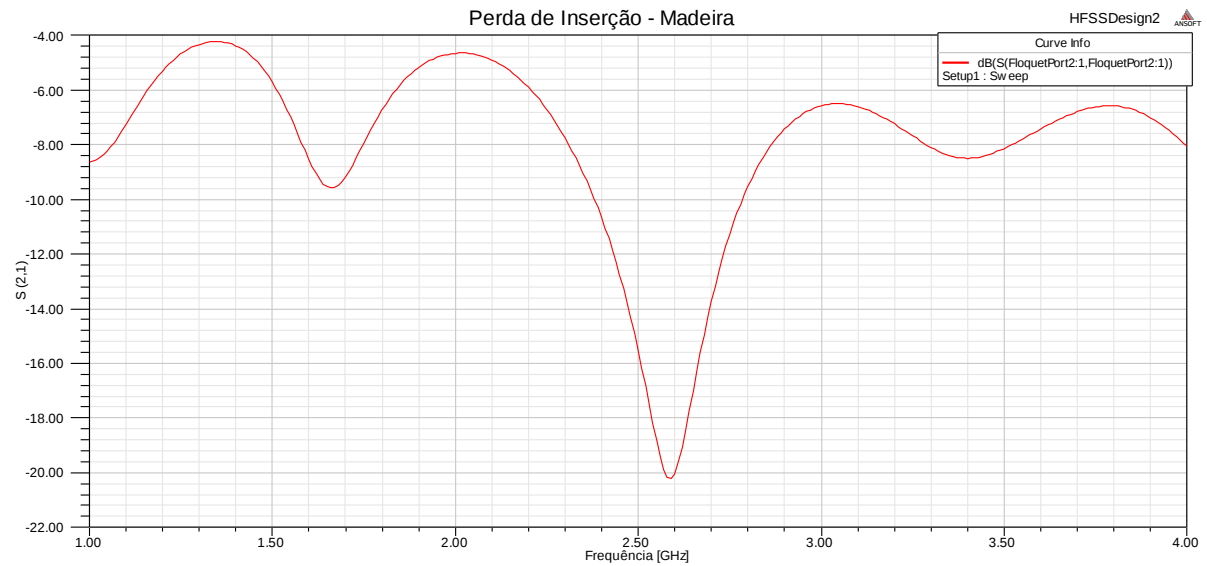
Fonte: Autoria própria, 2019.

A simulação da FSS foi feita para a amostra M5, a Figura 24 mostra a perda de inserção dessa madeira na faixa de frequência de 1 – 4 GHz e na Figura 25 traz as dimensões utilizadas na simulação. A frequência de operação ocorreu em 2,39 GHz (-10,315 dB) com uma frequência central de 2,59 GHz (-20,209 dB) e largura de banda de 390 MHz. Porém, observou-se uma atenuação notável em aproximadamente 1,5 GHz, tendo uma frequência central em 1,66 GHz (-9,576 dB), muito próximo ao ponto de referência -10 dB e em 1 GHz (-8,587 dB).

7.1.2 Tijolos e Concreto

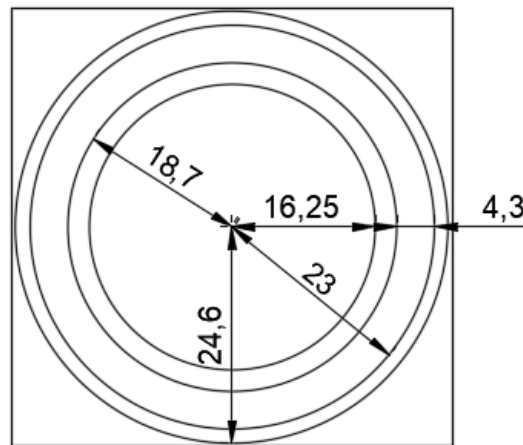
As amostras de tijolos foram preparadas para apresentar uma superfície plana, tendo que lixar a camada superior do material para retirar possíveis impurezas que poderiam ocasionar em perdas no material. Os tijolos demonstraram características mais distintas, em relação as madeiras analisadas. Na Tabela 02 é visto os valores de permissividade elétrica real e imaginária e suas tangentes de perdas na frequência de estudo, isto é, 2,45 GHz.

Figura 24 – Perda de inserção da FSS simulada para a madeira.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 25 – Dimensões da FSS simulada para a madeira.



Madeira

Fonte: Autoria própria, 2019.

