

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

CAMPUS PATOS DE MINAS

FELIPE AUGUSTO FERREIRA SANTOS

**ANÁLISE PARAMÉTRICA E PROJETO DE
SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA
APLICAÇÕES NA BANDA N78 DO 5G**

PATOS DE MINAS - MG

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

Análise Paramétrica e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência para Aplicações na Banda n78 do 5G

Projeto final de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Felipe Augusto Ferreira Santos

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão

PATOS DE MINAS - MG
2026

ANÁLISE PARAMÉTRICA E PROJETO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA PARA APLICAÇÕES NA BANDA N78 DO 5G

Projeto Final de Curso apresentado à banca avaliadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão

Patos de Minas, 30 de julho de 2026.

Membros da Banca:

Prof. Dr. Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão
(Orientador – FEELT – UFU)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos
(Membro interno – FEELT – UFU)

Profa. Dra. Aline Rocha de Assis
(Membro interno – FEELT – UFU)

Dedico este trabalho a Deus, que guiou meus passos e iluminou minha trajetória. Aos meus pais, que são meu maior exemplo e alicerce, e a toda a minha família, dedico esta conquista como forma de gratidão por todo o amor e suporte incondicional.

"Não deixe que as pessoas digam que você não consegue. Se você tem um sonho, apenas corra atrás dele." (Gabriel "FalleN" Toledo, Discurso MLG Columbus 2016)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força, saúde e resiliência para enfrentar todos os obstáculos desta jornada e chegar até aqui.

Aos meus pais, Karla e Heder, que são a minha maior base e inspiração. Todo o esforço de vocês para me proporcionar educação não foi em vão. Obrigado pelo amor incondicional, pela paciência nos meus dias de estresse e por sempre acreditarem nos meus sonhos, mesmo quando eu mesmo duvidava. Essa conquista é nossa.

Ao meu orientador Guilherme, pela paciência, dedicação e por compartilhar comigo seu vasto conhecimento. Suas orientações, correções e palavras de incentivo foram fundamentais para a construção e conclusão deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia, que contribuíram imensamente para a minha formação profissional e pessoal. Cada aula, debate e desafio me prepararam para o futuro que agora se inicia.

Ao meu irmão Arthur e à minha família de forma geral, pelo apoio constante, por sempre acreditarem no meu potencial e pelas palavras de incentivo nos momentos em que o cansaço batia.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, fizeram parte desta história e contribuíram para que eu alcançasse esse objetivo. Muito obrigado!

Resumo

O presente trabalho apresenta uma análise paramétrica e o projeto de Superfícies Seletivas de Frequência (FSS) voltadas para a operação na banda n78 (3300 a 3800 MHz) das redes de telecomunicações 5G. O objetivo central do estudo é avaliar como as variações nos parâmetros geométricos de diferentes espalhadores metálicos e as propriedades dos substratos dielétricos influenciam o desempenho e a resposta eletromagnética dessas estruturas. Para contornar o alto custo computacional das simulações de onda completa na fase de síntese, foi desenvolvido um simulador analítico iterativo denominado "FSS Explorer", fundamentado no Modelo do Circuito Equivalente (ECM). Através deste software, foram analisadas e otimizadas duas topologias distintas de elementos rejeita-faixa: Anel Quadrado e Cruz de Jerusalém, visando sintonizar a frequência de ressonância fundamental em 3,55 GHz sobre diversos laminados comerciais. A validação do projeto foi realizada mediante a comparação cruzada dos dados analíticos com simulações rigorosas no software Ansys HFSS. Os resultados atestam a excelente precisão preditiva do equacionamento analítico na determinação da frequência central, especialmente em geometrias elementares como o Anel Quadrado, consolidando a metodologia de co-simulação e a ferramenta desenvolvida como instrumentos altamente eficientes para a redução do tempo e esforço computacional no pré-projeto de filtros espaciais para o 5G.

Palavras-chave: Superfícies Seletivas De Frequência. Redes 5G. Banda N78. Modelo Do Circuito Equivalente. Análise Paramétrica. Simulação Eletromagnética.

Abstract

This work presents a parametric analysis and the design of Frequency Selective Surfaces (FSS) aimed at operation in the n78 band (3300 to 3800 MHz) of 5G telecommunications networks. The main objective of this study is to evaluate how variations in the geometric parameters of different metallic scatterers and the properties of dielectric substrates influence the performance and electromagnetic response of these structures. To circumvent the high computational cost of full-wave simulations during the synthesis phase, an iterative analytical simulator named "FSS Explorer" was developed, based on the Equivalent Circuit Model (ECM). Through this software, two distinct topologies of band-stop elements were analyzed and optimized: Square Loop and Jerusalem Cross, aiming to tune the fundamental resonance frequency to 3.55 GHz over various commercial laminates. The design validation was performed through cross-comparison of the analytical data with rigorous simulations in the Ansys HFSS software. The results attest to the excellent predictive accuracy of the analytical equations in determining the center frequency, especially in elementary geometries such as the Square Loop, consolidating the co-simulation methodology and the developed tool as highly efficient instruments for reducing the time and computational effort in the pre-design of spatial filters for 5G.

Keywords: Frequency Selective Surfaces. 5G Networks. N78 Band. Equivalent Circuit Model. Parametric Analysis. Electromagnetic Simulation.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Funcionalidades das metasuperfícies: a)-b) superfície seletiva de frequências (FSS), c) condutor magnético artificial (AMC), d) absorvedores perfeitos banda estreita, e)-g) polarizadores, h) antena <i>leaky-wave</i> , i) <i>transmitarray</i> , j) <i>reflectarray</i> , k) lente de Luneburg e l) holograma.	24
Figura 2 – Ilustração de redes 5G assistidas por FSS.	25
Figura 3 – Filtros de FSS e suas respectivas respostas.	26
Figura 4 – Elementos comuns das FSS distribuídos em grupos.	27
Figura 5 – Elementos especiais das FSS.	29
Figura 6 – Arranjo infinito de fitas condutoras paralelas utilizado como ponto de partida do método do circuito equivalente: (a) incidência TE e (b) incidência TM.	32
Figura 7 – Arranjo periódico de elementos anel quadrado e seu circuito equivalente LC em série: (a) geometria da célula unitária com periodicidade p_q , lado externo d_q , largura da trilha w_q e fenda $g_q = p_q - d_q$; (b) topologia do circuito equivalente.	33
Figura 8 – Arranjo periódico de cruzes de Jerusalém e seu circuito equivalente: (a) geometria da célula unitária com periodicidade p , largura da fita w_c , comprimento total do braço/chapéu d_c , espessura da terminação h_c e fenda g_c ; (b) topologia do circuito equivalente completo (dois ramos LC série em paralelo).	35
Figura 9 – Estrutura de diretórios e arquitetura geral do simulador FSS Explorer.	38
Figura 10 – Análise paramétrica da geometria anel quadrado: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de p_q ; (b) variação de L e C em função de p_q ; (c) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de d_q ; (d) variação de L e C em função de d_q ; (e) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de w_q ; (f) variação de L e C em função de w_q	45
Figura 11 – Análise paramétrica das propriedades do substrato dielétrico no espalhador anel quadrado: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_{sub} ; (b) variação de L e C em função de h_{sub} ; (c) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de ϵ_r ; (d) variação de L e C em função de ϵ_r	47

Figura 12 – Análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém (Parte 1 de 2):	
(a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de p_c ; (b) variação	
de L e C em função de p_c ; (c) variação de f_r e $L \times C$ em função de	
d_c ; (d) variação de L e C em função de d_c ; (e) variação de f_r e $L \times C$	
em função de w_c ; (f) variação de L e C em função de w_c	50
Figura 13 – Análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém (Parte 2 de 2):	
(a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_c ; (b) variação	
de L e C em função de h ; (c) variação de f_r e $L \times C$ em função de	
g_c ; (d) variação de L e C em função de g_c	51
Figura 14 – Análise paramétrica das propriedades do substrato para a Cruz de	
Jerusalém: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_{sub} ;	
(b) variação de L e C em função de h_{sub} ; (c) variação de f_r e do	
produto $L \times C$ em função de ε_r ; (d) variação de L e C em função de ε_r	54
Figura 15 – Comparativo das respostas em frequência ($ S_{21} $) para o Anel Qua-	
drado: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso 4.	58
Figura 16 – Comparativo das respostas em frequência ($ S_{21} $) para a Cruz de	
Jerusalém: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso 4.	61

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tecnologias empregadas no desenvolvimento do simulador FSS	
Explorer.	39
Tabela 2 – Biblioteca de substratos comerciais nativa do simulador analítico.	42
Tabela 3 – Intervalos adotados na análise paramétrica da geometria em anel	
quadrado.	43
Tabela 4 – Intervalos adotados na análise paramétrica da geometria Cruz de	
Jerusalém.	48
Tabela 5 – Configurações de substrato para os projetos do Anel Quadrado.	57
Tabela 6 – Parâmetros geométricos otimizados para o Anel Quadrado em cada	
cenário.	57
Tabela 7 – Validação paramétrica de f_r e Q para os projetos do Anel Quadrado.	58
Tabela 8 – Configurações de substrato para os projetos da Cruz de Jerusalém.	60
Tabela 9 – Parâmetros geométricos otimizados para a Cruz de Jerusalém em	
cada cenário.	60
Tabela 10 – Validação paramétrica de f_r e Q para os projetos da Cruz de Jerusalém.	61

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> - Projeto de Parceria de Terceira Geração
5G	Quinta geração de tecnologia para redes móveis
AMC	<i>Artificial Magnetic Conductor</i> - Condutor Magnético Artificial
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface de Programação de Aplicações
BW	<i>Bandwidth</i> - Largura de banda
C	Capacitância
CORS	<i>Cross-Origin Resource Sharing</i> - Compartilhamento de Recursos de Origem Cruzada
CSS3	<i>Cascading Style Sheets 3</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> - Valores Separados por Vírgula
dB	Decibel
ECM	<i>Equivalent Circuit Model</i> - Modelo do Circuito Equivalente
ES6	<i>ECMAScript 2015+</i>
FDTD	Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	Método dos Elementos Finitos
FSS	<i>Frequency Selective Surfaces</i> - Superfícies Seletivas de Frequência
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i> - Simulador de Estruturas de Alta Frequência
HTML5	<i>Hypertext Markup Language 5</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> - Banda Industrial, Científica e Médica