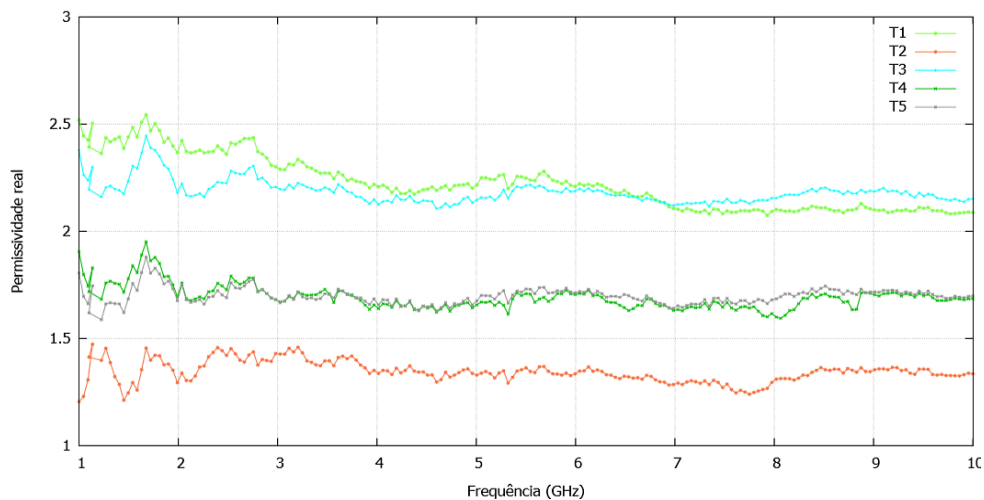
Tabela 02 – Permissividade elétrica e tangente de perdas dos tijolos em 2,45 GHz.

Material: Tijolo	Permissividade real (ϵ')	Permissividade imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas (σ)
T1 – Cerâmica de 8 furos	2,379	0,1483	0,062337
T2 – Cerâmica de 21 furos	1,443	0,0646	0,044755
T3 – Cerâmica maciço branco	2,226	0,1858	0,083464
T4 – Barro maciço	1,745	0,2724	0,15613
T5 – Barro maciço	1,703	0,1178	0,069168

Fonte: Autoria própria, 2019.

Diante da Figura 26, o tijolo de cerâmica de 8 furos (T1) e o tijolo de barro maciço (T4), demonstram um maior valor de permissividade durante todo o teste, principalmente em frequências mais baixas, enquanto o tijolo de 21 furos (T2) possui os menores valores. As tangentes de perdas das amostras variaram de aproximadamente 0,04 a 0,15, sendo o tijolo de cerâmica de 8 furos que obteve o maior valor de permissividade em 2,45 GHz e menor valor da tangente de perdas de 0,062337.

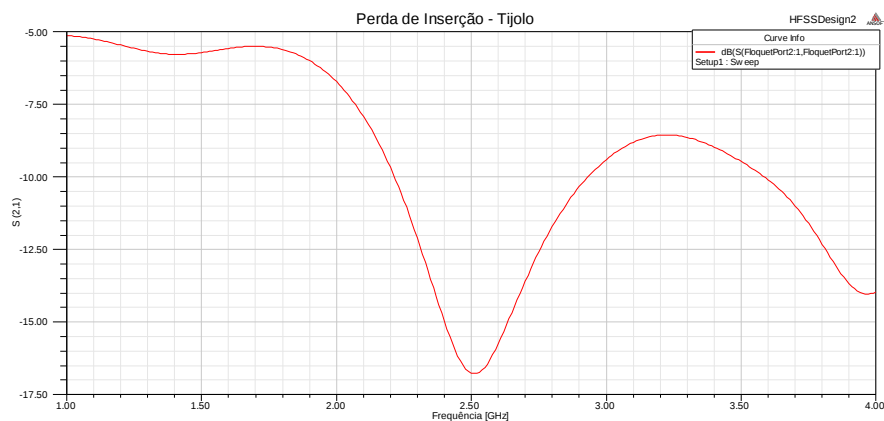
Figura 26 – Permissividade relativa dos tijolos.



Fonte: Autoria Própria, 2019.