L	Indutância
LC	Indutância-capacitância
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MoM	Método dos Momentos
Patch	Arranjos periódicos de elementos condutores
PEC	<i>Perfect Electric Conductor</i> - Condutores Perfeitos
PTFE	Politetrafluoretileno
Q	Fator de Qualidade
RF	Radiofrequência
SAGIN	<i>Space-Air-Ground Integrated Network</i> - Rede Integrada Espaço-Ar-Terra
TE	Transverso Elétrico
TM	Transverso Magnético
UAVs	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i> - Veículos Aéreos Não Tripulados
UNII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i> - Infraestrutura Nacional de Informação Não Licenciada
UWB	<i>Ultra Wideband</i> - Banda ultra larga
WCIP	Método das Ondas

Lista de Símbolos

α	Fator de decaimento dinâmico
β	Parâmetro de correção
B_C	Susceptância capacitiva
B_d	Susceptância de acoplamento entre os terminais verticais (Cruz de Jerusalém)
B_g	Susceptância de acoplamento entre os terminais horizontais (Cruz de Jerusalém)
BW	Largura de banda
c	Velocidade de fase da onda/luz
C	Capacitância equivalente do espalhador
d	Comprimento genérico do lado/braço do elemento condutor
d_c	Comprimento total do braço/chapéu (Cruz de Jerusalém)
d_q	Comprimento do lado externo da espira (Anel Quadrado)
E_i	Vetor do campo elétrico da onda plana incidente
E_r	Vetor do campo elétrico da onda refletida
E_t	Vetor do campo elétrico da onda transmitida
ϵ_0	Permissividade elétrica do espaço livre
ϵ_{ef}	Permissividade elétrica efetiva do substrato
ϵ_r	Constante dielétrica relativa do substrato
f_r	Frequência de ressonância fundamental
F	Função de espalhamento
g	Lacuna de espaçamento genérica (fenda intercelular)
g_c	Fenda intercelular primária (Cruz de Jerusalém)
g_q	Fenda intercelular (Anel Quadrado)

G	Função de correção de ordem superior
h_c	Espessura da terminação/chapéu (Cruz de Jerusalém)
h_{sub}	Espessura do substrato dielétrico
L	Indutância equivalente do espalhador
λ	Comprimento de onda no espaço livre
ω	Frequência angular
p	Periodicidade genérica da célula unitária
p_c	Periodicidade da célula unitária (Cruz de Jerusalém)
p_q	Periodicidade da célula unitária (Anel Quadrado)
ϕ	Ângulo de incidência da onda plana (TE)
Q	Fator de qualidade
S_{21}	Parâmetro de espalhamento de transmissão
$\tan \delta$	Tangente de perdas do dielétrico
θ	Ângulo de incidência da onda plana (TM)
$ T ^2$	Coeficiente de transmissão em potência
w_c	Largura da fita (Cruz de Jerusalém)
w_q	Largura da trilha (Anel Quadrado)
X_L	Reatância indutiva equivalente
Y_0	Admitância do espaço livre
Z_0	Impedância do espaço livre

Sumário

1 – Conceitos Introdutórios	18
1.1 Contextualização	18
1.2 Motivação	19
1.3 Objetivos	20
1.4 Organização do trabalho	21
2 – Revisão Bibliográfica	23
2.1 Metasuperfícies	23
2.2 Superfícies Seletivas em Frequência	25
2.2.1 Elementos da FSS	26
2.2.2 Substratos das FSS	28
2.3 Métodos de Análise	30
2.4 Modelo do Circuito Equivalente	31
2.4.1 Modelo do Espalhador Anel Quadrado	33
2.4.2 Modelo do Espalhador Cruz de Jerusalém	34
2.4.3 Considerações Finais	36
3 – Simulador Analítico FSS Explorer	37
3.1 Metodologia e Tecnologias	37
3.1.1 Arquitetura Geral do Software	37
3.1.2 Tecnologias Utilizadas	38
3.1.3 Módulo de Análise Paramétrica	38
3.2 Fundamentação Lógica e Matemática	39
3.2.1 Modelo ECM para Geometrias Condutoras	39
3.2.2 Cálculo do Parâmetro de Transmissão (S_{21})	39
3.2.3 Extração Algorítmica de Métricas Espectrais	40
3.3 Considerações de Aplicação	41
3.3.1 Integração com o Fluxo de Trabalho	41
3.3.2 Biblioteca e Presets de Materiais	41
3.3.3 Módulo de Exportação e Relatórios	41
3.4 Considerações finais	42
4 – Análise Paramétrica	43
4.1 Análise Paramétrica Anel Quadrado	43
4.1.1 Efeito da Variação da Periodicidade (p_q)	44
4.1.2 Efeito da Variação do Comprimento do Lado (d_q)	44

4.1.3	Efeito da Variação da Largura da Trilha (w_q)	44
4.1.4	Efeito do Substrato Dielétrico (h_{sub} e ε_r)	46
4.2	Análise Paramétrica Cruz de Jerusalém	48
4.2.1	Efeito da Variação da Periodicidade (p_c)	49
4.2.2	Efeito da Variação do Comprimento do Braço (d_c)	49
4.2.3	Efeito da Variação da Largura da Trilha (w_c)	52
4.2.4	Efeito da Variação da Espessura da Terminação (h_c)	52
4.2.5	Efeito da Variação da Fenda Intercelular (g_c)	52
4.2.6	Efeito do Substrato Dielétrico (h_{sub} e ε_r)	53
4.3	Considerações finais	54
5	Projeto e Validação das Superfícies Seletivas de Frequência	56
5.1	Análise do Espalhador Anel Quadrado	57
5.1.1	Comparação entre Simulador Analítico e HFSS	57
5.1.2	Análise e Discussão dos Resultados	59
5.2	Análise do Espalhador Cruz de Jerusalém	60
5.2.1	Comparação entre Simulador Analítico e HFSS	60
5.2.2	Análise e Discussão dos Resultados	62
5.3	Considerações finais	62
6	Conclusões e trabalhos futuros.	64
	Referências	66

1 Conceitos Introdutórios

Neste capítulo são apresentados os conceitos introdutórios do trabalho. Assim, tem-se a contextualização, motivação, os objetivos, a metodologia e organização do trabalho.

1.1 Contextualização

O avanço das tecnologias de comunicação sem fio tem impulsionado a demanda por dispositivos e sistemas capazes de operar de forma eficiente em faixas de frequência específicas, minimizando interferências e otimizando o uso do espectro eletromagnético. No cenário do 5G, a banda n78 é uma das mais relevantes, pois oferece um equilíbrio entre cobertura e capacidade de transmissão de dados. A operação eficiente nessa banda é fundamental para atender à crescente demanda por conectividade em ambientes urbanos densos, industriais e residenciais. No entanto, a coexistência de múltiplos sistemas e dispositivos na mesma faixa de frequência pode gerar interferências indesejadas, comprometendo o desempenho das redes e a qualidade do serviço.

No contexto do 5G, as faixas de frequência são padronizadas pelo 3GPP (3rd Generation Partnership Project), que define bandas específicas para garantir interoperabilidade e desempenho adequado dos sistemas de comunicação móvel. Entre as bandas mais comuns destaca-se a n78 (3300–3800 MHz), ambas pertencentes à chamada “C-Band”, reconhecida por oferecer um equilíbrio entre cobertura e capacidade de transmissão de dados, sendo amplamente adotada em diversos países para aplicações urbanas, industriais e residenciais (3GPP, 2023). No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) regulamentou e licenciou a banda n78 (3300–3800 MHz) como principal faixa para a operação comercial do 5G, consolidando-a como a base das redes de quinta geração no país (Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), 2023). Essa padronização facilita a adoção de equipamentos compatíveis internacionalmente, otimiza o uso do espectro e contribui para a mitigação de interferências, aspectos essenciais para o funcionamento eficiente das redes em ambientes com alta densidade de dispositivos e serviços conectados.

Nesse contexto, as superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* - FSS) se destacam como soluções versáteis e eficazes para filtragem espacial de ondas eletromagnéticas, atuando como filtros passa-faixa ou rejeita-faixa de acordo com o projeto de seus elementos metálicos e características do substrato. As FSS são compostas por arranjos periódicos de elementos condutores (Patches) ou aberturas

sobre substratos dielétricos, e sua resposta em frequência depende fortemente da geometria dos elementos, do espaçamento entre eles e das propriedades do material dielétrico utilizado (NOBRE et al., 2024).

A análise e otimização de FSS para a banda n78 do 5G envolvem a investigação detalhada da influência dos parâmetros geométricos dos espalhadores metálicos (tipo, periodicidade, simetria) e dos substratos dielétricos (espessura, permissividade elétrica, tangente de perdas) sobre o desempenho eletromagnético da superfície (NOBRE et al., 2024). A escolha adequada desses parâmetros permite projetar estruturas com alta seletividade, estabilidade angular e de polarização, e compatibilidade com diferentes aplicações, como antenas, filtros, radomes, bloqueadores de sinais e dispositivos de mitigação de interferências (NETO et al., 2023).

Desta forma, o desenvolvimento de FSS específicas para a banda n78, considerando diferentes topologias de patch e substratos, contribui não apenas para a melhoria do desempenho dos sistemas de comunicação 5G, mas também para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de dispositivos eletromagnéticos aplicados.

1.2 Motivação

A rápida evolução das tecnologias de comunicação sem fio, impulsionada pela chegada do 5G, exige dispositivos cada vez mais eficientes para operar em faixas de frequência específicas, como a banda n78 (3300 a 3800 MHz). Essa faixa é estratégica para o 5G, pois oferece equilíbrio entre cobertura e capacidade de transmissão de dados, sendo essencial para ambientes urbanos, industriais e residenciais.

No Brasil, os requisitos técnicos e operacionais específicos para implementação de estações base do 5G *standalone* na banda n78 são delimitados pela Anatel conforme descrito no Ato nº 16539 (Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), 2023) e no Ato nº 915 (Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), 2024). Por estas delimitações, a banda n78 é subdividida entre 3300 MHz a 3700 MHz, destinada ao uso por operadoras para serviços de interesse coletivo, e 3700 MHz a 3800 MHz, destinada ao uso por empresas para serviços limitados privados e implementação da Indústria 4.0.