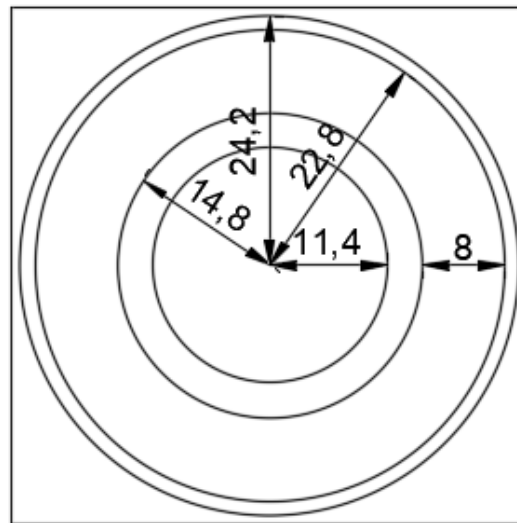
Na simulação foi usado o tijolo de cerâmica de 21 furos, usualmente utilizado em construções, que apresentou um comportamento de rejeita-faixa na banda de 2,45 GHz, tendo uma largura de banda de 690 MHz e uma frequência central de 2,51 GHz (-16,766 dB), além de ter um comportamento de rejeita-faixa em aproximadamente 4 GHz (-14,014 dB). A perda de inserção é mostrada na Figura 27 e as dimensões do projeto mostradas na Figura 28.

Figura 27 – Perda de inserção da FSS simulada para o tijolo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 28 - Dimensões da FSS simulada para o tijolo.

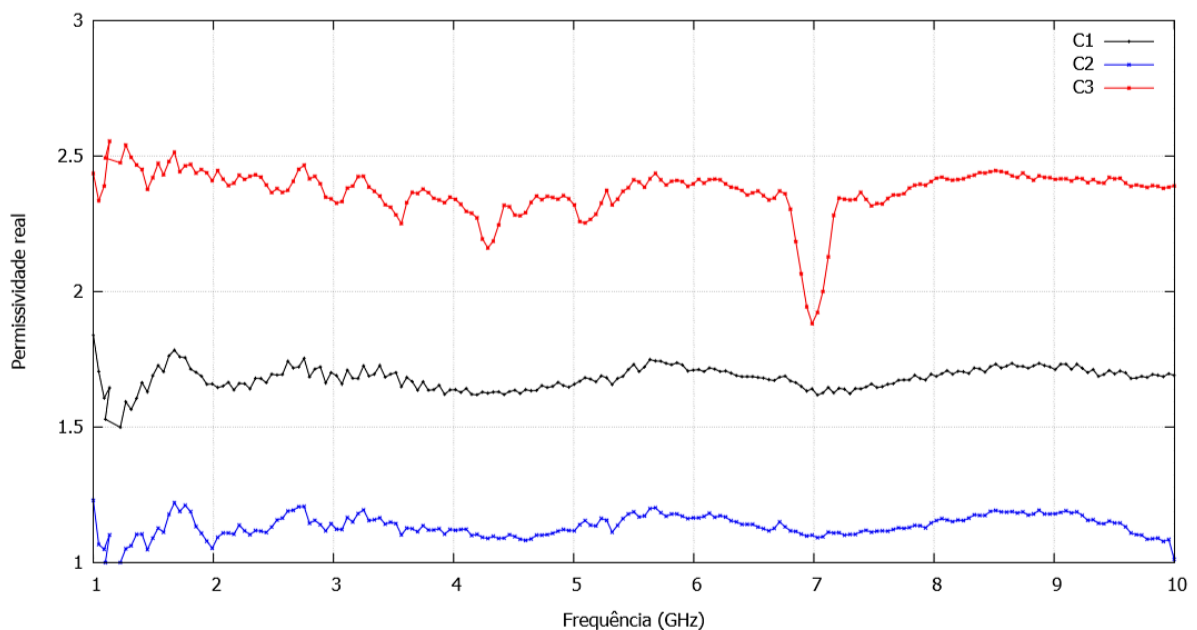


Tijolo

Fonte: Autoria própria, 2019.

Para o concreto, as amostras manifestaram variações consideráveis entre elas, na Figura 29 exibe os valores das permissividades de cada amostra e observa-se que o concreto de vedação (C3) possui permissividades mais elevadas que as demais em todas as frequências, mesmo com uma acentuada queda em torno de 7 GHz, já o concreto artesanal (C2) aponta os menos teores de permissividade, entre as amostras. A tangente de perdas desses materiais possui uma pequena variação, apesar da diferença entre as permissividades relativas, em 2,45 GHz mostrado na Tabela 03, essa tangente varia de 0,02 a 0,07.

Figura 29 – Permissividade relativa dos concretos.



Fonte: Autoria própria, 2019.

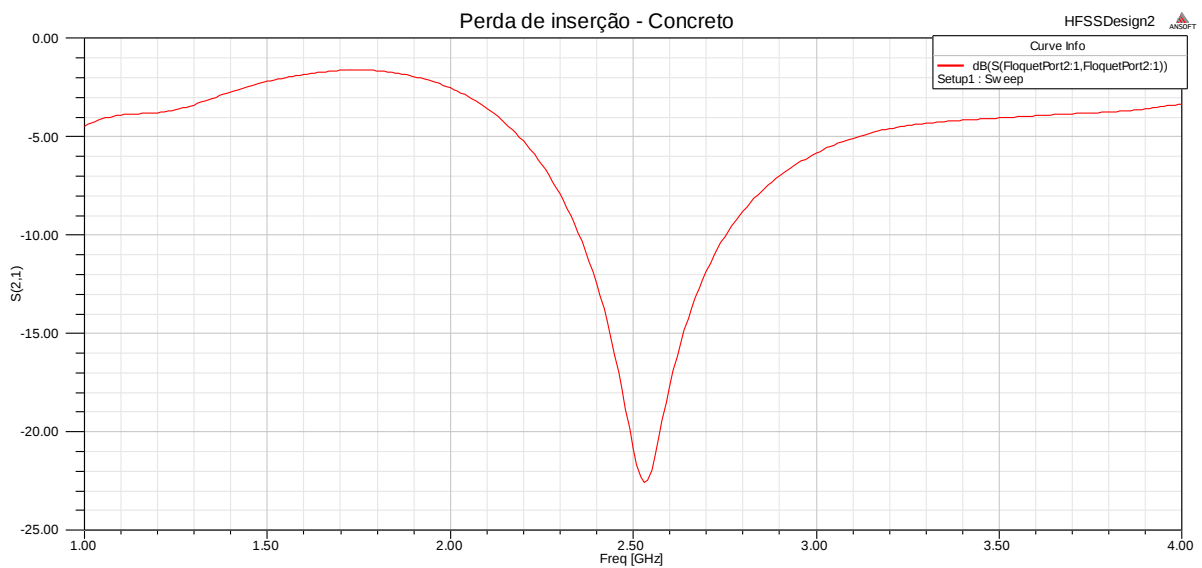
Tabela 03 – Permissividade elétrica e tangente de perdas dos concretos em 2,45 GHz.

Material: Concreto	Permissividade real (ϵ')	Permissividade imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas (σ)
C1 - Estrutural	1,664	0,0786	0,047236
C2 - Artesanal	1,111	0,029	0,026103
C3 - Vedação	2,393	0,1834	0,07664

Fonte: Autoria própria, 2019.

Foi utilizado a amostra C1 para simular a FSS, sua perda de inserção é vista na Figura 30 e suas dimensões descritas na Figura 31.

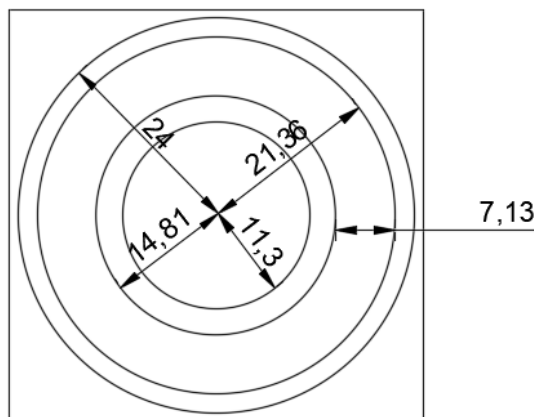
Figura 30 – Perda de Inserção da FSS simulada para o concreto.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A frequência de ressonância ocorre em torno de 2,36 GHz (-10,305 dB) e possui uma largura de banda de 390 MHz, e uma frequência central de 2,53 GHz (-22,563 dB) tendo como referência -10dB.

Figura 31 – Dimensões da FSS simulada para o concreto.



Concreto

Fonte: Autoria própria, 2019.

A forma cristalina dos blocos cerâmicos, como o tijolo e o concreto, pode dificultar a condução de eletricidade, tal qual a ação do campo elétrico. Com isso, a polarização das moléculas também pode ser interferida, havendo redução da polarização do material.

7.1.3 Gesso

O gesso é normalmente utilizado em forros, assim como o PVC, na Tabela 04 é comparado os valores de permissividade desses materiais, e constata-se que a diferença entre eles, na frequência de 2,45 GHz, é pouco notável e a tangente de perdas está entre 0,06 e 0,014.