Com o aumento da densidade de dispositivos e sistemas atuando simultaneamente nessa banda, cresce também o desafio das interferências eletromagnéticas, que podem comprometer a qualidade e a confiabilidade das comunicações (SOUZA, 2018). Nesse cenário, as superfícies seletivas em frequência se destacam por possibilitar o desenvolvimento de filtros espaciais compactos, leves e de baixo custo, capazes de bloquear ou transmitir seletivamente sinais eletromagnéticos sem a necessidade de conexão física direta com outros dispositivos (FILGUEIRA, 2016).

A possibilidade de ajustar o desempenho das FSS por meio do controle dos parâmetros geométricos dos elementos metálicos e das características dos substratos dielétricos abre caminho para a otimização da resposta em frequência, da largura de banda e da estabilidade angular dessas superfícies (SOUZA, 2018; BRANDAO, 2022). Ao mesmo tempo, a diversidade de geometrias e substratos comerciais existentes faz com que a escolha adequada da combinação entre eles, que irá resultar no melhor desempenho para a aplicação desejada, se torne um desafio.

Diante desse cenário, torna-se necessária a investigação de como diferentes geometrias de patches e substratos dielétricos afetam o desempenho das FSS na banda n78. Nesse contexto, este trabalho propõe a realização de análises sistemáticas e comparativas sobre a influência desses parâmetros, permitindo projetar FSS com melhor desempenho, maior seletividade e potencial de integração em soluções inovadoras para o 5G.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros geométricos de diferentes espalhadores metálicos e substratos dielétricos no desempenho de superfícies seletivas em frequência, e projetar estas estruturas para operação na banda n78 (3300 a 3800 MHz) do 5G.

Os objetivos específicos do trabalho são listados como:

- Realizar uma revisão sobre superfícies seletivas em frequência, abordando conceitos fundamentais, métodos de análise e principais aplicações, com ênfase em estruturas voltadas para micro-ondas e sistemas de comunicação 5G.
- Modelar e analisar, por meio do método do circuito equivalente (ECM), os elementos de patch anel quadrado e cruz de Jerusalém, considerando incidência normal e uma periodicidade na frequência central da banda n78.
- Realizar uma análise paramétrica, avaliando como a impedância e o comportamento em frequência dos patches mudam com a variação dos parâmetros geométricos e das características dos substratos dielétricos.
- Utilizar os resultados obtidos individualmente com o modelo ECM para identificar, para cada geometria, conjuntos de parâmetros que permitam a operação como FSS na banda n78.
- Simular, no software ANSYS HFSS, as geometrias otimizadas pelo modelo ECM, comparando as respostas obtidas via ECM e via HFSS, analisando aspectos como frequência de ressonância e fator de qualidade.
- Comparar o desempenho das diferentes topologias de patch e substratos quanto à seletividade e eficiência para a banda n78, indicando as melhores combinações

para aplicações em sistemas 5G.

1.4 Organização do trabalho

Para uma melhor compreensão e encadeamento lógico dos conceitos, metodologias e resultados obtidos, este trabalho final de curso está estruturado em cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

O **Capítulo 1** apresenta as considerações iniciais da pesquisa, introduzindo a contextualização do tema voltado ao 5G e à banda n78. Em seguida, expõe a motivação que impulsionou o estudo e define de forma clara os objetivos gerais e específicos que norteiam o desenvolvimento do trabalho.

O **Capítulo 2** é dedicado à revisão da literatura e fundamentação teórica. Nele, são abordados os conceitos fundamentais sobre metasuperfícies e Superfícies Seletivas de Frequência (FSS), detalhando as propriedades de seus elementos e substratos dielétricos. O capítulo também discute os métodos de análise eletromagnética, com ênfase no Modelo do Circuito Equivalente (*Equivalent Circuit Model* – ECM), detalhando o equacionamento para as geometrias de Anel Quadrado e Cruz de Jerusalém.

O **Capítulo 3** descreve a metodologia de desenvolvimento do simulador analítico iterativo criado para este projeto, denominado FSS Explorer. O capítulo detalha a arquitetura do software, as tecnologias empregadas, a fundamentação matemática que converte o equacionamento de micro-ondas em algoritmos e explica a aplicação da ferramenta no fluxo de projeto da FSS.

O **Capítulo 4** apresenta uma análise paramétrica rigorosa das duas topologias propostas. Através de simulações iterativas, este capítulo investiga minuciosamente como variações isoladas nas dimensões dos espalhadores metálicos (periodicidade, fendas, largura de trilhas) e nas características do substrato (espessura e permissividade) influenciam a sintonia e o desempenho das FSS.

O **Capítulo 5** concentra-se na etapa de projeto final e na validação eletromagnética das estruturas otimizadas para a banda n78 (3,55 GHz). O capítulo expõe a comparação direta entre as respostas sintetizadas pelo simulador analítico FSS Explorer e as simulações de onda completa realizadas no software Ansys HFSS, discutindo a exatidão, os desvios causados por perdas termodinâmicas e a eficácia de cada geometria. Por fim, apresenta as conclusões gerais sobre a viabilidade das estruturas validadas.

O **Capítulo 6** apresenta as conclusões gerais da pesquisa, sintetizando os resultados obtidos na análise paramétrica e no projeto das FSS voltadas para a banda n78 do 5G. O capítulo destaca as contribuições do simulador analítico FSS Explorer e

discute a confiabilidade e os limites da teoria do Modelo de Circuito Equivalente em relação à complexidade das geometrias avaliadas. Além disso, o texto pontua as restrições físicas do modelo matemático idealizado que foi implementado. Por fim, são propostas recomendações para a continuidade do trabalho, sugerindo a expansão das capacidades computacionais do simulador, novas simulações de distribuição de corrente no Ansys HFSS e a fabricação de protótipos físicos para validação experimental.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Metasuperfícies

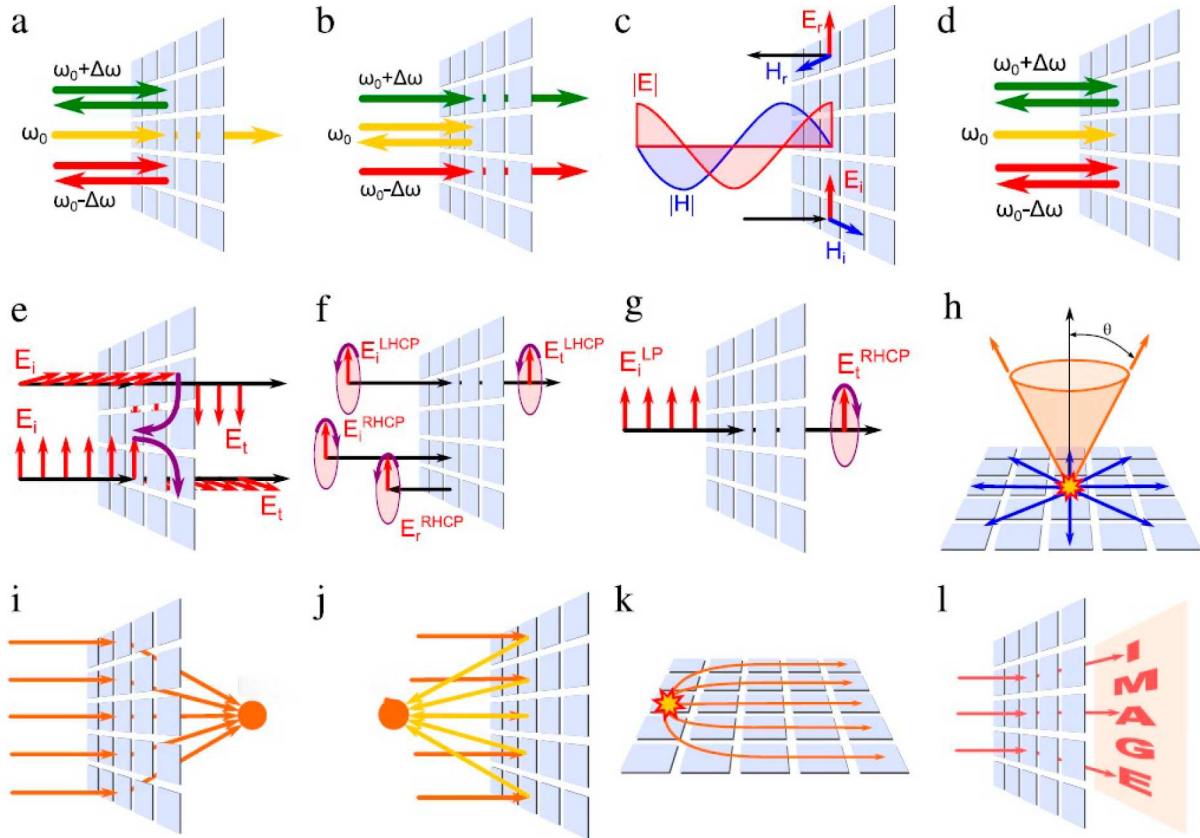
Metasuperfícies são estruturas bidimensionais compostas por arranjos periódicos ou quase-periódicos de elementos metálicos ou dielétricos, denominados meta-átomos, cujas dimensões e periodicidade são muito menores que o comprimento de onda da radiação eletromagnética de interesse. Essa característica permite que a metasuperfície seja tratada como uma superfície efetivamente homogênea do ponto de vista eletromagnético, facilitando sua modelagem e integração em dispositivos modernos (BUKHARI; VARDAXOGLU; WHITTOW, 2019).

A principal função das metasuperfícies é manipular ondas eletromagnéticas de forma precisa e local, controlando propriedades como amplitude, fase e polarização das ondas refletidas, transmitidas ou absorvidas (NOBRE et al., 2024). Isso é possível porque, ao incidir sobre a metasuperfície, a onda eletromagnética induz dipolos elétricos e magnéticos nos meta-átomos, gerando correntes superficiais que criam descontinuidades abruptas nos campos tangenciais. Essas descontinuidades são modeladas matematicamente por meio de parâmetros superficiais, como susceptibilidades elétricas e magnéticas, ou impedâncias superficiais.

As metasuperfícies podem ser projetadas para operar em diferentes faixas de frequência e para responder de maneira específica a ondas eletromagnéticas com diferentes ângulos de incidência e polarizações (SOUZA, 2018). Isso as torna extremamente versáteis, com aplicações em antenas (como refletores de fase, superestratos para diretividade, miniaturização e redução de acoplamento), óptica plana (metalentes, hologramas, polarizadores ultrafinos), absorvedores seletivos, camuflagem eletromagnética, sensores e dispositivos biomédicos, além de superfícies inteligentes reconfiguráveis (GLYBOVSKI et al., 2016). A representação de algumas funcionalidades e aplicações de metasuperfícies é apresentada na Figura 1.

As metasuperfícies apresentam uma vasta gama de funcionalidades aplicadas ao controle espacial e espectral das ondas eletromagnéticas, conforme ilustrado na Figura 1. Dentre este amplo espectro de operações, as Superfícies Seletivas de Frequência (FSS) despontam como uma de suas aplicações primárias e de maior relevância prática, evidenciada pelos comportamentos de filtragem representados nas subfiguras *a* e *b*. No contexto das redes móveis de quinta geração, as FSS podem ser rigorosamente sintetizadas para atuar na banda n78, otimizando o desempenho de sistemas irradiantes e filtros por meio da passagem ou rejeição altamente seletiva de

Figura 1 – Funcionalidades das metasuperfícies: a)-b) superfície seletiva de frequências (FSS), c) condutor magnético artificial (AMC), d) absorvedores perfeitos banda estreita, e)-g) polarizadores, h) antena *leaky-wave*, i) *transmitarray*, j) *reflectarray*, k) lente de Luneburg e l) holograma.



Fonte: (GLYBOVSKI et al., 2016).

sinais. Esta filtragem espacial e espectral é um mecanismo fundamental para mitigar interferências oriundas de sistemas de radiocomunicação concorrentes, a exemplo das redes Wi-Fi operantes nas faixas não licenciadas ISM e UNII, favorecendo, simultaneamente, o desenvolvimento de infraestruturas de telecomunicações mais compactas e de alta diretividade (ARAUJO, 2009).

A fabricação das metasuperfícies é facilitada pelo fato de serem essencialmente planas, podendo ser produzidas por técnicas convencionais de microfabricação, como litografia, o que reduz custos e permite integração com circuitos e sistemas ópticos ou de radiofrequência. Além disso, a espessura ultrafina das metasuperfícies (tipicamente de uma única camada de meta-átomos) contribui para a redução de perdas por absorção e para a miniaturização de dispositivos (GLYBOVSKI et al., 2016).

A flexibilidade de engenharia dessas estruturas permite o desenvolvimento de soluções reconfiguráveis, capazes de adaptar suas características em tempo real, o que é particularmente vantajoso em cenários urbanos dinâmicos e de alta mobilidade (SOUTO, 2020). Assim, o uso de FSS contribui não apenas para a miniaturização

de antenas, mas também para o controle preciso do diagrama de radiação, aspectos essenciais para o gerenciamento eficiente do espectro e mitigação de interferências em redes heterogêneas.

A [Figura 2](#) ilustra de maneira abrangente a versatilidade das FSS em redes 5G, evidenciando sua integração em diferentes plataformas tecnológicas para aprimorar o desempenho e o gerenciamento espectral das comunicações móveis.

Figura 2 – Ilustração de redes 5G assistidas por FSS.



(a) Comunicações SAGIN, com FSS embarcadas em satélites, plataformas de alta altitude, UAVs, navios e estações base para gerenciamento espectral.



(b) Comunicações ar-terra, com FSS integradas a UAVs, painéis e edifícios para controle de propagação.

Fonte: Adaptado de [\(CHEN et al., 2024\)](#).

2.2 Superfícies Seletivas em Frequência

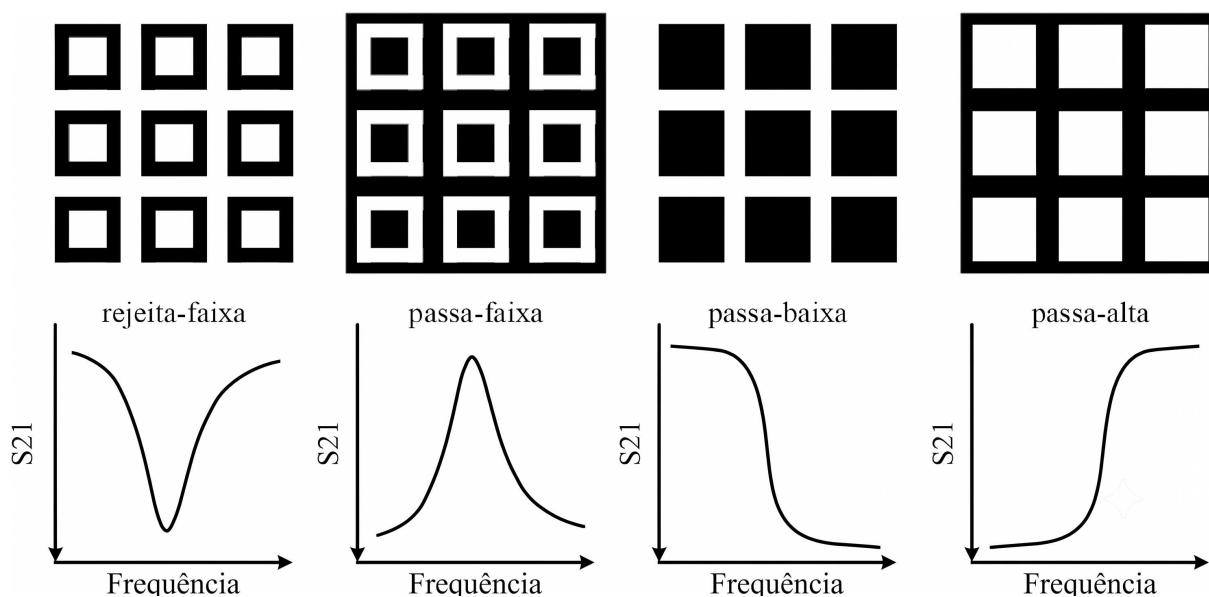
Segundo [\(MUNK, 2000\)](#) as FSS são estruturas periódicas bidimensionais compostas por elementos metálicos condutores, conhecidos como patches ou aberturas, impressos sobre substratos dielétricos. Essas superfícies funcionam como filtros espaciais para ondas eletromagnéticas, permitindo ou bloqueando a passagem de sinais em faixas específicas de frequência, de maneira análoga aos filtros elétricos convencionais.

O comportamento de filtragem das FSS é definido pela natureza dos seus elementos básicos. As FSS capacitivas, compostas por patches metálicos sobre o substrato, apresentam característica de filtro rejeita-faixa. Quando a frequência da onda incidente coincide com a frequência de ressonância desses elementos, a estrutura reflete a maior parte da energia, atuando como um condutor quase perfeito. Já as FSS indutivas são constituídas por aberturas periódicas em uma superfície condutora e operam como filtros passa-faixa, permitindo a transmissão quase total da onda na frequência próxima à ressonância dessas aberturas [\(CAMPOS, 2008\)](#).

A modelagem das FSS pode ser realizada por meio de circuitos equivalentes do tipo LC (indutância-capacitância), em configurações série ou paralelo. A resposta

em frequência depende de parâmetros geométricos dos elementos, da periodicidade do arranjo, das propriedades dielétricas do substrato e de sua espessura. Com essa flexibilidade de projeto, é possível obter respostas do tipo rejeita-faixa, passa-faixa, passa-baixa e passa-alta (CAMPOS, 2008). A Figura 3 ilustra o comportamento típico da resposta em frequência de diferentes tipos de estruturas geométricas.

Figura 3 – Filtros de FSS e suas respectivas respostas.



Fonte: Adaptado (CAMPOS, 2008).

Um aspecto importante na concepção das FSS é a seletividade angular, que se refere à capacidade de resposta variável conforme o ângulo de incidência da onda eletromagnética. Essa característica permite que a FSS mantenha seu desempenho eficaz diante de variações na direção da onda incidente, essencial para aplicações que envolvem múltiplas direções de propagação. Além disso, a sensibilidade à polarização da onda incidente pode ser controlada pelo formato e disposição dos elementos, possibilitando o ajuste fino dos padrões de radiação e redução de interferências indesejadas (ANWAR; MAO; NING, 2018). Essa característica pode ser explorada para corrigir padrões de emissão em antenas ou sistemas de comunicação.

2.2.1 Elementos da FSS

A geometria do patch figura como um dos fatores mais determinantes na configuração do desempenho das FSS. Segundo (MUNK, 2000), a configuração geométrica do patch não apenas interfere diretamente na distribuição de corrente induzida pelos campos eletromagnéticos incidentes, mas é determinante para a seletividade espectral, a largura de banda, e a estabilidade angular da estrutura. (MUNK, 2000) organizou as principais geometrias empregadas em FSS em quatro grupos clássicos, fundamen-

tando sua classificação em características topológicas, propriedades ressonantes e comportamento frente às variações de incidência do campo. A divisão proposta dos elementos das FSS é descrita nos seguintes grupos:

- **Grupo 1 - N-polos conectados pelo centro**

Inclui elementos como dipolos simples, dipolos cruzados, cruz de Jerusalém e similares. São geometrias constituídas por braços condutores conectados a partir do centro, favorecendo uma largura de banda moderada e apresentando menor sensibilidade ao ângulo de incidência da onda eletromagnética incidente.

- **Grupo 2 - Espiras**

Abrange formas como espiras quadradas, anéis circulares e duplos anéis concêntricos. Esses elementos são conhecidos por propiciar elevada largura de banda e estabilidade angular, ressoando de modo mais eficiente quando o perímetro médio da estrutura corresponde a um comprimento de onda.

- **Grupo 3 - Elementos com interior sólido**

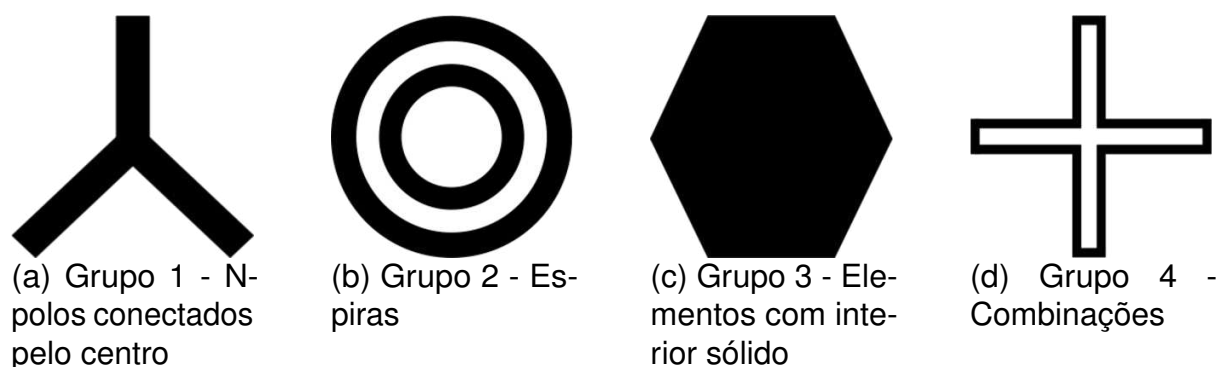
Patches sólidos, como retangulares, circulares, hexagonais e afins. Sua fabricação é facilitada pela simplicidade geométrica, embora sofram maior degradação de desempenho frente a alterações no ângulo de incidência.