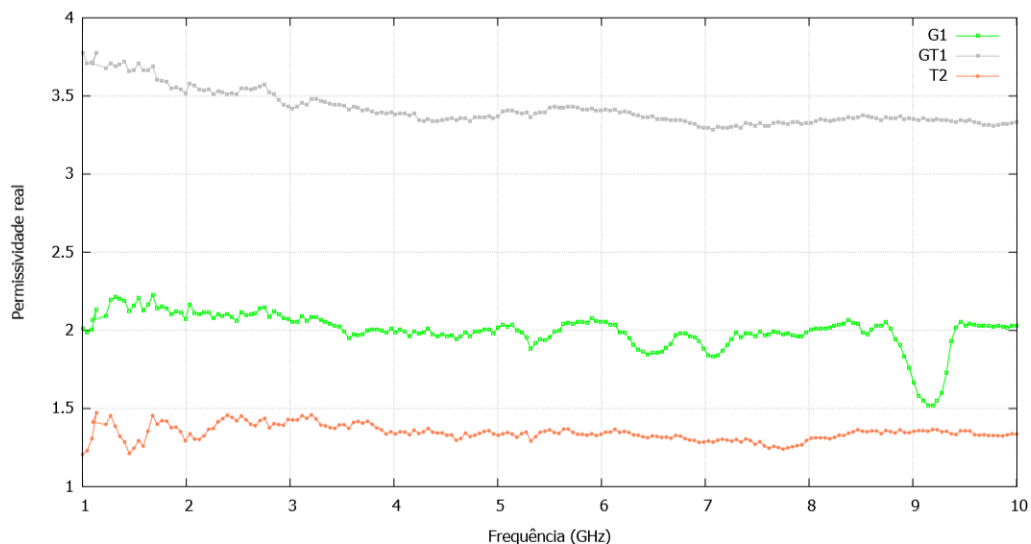
Tabela 04 – Permissividade relativa e tangente de perdas para o gesso e PVC.

Material: Forro	Permissividade real (ϵ')	Permissividade imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas (σ)
G1 - Gesso	2,083	0,131	0,06289
PVC	2,225	0,0331	0,014876

Fonte: Autoria própria, 2019.

Foi utilizado apenas uma amostra de gesso, e um arranjo entre gesso e tijolo, para averiguar a diferença entre o uso da FSS em um material e em um conjunto de materiais. Na Figura 32 retrata a permissividade do gesso, onde pode-se perceber que há pouca oscilação, somente em aproximadamente 9 GHz que houve uma queda, e não demonstra valores elevados, em comparação com a permissividade de um tijolo, que apresenta permissividades mais baixas que a do gesso, e um arranjo entre eles, gesso junto com o tijolo. É perceptível que o conjunto entre o gesso e o tijolo dispõe de uma permissividade consideravelmente elevada com relação aos materiais separados, essa comparação é vista na Tabela 05.

Figura 32 – Permissividade relativa do gesso, tijolo e arranjo gesso e tijolo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

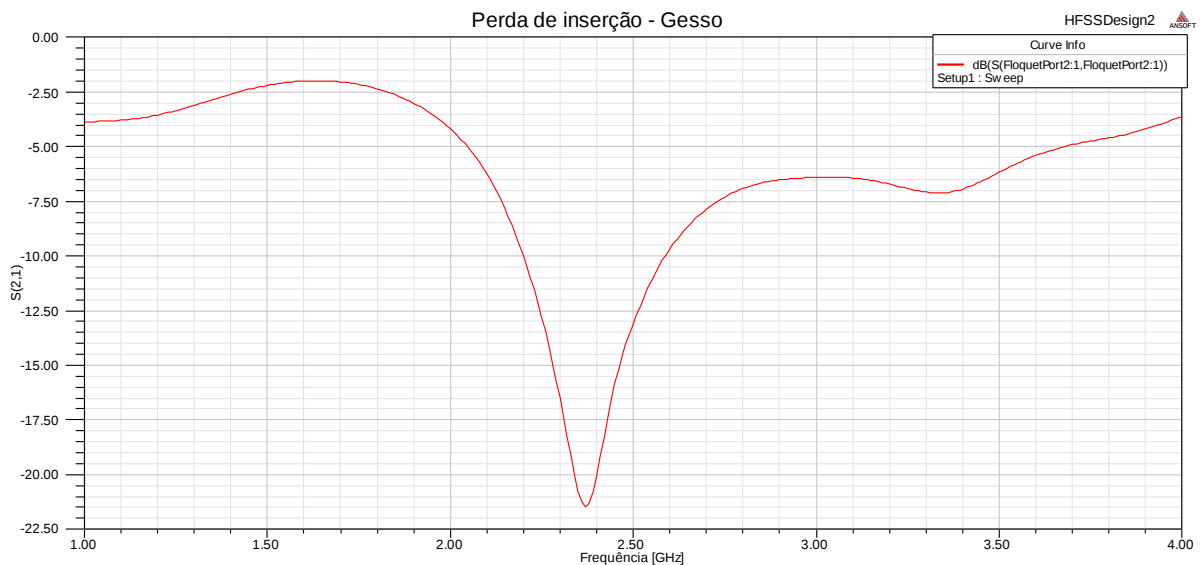
Tabela 05 – Permissividade relativa e tangente de perdas do gesso, tijolo e arranjo gesso + tijolo.