- **Grupo 4 - Combinações**

Reúne configurações híbridas ou associações entre diferentes geometrias básicas (por exemplo, uniões entre espiras e dipolos, ou patch com aberturas). São empregadas para possibilitar respostas multibanda, miniaturização ou adaptar a estrutura para requisitos específicos, mesmo que o controle sobre múltiplas ressonâncias demande maior complexidade analítica e de projeto.

Considerando a classificação previamente exposta, é possível observar na **Figura 4** distintas ilustrações que evidenciam as principais configurações empregadas nos elementos das FSS.

Figura 4 – Elementos comuns das FSS distribuidos em grupos.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2014).

Com o avanço significativo das técnicas de engenharia e fabricação ampliaram-

se as perspectivas de inovação para além das geometrias clássicas, proporcionando um novo patamar de desempenho e funcionalidade para essas estruturas. Um dos principais marcos deste progresso é a incorporação de elementos fractais na concepção das FSS. Sob o ponto de vista técnico, elementos fractais distinguem-se por apresentarem auto-similaridade em múltiplas escalas, o que resulta em uma relação direta entre o grau de iteração geométrica e a multiplicidade de frequências ressonantes presentes na célula unitária (ROMEU; RAHMAT-SAMII, 2000). Tal característica permite à estrutura operar de modo eficiente em diversos comprimentos de onda, favorecendo aplicações multibanda e compactação extrema do arranjo físico sem prejuízo do desempenho espectral. Além disso, a multifuncionalidade desses elementos viabiliza respostas adaptáveis em diferentes regimes de frequência, o que é especialmente relevante para contextos em que o espaço disponível é limitado ou há demanda por flexibilidade operacional.

Os elementos convolucionados representam outro avanço relevante. Seu princípio reside na modificação controlada da geometria a partir de dobras e sobreposições sistemáticas, elevando o grau de complexidade topológica sem aumento significativo da área física ocupada. Essa abordagem possibilita a obtenção de bandas de passagem ou rejeição ajustáveis, bem como a melhoria perceptível da estabilidade angular uma vez que o padrão convolucionado dispersa as correntes superficiais de maneira a preservar a resposta eletromagnética mesmo sob incidência oblíqua (SANZ-IZQUIERDO et al., 2010).

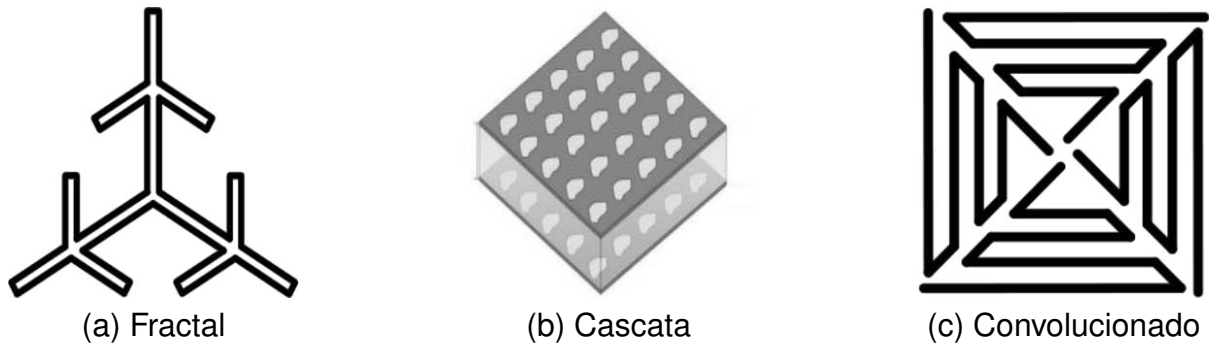
No espectro das soluções de engenharia para requisitos ainda mais complexos, destaca-se o uso de FSS em cascata. Nesta abordagem, múltiplas camadas de FSS são empilhadas e separadas por materiais dielétricos, formando uma estrutura estratificada cujo acoplamento eletromagnético entre as camadas pode ser precisamente ajustado. Tal configuração potencializa a realização de respostas espectrais do tipo multibanda ou de banda ultra larga (UWB), com desempenho otimizado tanto em bandas de rejeição quanto em faixas de transmissão ampliadas (ARAUJO et al., 2009). O emprego de FSS em cascata é especialmente apropriado para cenários onde a seletividade espectral rígida e a rejeição aprimorada de interferências são requisitadas.

Na Figura 5 são exibidos exemplos de geometrias especiais comumente adotadas como elementos constituintes das FSS.

2.2.2 Substratos das FSS

As propriedades elétricas e mecânicas do substrato são determinantes para o desempenho das FSS, influenciando não apenas a robustez e integridade física do dispositivo, mas principalmente sua resposta eletromagnética. Dentre os materiais utilizados na fabricação de substratos para FSS, destacam-se os dielétricos, tanto de

Figura 5 – Elementos especiais das FSS.



Fonte: Adaptado de (SOUSA et al., 2021; RONG et al., 2008; SEGUNDO, 2018)

comportamento isotrópico quanto anisotrópico, conforme discutido por (WU, 2005).

A permissividade elétrica do substrato, expressa por sua permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), exerce papel central na definição da faixa de operação da FSS. Materiais com baixa permissividade são, em geral, mais desejados, pois tendem a propiciar maior eficiência de acoplamento e ampliar a largura de banda operacional da superfície seletiva. No entanto, substratos com ϵ_r reduzida exigem espessura maior para garantir o confinamento e suporte da estrutura periódica, acarretando aumento no volume e no consumo de material durante a fabricação, o que pode impactar tanto o custo quanto a viabilidade construtiva do dispositivo (MUNK, 2000).

Nos substratos isotrópicos, o valor da permissividade elétrica é dado por $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, em que ϵ_0 representa a permissividade do espaço livre e ϵ_r corresponde ao valor relativo do substrato. Nestes materiais, as propriedades dielétricas são constantes em todas as direções, de modo que o comportamento do campo elétrico independe de sua orientação espacial (CAMPOS, 2008).

Em contrapartida, nos substratos de comportamento anisotrópico, a permissividade elétrica varia de acordo com a direção do campo elétrico incidente. Nesses materiais, a permissividade não é um escalar único, mas sim um tensor, o que significa que a estrutura apresenta valores distintos de ϵ_r ao longo de seus eixos coordenados (como eixos x , y e z). Muitos laminados comerciais empregados na engenharia de radiofrequência e micro-ondas, incluindo compostos de PTFE ou materiais reforçados com tramas de fibra de vidro, exibem esse tipo de comportamento devido à sua constituição estrutural em camadas. No projeto de FSS, a consideração da anisotropia torna-se vital, visto que essa característica pode provocar desvios significativos na frequência de ressonância e na resposta de polarização do dispositivo, especialmente sob ângulos de incidência oblíqua, exigindo simulações de onda completa rigorosas para garantir a exatidão da resposta eletromagnética.

Portanto, a escolha do material do substrato, considerando tanto a natureza

isotrópica ou anisotrópica quanto os valores de permissividade e espessura, deve ser realizada de forma criteriosa, integrando requisitos de desempenho, eficiência, estabilidade e viabilidade tecnológica.

2.3 Métodos de Análise

Os métodos de análise aplicados à caracterização de FSS são amplamente contemplados na literatura especializada, valorizando a exatidão dos resultados, o tipo de elemento considerado e o tempo computacional demandado para a solução do projeto. De modo geral esses métodos se agrupam em três grandes categorias: métodos baseados na teoria de circuitos, métodos fundamentados em expansão modal e técnicas iterativas.

Historicamente, a Técnica de Casamento Modal é reconhecida como uma das primeiras abordagens empregadas para análise de FSS, conforme discutido por (GUSTAFSSON et al., 2006) e (WU, 2005). Essa técnica distingue-se pelo detalhamento da resposta em frequência e polarização, fornecendo ainda uma compreensão física aprofundada do comportamento das estruturas. Em associação, destaca-se o Modelo de Circuito Equivalente, elucidado por (SUNG; SOWERBY; WILLIAMSON, 2005) e (LANGLEY, 1983). Este modelo representa a FSS por meio de associações de componentes reativos (indutivos e capacitivos) facilitando a obtenção de respostas rápidas e interpretáveis, especialmente para geometrias convencionais.

Com o avanço dos recursos computacionais, métodos de onda completa passaram a ser adotados por oferecer precisão superior, mesmo que às custas de maior esforço computacional. Destacam-se, neste contexto, o Método dos Momentos (MoM), o Método dos Elementos Finitos (FEM), o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) e o Método das Ondas (WCIP) (ANWAR; MAO; NING, 2018; KAPOOR; MISHRA; KUMAR, 2022). Tais métodos utilizam formulações matematicamente rigorosas e possibilitam a análise de estruturas arbitrárias, permitindo a consideração de efeitos de substrato, incidência oblíqua e materiais heterogêneos, além de favorecerem a compatibilidade com softwares de simulação comercial (MUNK, 2000; CAMPOS, 2008).

Mais recentemente, observa-se a ascensão de técnicas híbridas, nas quais a modelagem tradicional é combinada com algoritmos evolutivos e estratégias de inteligência artificial. Exemplos relevantes incluem a integração entre MoM e FEM, além de sistemas baseados em redes neurais e algoritmos genéticos (SEGUNDO, 2018; FILGUEIRA, 2016).

Neste trabalho de conclusão de curso, será adotado o método do circuito equivalente para a análise de FSSs. A escolha por esse método fundamenta-se em sua

capacidade de representar as propriedades eletromagnéticas da FSS por meio da associação de elementos reativos, como indutâncias e capacitâncias, permitindo modelar o comportamento ressonante da estrutura de forma rápida e com baixo custo computacional. Além de proporcionar uma compreensão física intuitiva dos mecanismos de filtragem associados a diferentes geometrias, o método do circuito equivalente é amplamente reconhecido na literatura como uma ferramenta eficiente para estimativas preliminares e para o ajuste dos parâmetros de projeto de FSSs.

2.4 Modelo do Circuito Equivalente

O modelo de circuito equivalente é uma ferramenta largamente utilizada para análise e síntese de FSS, permitindo representar o comportamento eletromagnético de arranjos periódicos por meio de parâmetros concentrados (indutâncias e capacitâncias) (CAMPOS, 2008; OLIVEIRA, 2023). Esses parâmetros dependem principalmente da geometria da célula unitária conforme ilustrado na (Figura 6), da periodicidade p , do espaçamento entre elementos g e das propriedades eletromagnéticas dos substratos e condutores empregados (CAMPOS, 2008; SILVA, 2014).

A modelagem do circuito equivalente para FSS requer recursos computacionais limitados quando comparados aos métodos de análise de onda completa e, portanto, é útil para prever com rapidez o desempenho das estruturas. A modelagem também proporciona uma visão física útil sobre o modo como funciona a FSS quando seus parâmetros são alterados (CAMPOS, 2008).

O ponto de partida para o desenvolvimento de circuitos equivalentes para estruturas FSS é a representação do circuito de um arranjo infinito de fitas condutoras paralelas, desenvolvida por Marcuvitz (MARCUVITZ, 1951; CAMPOS, 2008). Dependendo da polarização e do ângulo de incidência, a resposta do arranjo pode ser aproximada por:

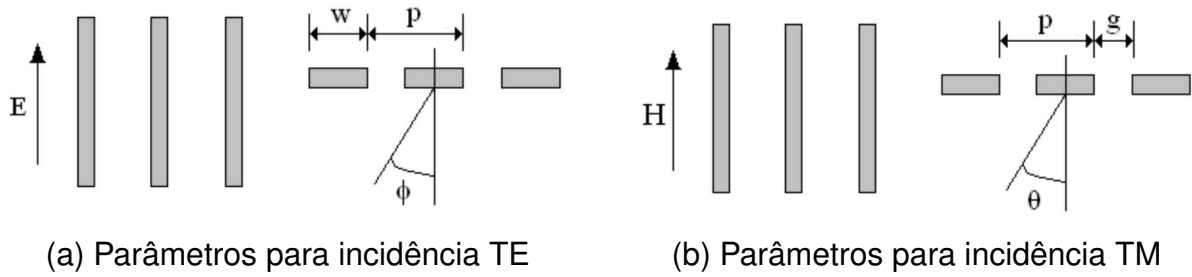
- um elemento indutivo em série, para incidência TE com o campo elétrico paralelo às fitas (Figura 6a);
- um elemento capacitivo em paralelo, para incidência TM com o campo magnético paralelo às fitas (Figura 6b).

Para o caso TE, as fitas metálicas têm uma espessura nula, largura w , e periodicidade p . A onda plana incide sobre as fitas com um ângulo ϕ . A reatância indutiva equivalente X_L é calculada como (MARCUVITZ, 1951):

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cos \phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[\csc \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\}, \quad (1)$$

em que Z_0 é a impedância do espaço livre, λ é o comprimento de onda no espaço livre, e a função de correção de ordem superior $G(p, w, \lambda, \phi)$ é definida por (MARCUVITZ,

Figura 6 – Arranjo infinito de fitas condutoras paralelas utilizado como ponto de partida do método do circuito equivalente: (a) incidência TE e (b) incidência TM.



Fonte: Adaptado de (CAMPOS, 2008)

(1951):

$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{0,5(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) (C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) + \beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8}\right) (C_+ + C_-) + 2\beta^6 C_+ C_-}, \quad (2)$$

sendo os parâmetros $C_{\pm}$ e β dados por:

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \sin \phi}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \phi}{\lambda}\right)^2}} - 1, \quad (3a)$$

$$\beta = \sin \left(\frac{\pi w}{2p} \right). \quad (3b)$$

Do mesmo modo, para a incidência TM, o vetor campo magnético incidente é paralelo às fitas metálicas e incide em um ângulo θ . As fitas possuem periodicidade p e uma lacuna de espaçamento g . A susceptância capacitiva B_C é calculada por (MARCUVITZ, 1951):

$$\frac{B_C}{Y_0} = 4F(p, g, \lambda, \theta) = \frac{4p \cos \theta}{\lambda} \left\{ \ln \left[\csc \left(\frac{\pi g}{2p} \right) \right] + G(p, g, \lambda, \theta) \right\}, \quad (4)$$

onde $Y_0 = 1/Z_0$. A função $G(p, g, \lambda, \theta)$ pode ser calculada pela Equação (2), bastando substituir na Equação (3a) ϕ por θ e na Equação (3b) w por g .

Estas equações são válidas para comprimentos de onda e ângulos de incidência no intervalo $\frac{p(1+\sin \theta)}{\lambda} < 1$. Elas também são válidas apenas para ondas planas incidentes, TE ou TM, e não podem ser usadas para modelar os efeitos da polarização cruzada em FSS (CAMPOS, 2008).

A partir dessas grandezas, a indutância L e a capacitância C equivalentes são obtidas relacionando X_L e B_C às reatâncias e susceptâncias de um circuito LC:

$$X_L = \omega L, \quad (5)$$

$$B_C = \omega C, \quad (6)$$

em que ω é a frequência angular. Assim, a frequência de ressonância fundamental do elemento é dada por:

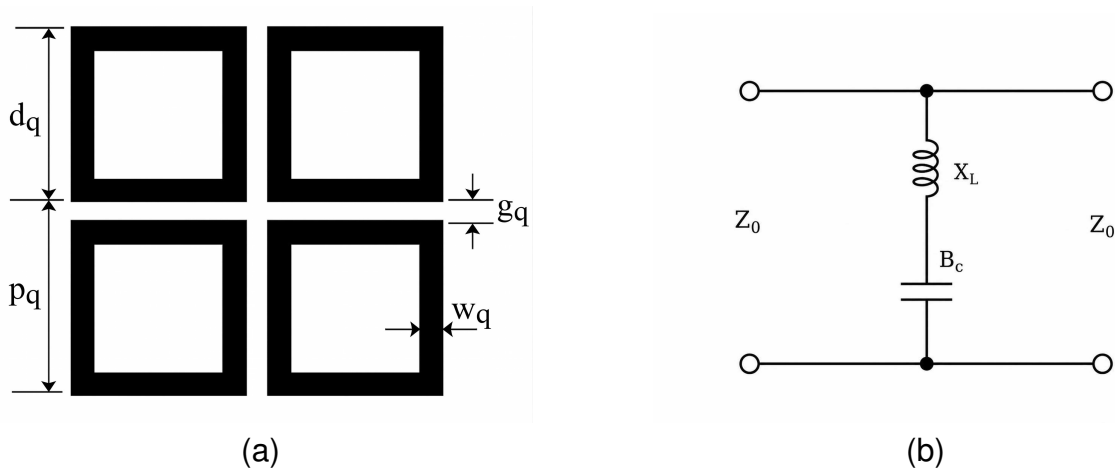
$$f_r \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (7)$$

Na prática, geometrias mais complexas são decompostas em segmentos equivalentes às fitas de Marcuvitz, e os elementos indutivos/capacitivos associados são combinados em série ou paralelo para reproduzir a resposta desejada do arranjo periódico (CAMPOS, 2008; SILVA, 2014). Esse procedimento conserva a interpretação física das FSS como filtros espaciais e oferece uma ferramenta rápida de projeto.

2.4.1 Modelo do Espalhador Anel Quadrado

O elemento anel quadrado, classicamente utilizado em FSS capacitivas, é modelado por um circuito LC em série, adequado para filtros rejeita-faixa, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Arranjo periódico de elementos anel quadrado e seu circuito equivalente LC em série: (a) geometria da célula unitária com periodicidade p_q , lado externo d_q , largura da trilha w_q e fenda $g_q = p_q - d_q$; (b) topologia do circuito equivalente.



Fonte: Autor.

Este modelo segue diretamente da análise clássica para arranjos infinitos de fitas condutoras paralelas. Introduzindo o fator de preenchimento geométrico $\left(\frac{d_q}{p_q}\right)$ ao equacionamento fundamental, as expressões para a reatância indutiva e a susceptância capacitiva normalizadas do elemento anel quadrado são dadas por (LANGLEY; PARKER, 1982):

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d_q}{p_q} F(p_q, w_q, \lambda, \theta) \quad (8)$$

$$\frac{B_C}{Y_0} = 4 \left(\frac{d_q}{p_q} \right) F(p_q, g_q, \lambda, \theta) \varepsilon_{\text{ef}} \quad (9)$$

onde d_q representa o comprimento do lado externo da espira, ε_{ef} é a permissividade elétrica efetiva do substrato e F é a função de espalhamento já definida na Seção 2.4. Essas expressões mantêm a mesma validade para $\lambda > p_q$ e $|\theta| < \pi/2$, em regime de onda plana sem polarização cruzada (LANGLEY; PARKER, 1982).