Material	Permissividade real (ϵ')	Permissividade imaginária (ϵ'')	Tangente de perdas (σ)
Gesso	2,083	0,131	0,06289
Tijolo de Cerâmica	1,443	0,0646	0,044768
Gesso e tijolo	3,516	0,4815	0,136945

Fonte: Autoria própria, 2019.

É notória a diferença entre as permissividades relativas das três amostras. O arranjo gesso e tijolo demonstra como o comportamento de um material na presença de um campo elétrico muda ao perpassar uma superfície para outra. E a taxa entre as permissividades variam aproximadamente de 0,04 a 0,13.

A FSS simulada para o gesso, Figura 33, a frequência de ressonância ocorreu em 2,21 GHz (- 10,479 dB) GHz com uma frequência central de 2,37 GHz (-21,471 dB), um pouco abaixo da frequência ideal e uma largura de banda de 360 MHz. As dimensões utilizadas no projeto são vistas na Figura 34.

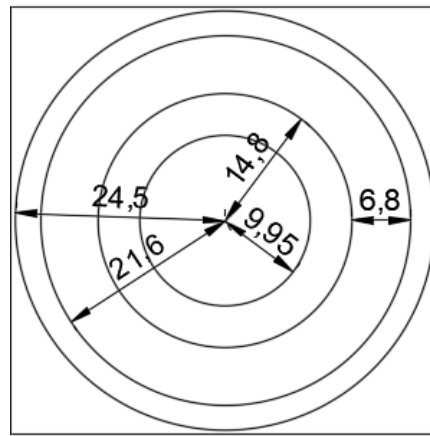
Figura 33 – Perda de inserção da FSS simulada para o gesso.

Fonte: Autoria própria, 2019.

A FSS simulada para o conjunto de gesso e tijolo, apresentou um comportamento distinto de seus componentes separados. Percebe-se que o gesso provocou uma atenuação maior no sinal do que o tijolo, porém houve mais interferências. A frequência de operação para o arranjo entre o gesso e tijolo iniciou em 2,4 GHz (-10,08 dB), com uma frequência central de 2,59 GHz (-21,365 dB) e largura de banda de 380 MHz. Mesmo com uma maior atenuação em comparação com os materiais separados, o arranjo provocou atenuações em 1

GHz (-9,213 dB), em 1,88 GHz (-11,417 dB) e em 3,98 GHz (-12,001 dB) o que acarreta em uma diminuição na eficiência da FSS, já que está afetando outras faixas de frequências indesejadas. A perda de inserção da FSS simulada para o conjunto de gesso e tijolo é mostrada na Figura 35 e as dimensões do projeto expostas na Figura 36.

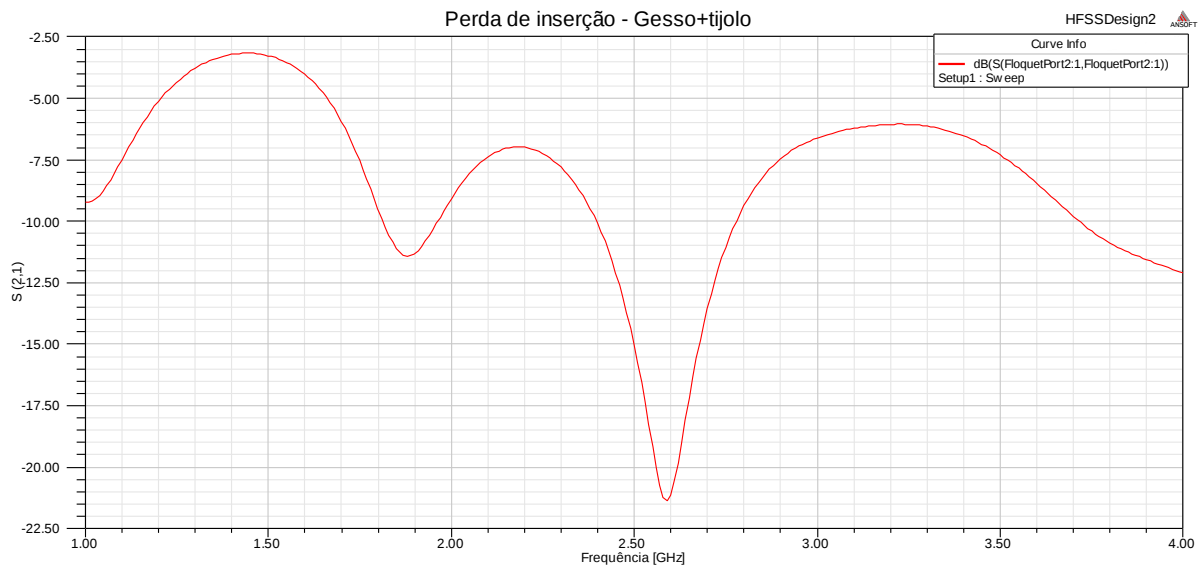
Figura 34 – Dimensões da FSS simulada para o gesso.