Visando aproximar o modelo teórico à realidade física de componentes impressos em micro-ondas, é mandatório considerar o efeito de confinamento dos campos no substrato dielétrico. Conforme o modelo consolidado por (COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2014; COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2012; COSTA, 2021), a permissividade efetiva (ε_{ef}) atua corrigindo a impedância capacitiva. Para garantir convergência com o simulador numérico em diferentes larguras de fita, emprega-se um fator de decaimento dinâmico (α) dependente da razão w_q/p_q :

$$\varepsilon_{\text{ef}} = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 - e^{-\alpha \frac{h_{\text{sub}}}{p}} \right), \quad (10)$$

onde h_{sub} é a espessura do substrato, e o fator α é linearmente interpolado no intervalo de [12,5, 16]:

$$\alpha = 16 - \frac{\left(\frac{w_q}{p_q} - 0,05 \right) \times (16 - 12,5)}{0,25 - 0,05}. \quad (11)$$

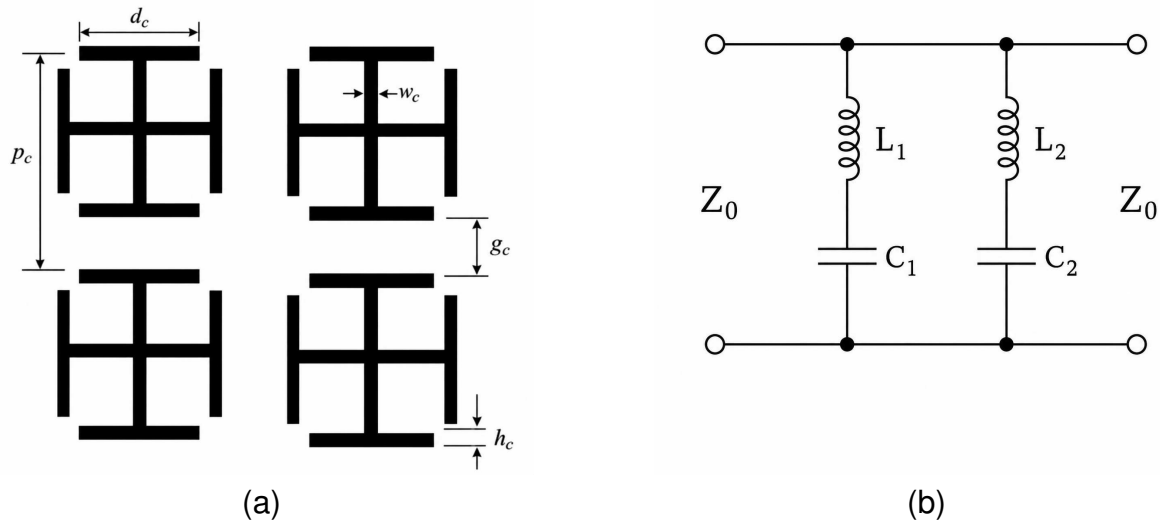
A partir dessas formulações, os componentes físicos concentrados da FSS (indutância L e capacitância C) são extraídos desnormalizando-se as reatâncias em relação à Z_0 e à ω , seguindo as relações fundamentais das Equações (5) e (6). Finalmente, a frequência analítica de ressonância (f_r) do arranjo é estabelecida de forma direta através da equação clássica do circuito LC em série, previamente definida na Equação (7).

2.4.2 Modelo do Espalhador Cruz de Jerusalém

A cruz de Jerusalém é um dos elementos mais versáteis do Grupo 1 da classificação de Munk, constituída por dois dipolos ortogonais com terminações laterais (frequentemente chamadas de “chapéus”) em seus extremos. Estas terminações geram um acoplamento capacitivo adicional massivo, permitindo uma elevada miniaturização da célula e resultando num comportamento acentuado de filtro rejeita-faixa.

O circuito equivalente completo, proposto originalmente por Leonard e Cofer, consiste na associação de dois circuitos LC ressonantes em série para prever múltiplas bandas (Figura 8). Contudo, para a síntese do modo de operação fundamental na banda de interesse, o modelo foca-se na extração do ramo dominante principal (L e C).

Figura 8 – Arranjo periódico de cruzes de Jerusalém e seu circuito equivalente: (a) geometria da célula unitária com periodicidade p , largura da fita w_c , comprimento total do braço/chapéu d_c , espessura da terminação h_c e fenda g_c ; (b) topologia do circuito equivalente completo (dois ramos LC série em paralelo).



Fonte: Autor.

A reatância indutiva normalizada do braço central, sob incidência normal ($\theta = 0^\circ$), é obtida a partir da formulação abordada anteriormente para a largura da fita w :

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p_c, w_c, \lambda, 0). \quad (12)$$

A susceptância capacitiva total atua como a soma de duas contribuições primárias: a susceptância B_g , devida ao acoplamento entre os terminais horizontais (separados pela fenda g_c), e a susceptância B_d , devida ao acoplamento entre os terminais verticais adjacentes. Estas parcelas são definidas por (LEONARD; COFER, 1978):

$$B_g = \frac{4d_c}{p_c} F(p_c, g_c, \lambda, 0), \quad (13)$$

$$B_d = \frac{4(2h_c + g_c)}{p_c} F(p_c, p_c - d_c, \lambda, 0), \quad (14)$$

onde a função de espalhamento F é idêntica à estabelecida na Seção 2.4.

Para compatibilizar a resposta analítica com o espalhamento físico em dielétricos finos, a susceptância capacitiva global (B_C/Y_0) é escalonada pela permissividade

efetiva do meio (ε_{ef}) usando o modelo (COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2014; COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2012; COSTA, 2021):

$$\frac{B_C}{Y_0} = \varepsilon_{\text{ef}} (B_g + B_d). \quad (15)$$

Para a geometria da Cruz de Jerusalém, o fator de decaimento dinâmico α é empiricamente interpolado com base na razão geométrica de espessura do substrato e periodicidade (h_{sub}/p_c), limitado ao intervalo fechado de [17, 22]:

$$\alpha = 22 - \frac{\left(\frac{h_{\text{sub}}}{p_c} - 0,05\right) \times (22 - 17)}{0,2 - 0,05}, \quad (16)$$

A partir dessas formulações, os componentes físicos concentrados da FSS são extraídos desnormalizando-se as reatâncias em relação a ω , conforme as relações já estabelecidas nas Equações (5) e (6). Finalmente, a frequência analítica de ressonância (f_r) do ramo dominante é estabelecida de forma direta através da Equação (7).

2.4.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão das FSS e sua inserção no contexto das metasuperfícies. A revisão da literatura abordou a classificação e o comportamento das principais topologias de elementos condutores, evidenciando como as escolhas geométricas definem o tipo de filtragem espacial, a estabilidade angular e as capacidades de miniaturização do dispositivo.

Ademais, detalhou-se o papel crítico dos substratos dielétricos no confinamento dos campos eletromagnéticos, destacando que tanto a espessura quanto a natureza (isotrópica ou anisotrópica) da permissividade elétrica afetam diretamente o ajuste da frequência de ressonância e a viabilidade construtiva das estruturas.

Dentre os métodos de análise eletromagnética explorados, o Modelo do Circuito Equivalente (ECM) destacou-se e foi justificado como a abordagem metodológica adotada neste projeto. A demonstração do equacionamento analítico focado nas geometrias de Anel Quadrado e Cruz de Jerusalém confirmou a capacidade do método em oferecer previsões rápidas e com baixo custo computacional.

Por fim, toda a formulação matemática e os conceitos físicos consolidados ao longo desta revisão bibliográfica constituem a base lógica e teórica necessária para o desenvolvimento do simulador analítico iterativo FSS Explorer, a ser detalhado no Capítulo 3. Essa fundamentação viabilizará a execução da análise paramétrica e a síntese rigorosa dos ressonadores para a operação otimizada na banda n78 (3,55 GHz) do 5G.

3 Simulador Analítico FSS Explorer

A caracterização analítica de Superfícies Seletivas de Frequência (FSS) demanda a avaliação do comportamento eletromagnético de estruturas periódicas planas em função de múltiplas variáveis geométricas e materiais. Em contextos de pesquisa acadêmica, essa tarefa é tipicamente executada por softwares comerciais de simulação eletromagnética de onda completa (*full-wave*), como o Ansys HFSS, cuja utilização intensiva é computacionalmente custosa e pouco propícia para a exploração rápida do espaço de parâmetros de projeto.

Nesse contexto, foi desenvolvido um simulador analítico interativo, denominado FSS Explorer, concebido para calcular e visualizar o coeficiente de transmissão S_{21} em função da frequência para diferentes topologias de elementos FSS. O programa realiza a predição da resposta espectral de estruturas periódicas, incluindo a frequência de ressonância f_r e a largura de banda BW , por meio de modelos analíticos consolidados na literatura, sem recorrer à solução numérica de equações de Maxwell em domínio discretizado.

A ferramenta foi projetada para operar de forma integrada ao fluxo de desenvolvimento, sendo capaz de avaliar duas topologias de espalhadores metálicos (anel quadrado e cruz de Jerusalém), e funcionando como um instrumento ágil de análise paramétrica que antecede e orienta as simulações rigorosas de referência realizadas no Ansys HFSS.

3.1 Metodologia e Tecnologias

O simulador foi desenvolvido como uma aplicação *web* estática, executável em qualquer navegador moderno sem a necessidade de instalação de dependências adicionais no sistema operacional. A arquitetura segue o paradigma de módulos ES6 (*ECMAScript 2015+*), promovendo uma separação clara de responsabilidades entre as camadas de cálculo matemático, visualização de dados e interface com o usuário.

3.1.1 Arquitetura Geral do Software

A estrutura hierárquica de diretórios do projeto é organizada de forma modular, conforme ilustrado na Figura 9.

Cada arquivo de topologia (`ui_*.js`) importa os módulos de núcleo e os módulos comuns, seguindo o princípio da composição modular em engenharia de software. Essa organização estrutural garante que a complexa lógica matemática seja

Figura 9 – Estrutura de diretórios e arquitetura geral do simulador FSS Explorer.



Fonte: Autor.

inteiramente compartilhada entre as diferentes geometrias, eliminando redundâncias no código e assegurando confiabilidade nos cálculos.

3.1.2 Tecnologias Utilizadas

As tecnologias selecionadas para o desenvolvimento do ambiente analítico estão sumarizadas na Tabela 1. Embora o ambiente de desenvolvimento local requiera apenas a inicialização de um servidor HTTP simples (como `npx http-server` ou `python -m http.server`) para contornar restrições de segurança de CORS e permitir o carregamento de módulos ES6, a versão de produção do simulador encontra-se hospedada na plataforma de nuvem **Vercel**, estando disponível em <https://fssresizepfc.vercel.app/>. Essa abordagem de implantação garante que a ferramenta seja acessada de forma remota e universal através de um link web, eliminando a necessidade de configurações locais ou instalações por parte do usuário final.

3.1.3 Módulo de Análise Paramétrica

O módulo `parametric-analysis.js` constitui o núcleo de maior esforço computacional do simulador. Sua função elementar é realizar uma varredura unidimen-

Tabela 1 – Tecnologias empregadas no desenvolvimento do simulador FSS Explorer.