Gesso

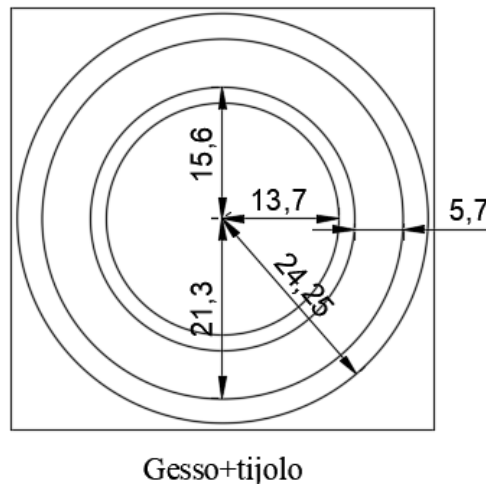
Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 35 – Perda de inserção da FSS simulada para o conjunto gesso e tijolo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 36 – Dimensões da FSS simulada para o conjunto de gesso e tijolo.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Compreende-se que os resultados obtidos são devido a diferença nos valores das permissividades e pelas altas tangentes de perdas, já que os materiais são atípicos para o uso como substrato de uma superfície condutora. A anisotropia dos materiais, as possíveis porosidades existentes e as prováveis irregularidades nas amostras também podem contribuir para as variações apresentadas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de superfícies seletivas em frequência como um filtro rejeita-faixa *single-band* para redes *wireless* em ambientes *indoor* é feito de acordo com a necessidade do projeto. Para a aplicação de FSS em um ambiente específico, se faz necessário o estudo elétrico dos materiais que compõem o espaço, para que se possa ter conhecimento de como o material reage ao ser submetido a um campo elétrico.

Ao longo do presente trabalho, realizou-se a caracterização elétrica de algumas amostras de materiais usualmente aplicados na construção civil e obtidos os valores de permissividade elétrica real e imaginária, para cada amostra estudada, posteriormente obteve-se a tangente de perdas dos materiais. Diante dessas características, foram simuladas uma FSS com *patch* condutor para cada tipo de material, com o intuito de explorar as propriedades da FSS em substratos atípicos.

Quanto ao estudo de caracterização elétrica, percebe-se o comportamento quase que constante em alguns materiais caracterizados, e outros com decréscimo praticamente linear da permissividade real de acordo com o aumento da frequência, o que indica um comportamento estável para aplicações como dielétricos.

Das estruturas simuladas é possível verificar o comportamento de filtro rejeita faixa com largura *single-band*, característico da FSS com elementos do tipo *patch* condutor, em todas as amostras. A frequência central para 2,45 GHz se aproximou em todos os casos, utilizando -10dB como referência e a largura de banda mostrou uma boa correspondência às bandas estabelecidas pelos serviços ISM.

Ao final desse trabalho, são apontadas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar uma comparação entre FSS de vários tipos do mesmo material;
- Construir e verificar a FSS em materiais de construção civil;
- Estudar a aplicação de outras geometrias;
- Analisar aplicações de FSS com superstrato utilizando os materiais da construção civil;
- Investigar a permeabilidade magnética dos meios e estudar a sua interferência;
- Utilizar outros métodos de medição da permissividade para os mesmos materiais analisados.

9. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Lincoln Machado de. **Caracterização de Superfícies Seletivas de Frequência Periódicas e Não-Periódicas**. 2014. 81 f. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

BRAZ, Érico Cadineli. **Análise de Superfícies Seletivas em Frequência com Geometrias Multifractais**. 2014. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

CAMPOS, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. **Análise do Espelhamento em Superfícies Seletivas em Frequência com Multicamadas Dielétricas Anisotrópicas**. 2002. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 2002.

CAMPOS, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. Natal: IFRN Editora, 2009, 196 p.

CARVALHO, A.P.; CARVALHO, L.P.; CARVALHO, J.N.; **Caracterização Eletromagnética de Materiais da Construção Civil na Faixa de Microondas**. In: 17º SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2016, Porto Alegre. Anais do MOMAG 2016, 2016.

CÉSAR, Amílcar Careli. **Matriz Espalhamento (S)**. São Carlos, 2014. 23 slides.

FERREIRA, David; et.al. **A Review on the Electromagnetic Characterization of Building Materials at Micro and Millimetre Wave Frequencies**. 8 th, European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2014, p. 145-149.

FILGUEIRA, Jannayna Domingues Barros. **Cálculo de parâmetros otimizados para superfícies seletivas em frequência por meio do método de otimização Taguchi**. 2016. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GRIFFITHS, David J. **ELETRODINÂMICA**. 3 ed. São Paulo: Editora Pearson Education, 2011. 421 p. Tradução: Eloisa Coimbra de Souza.

HABIB, Shahid; et. al. **Interference Mitigation and WLAN Efficiency in Modern Buildings Using Energy Saving Techniques and FSS**. In: IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 2016, Puerto Rico. p. 955-956.

HAYT JÚNIOR, William H.; BUCK, John A. **ELETROMAGNETISMO**. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 595 p. Tradução: Marco Aurélio de Oliveira Schroeder.

LAW, C.L.; LEE, S.W.; ZARRILLO, G. Simple Formulas for Transmission Through Periodic Metal Grids or Plates. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 1982. vol. 30, n.5, p. 904-909.

MACHADO, Kleber Daum. **TEORIA DO ELETROMAGNETISMO**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2002.

Madeiras brasileiras e exóticas. Disponível em<<http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/1/madeiras-brasileiras-e-exoticas>>. Acesso em: 01.09.2018.

MUNK, Ben A. **Frequency Selective Surface: Theory and Design**. New York: John Wiley & Sons, INC., 2000.

NASCIMENTO, Juarez do. **Telecomunicações**. In:_. **Filtros**. 2 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000. Cap. 12, p. 168-181.

NÓBREGA, Clarissa de Lucena. **ANÁLISE E PROJETO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA COM ELEMENTOS PRÉ-FRACTAIS PARA APLICAÇÕES EM COMUNICAÇÕES INDOOR**. 2013. 144 f. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PEREIRA, Caio. Alvenaria de Vedação – Vantagens e Desvantagens. Escola Engenharia, 2018. Disponível em:<<https://www.escolaengenharia.com.br/alvenaria-de-vedacao/>>. Acesso em: 01.03.2019.

PORTAL EDUCAÇÃO. **Esquadrias na construção civil**. Disponível em:<<https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/educacao/esquadrias-na-construcao-civil/40711>>. Acesso em: 01.09.2018

RASPOPOULOS, Marios; STAVROU, Stavros. Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol 59, n. 8, p. 2998-3005, Agosto de 2011.

RIBEIRO, Carolina. **Como funciona a tecnologia wireless**. Disponível em:<<https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/04/como-funciona-tecnologia-wireless.html>>. Acesso em: 02.03.2019.

SILVA SEGUNDO, Francisco Carlos Gurgel da. **Análise e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência Multibanda e/ou Banda Larga**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, Maurício Weber Benjó da. **SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIAS - FSS: CONCEPÇÃO E PROJETO DE ABSORVEDORES PLANARES DE MICRO-ONDAS PARA APLICAÇÃO EM WLAN, WIMAX E RADAR**. 2014. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

TITAOUINE, Mohammed; et.al. Analysis of Frequency Selective Surface on Isotropic/Anisotropic Layers Using WCIP Method. **ETRI Journal**. Fevereiro de 2007. Vol. 29, n. 1, p. 36-44.

TRINTINALIA, Luiz Cezar. Medida de Matriz de Espalhamento. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1577269/mod_resource/content/1/Exp9.pdf>. Acesso em: 11.08.2018.

WENTWORTH, Stuart M. **Fundamentos de Eletromagnetismo**: com Aplicações em Engenharia. Rio de Janeiro: LTC, 2006. Traduções: Abelardo Podcameni e Gláucio Lima Siqueira.

WU, T. K. **Frequency selective surface and grid array**. New York: Jonh Wiley & Sons, 1995.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **FÍSICA IV: ÓTICA E FÍSICA MODERNA**. In:_. **Natureza e propagação da luz**. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009. Cap. 33, p. 01-23. Tradução: Cláudia Santana Martins.