Componente	Tecnologia / Versão
Linguagem principal	JavaScript (ES6 Modules)
Estrutura da interface	HTML5 + CSS3
Renderização de gráficos	Chart.js (v4.x)
Renderização geométrica	Canvas API (Nativa do HTML5)
Hospedagem em nuvem	Vercel
Ambiente de execução	Qualquer navegador moderno (<i>Client-side</i>)

sional sobre qualquer parâmetro geométrico ou propriedade do material de suporte. Como resultado, o módulo gera as curvas de tendência da frequência de ressonância (f_r) e da largura de banda (BW), assim como a extração direta dos valores de indutância equivalente (L) e capacitância equivalente (C) do circuito.

A varredura é executada através de um laço de repetição discreto com N pontos igualmente espaçados dentro do intervalo físico [início, fim] estipulado pelo usuário. Para cada iteração do parâmetro varrido, toda a curva de transmissão $S_{21}(f)$ é recalculada em tempo real e as métricas de desempenho espectral são extraídas algoritmicamente.

3.2 Fundamentação Lógica e Matemática

A resposta eletromagnética das topologias Espira Quadrada e Cruz de Jerusalém é calculada pelo simulador através do modelo ECM, conforme fundamentado na Seção 2.4.

3.2.1 Modelo ECM para Geometrias Condutoras

A rotina computacional para extração dos parâmetros dessas geometrias resolve integralmente o equacionamento apresentado nas Seções 2.4.1 e 2.4.2. O software aplica dinamicamente os fatores de decaimento para o cálculo preciso de (ε_{ef}) correspondente a cada topologia, compondo a reatância indutiva (X_L) e a susceptância capacitiva (B_C) para obter a reatância total do circuito equivalente da célula unitária (X_{total}).

3.2.2 Cálculo do Parâmetro de Transmissão (S_{21})

O coeficiente de transmissão em potência, $|T|^2$, de uma estrutura FSS modelada como uma susceptância pura B_{total} em derivação (*shunt*) é derivado da teoria de circuitos de micro-ondas (POZAR, 2011) como:

$$|T|^2 = \frac{4}{4 + B_{\text{total}}^2} \quad (17)$$

Para alinhar os resultados analíticos ao padrão de Parâmetros de Espalhamento (*S-parameters*) universalmente adotado pelos softwares de onda completa e analisadores de rede vetoriais, o simulador converte a magnitude transmitida para a escala logarítmica (decibéis):

$$S_{21} [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{4}{4 + B_{\text{total}}^2} \right) \quad (18)$$

3.2.3 Extração Algorítmica de Métricas Espectrais

A frequência de ressonância (f_r) é identificada como o primeiro mínimo local da matriz vetorial $S_{21}(f)$ que apresente valor inferior ao limiar de segurança de -10 dB. Para assegurar a validade do ponto crítico, a rotina de busca verifica se o traçado exibe uma variação positiva mínima de $0,5$ dB na iteração espectral subsequente, procedimento que filtra instabilidades numéricas e espúrias na vizinhança da singularidade.

A largura de banda absoluta (BW) é avaliada com base no critério de rejeição a -10 dB. O código determina os limites da banda efetuando uma interpolação linear entre os vetores de frequência discretos que tangenciam o limiar de corte, definidos como f_{low} e f_{high} . As frequências de cruzamento são extrapoladas pela relação de proporcionalidade linear:

$$f_{\text{cruzamento}} = f_{\text{low}} + \frac{-10 - S_{21,\text{low}}}{S_{21,\text{high}} - S_{21,\text{low}}} (f_{\text{high}} - f_{\text{low}}) \quad (19)$$

em que f_{low} e f_{high} correspondem às frequências discretas da simulação imediatamente adjacentes ao ponto de corte (sendo uma anterior e outra posterior à transição); $S_{21,\text{low}}$ e $S_{21,\text{high}}$ representam as respectivas magnitudes do coeficiente de transmissão (expressas em dB) avaliadas exatamente nestas frequências; e o valor constante -10 denota o limiar de potência alvo adotado como critério de seletividade.

Além da largura de banda, o fator de qualidade (Q) é computado para quantificar a seletividade da FSS. Diferentemente do estabelecido na teoria clássica de circuitos ressonantes (POZAR, 2011), em que este parâmetro é definido pela relação entre a frequência central e a largura de banda à meia potência (critério de -3 dB), neste trabalho calcula-se Q como um fator de seletividade aplicando-se a equação 20:

$$Q = \frac{f_r}{BW} \quad (20)$$

onde BW representa a largura de banda medida nos pontos onde a potência transmitida cai a 10% do valor máximo da banda passante (-10 dB).

3.3 Considerações de Aplicação

3.3.1 Integração com o Fluxo de Trabalho

O simulador FSS Explorer desempenha um papel metodológico central no presente trabalho, operando em duas frentes complementares:

- **Fase de Síntese e Otimização Dimensional:** A ferramenta foi empregada de forma intensiva na varredura sistemática do espaço de parâmetros de projeto de FSS. Essa abordagem permitiu contornar o elevado custo computacional das simulações iterativas de onda completa, identificando as combinações de geometrias de espalhadores metálicos e substrato que garantiam o cumprimento das especificações de frequência central e limite de banda. Os dados analíticos obtidos no simulador, utilizado como uma ferramenta de pré-projeto, guiaram a implementação dos modelos no HFSS.
- **Fase de Validação Cruzada:** O simulador foi programado com a funcionalidade de importar arquivos `.csv` contendo os dados de Parâmetros-S exportados do Ansys HFSS. O carregamento dos dados numéricos viabiliza a sobreposição gráfica imediata das curvas do ECM e do solucionador *full-wave*. Esta funcionalidade implementada permite ao usuário atestar a coerência do modelo implementado e validar os limites do equacionamento analítico.

3.3.2 Biblioteca e Presets de Materiais

Para acelerar o fluxo de design, o ambiente foi alimentado com uma biblioteca nativa contendo os perfis elétricos de diversos laminados dielétricos comerciais. Os materiais pré-cadastrados para rápida seleção no projeto estão sumarizados na Tabela 2.

3.3.3 Módulo de Exportação e Relatórios

O simulador desenvolvido apresenta a funcionalidade de exportação de resultados e relatórios, permitindo que o usuário extraia os dados simulados na análise paramétrica. Essa automação arquitetural viabiliza a exportação estruturada em planilhas compatíveis com o padrão de delimitação e notação decimal de softwares como Microsoft Excel ou MATLAB (separadores de coluna por ponto-e-vírgula e separador decimal por vírgula). Para cada topologia, o usuário poderá exportar os dados simulados a partir dos seguintes relatórios:

Tabela 2 – Biblioteca de substratos comerciais nativa do simulador analítico.

Substrato	ε_r	h_{sub} [mm]
Rogers RT/duroid 5880	2,20	0,254
Rogers RO3003	3,00	1,520
RF-35	3,50	0,762
Rogers RO4350B	3,66	0,762
FR4	4,40	1,600
TMM 4	4,50	0,381
Rogers RO3006	6,15	1,280
TMM 10	9,20	0,508
CER-10	10,00	0,635
AR1000	10,00	0,762

- **Relatório (a):** Contendo o estado da variável geométrica manipulada e os respectivos pares de resposta para f_r (em GHz) e Produto $L \times C$ (em nH · pF).
- **Relatório (b):** Focado no domínio físico do modelo concentrado, indicando em colunas os valores de Indutância (em nH) e Capacitância (em pF) daquela geometria.

3.4 Considerações finais

Por ser estritamente fundamentado no modelo ECM, cumpre assinalar que as expressões analíticas codificadas no FSS Explorer obedece às condições de implementação empregadas para obtenção das expressões. A teoria analítica programada não abrange perdas ôhmicas no cobre ou tangente de perda intrínseca do dielétrico ($\tan \delta$), além de avaliar somente a resposta à incidência normal de ondas planas sobre a FSS.

Além destas condições, a resposta analítica degrada consideravelmente quando a periodicidade das células unitárias se aproxima do comprimento de onda da frequência de ressonância considerada. Para resguardar a coerência da análise, o simulador processa a validação ininterrupta da desigualdade física:

$$f_{\max} < \frac{c}{p} \quad (21)$$

onde c representa a velocidade de fase da onda e p o limite do período geométrico. A violação deste intervalo é alertada visualmente pela ferramenta, acusando a transição da estrutura para comportamentos não captados pelo ECM.

4 Análise Paramétrica

A análise paramétrica constitui uma etapa fundamental no projeto de superfícies seletivas em frequência, pois permite investigar de forma sistemática a influência das dimensões geométricas da célula unitária sobre a resposta eletromagnética da estrutura. No contexto das FSS, pequenas variações em parâmetros como comprimento, largura, espessura e periodicidade dos elementos metálicos alteram significativamente as propriedades ressonantes, deslocando a frequência central, modificando a largura de banda e influenciando a profundidade de rejeição ou transmissão. Essa abordagem é especialmente relevante em geometrias complexas, nas quais a relação entre forma e resposta em frequência não é trivial e, portanto, requer avaliação numérica detalhada para viabilizar o ajuste fino do projeto.

4.1 Análise Paramétrica Anel Quadrado

Para a análise paramétrica da geometria em anel quadrado, a dimensão inicial da periodicidade foi definida a partir de um quarto do comprimento de onda no espaço livre ($\lambda_0/4$), resultando em $p_q = 21$ mm. Os demais parâmetros foram estipulados proporcionalmente em relação a essa periodicidade, adotando-se $d_q = 16$ mm, $w_q = 1$ mm, $h_{\text{sub}} = 1,52$ mm e $\varepsilon_r = 3,0$. Essa definição permite garantir uma base padronizada para a comparação dos resultados obtidos nas diferentes configurações analisadas. Os intervalos definidos para avaliação de cada variável geométrica e do substrato para este espalhador são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Intervalos adotados na análise paramétrica da geometria em anel quadrado.

Parâmetro	Símbolo	Valor inicial	Intervalo de varredura
Periodicidade da célula unitária	p_q	21 mm	19–23 mm
Lado externo do anel	d_q	16 mm	14–18 mm
Largura da trilha metálica	w_q	1 mm	0,5–3,0 mm
Espessura do substrato	h_{sub}	1,52 mm	0,5–3,0 mm
Permissividade elétrica relativa	ε_r	3,0	1,0–5,0

Fonte: Autor.

Os gráficos apresentados na Figura 10 revelam o comportamento paramétrico da superfície seletiva em frequência, correlacionando de forma explícita as dimensões físicas da célula unitária com as flutuações das reatâncias concentradas (L e C) extraídas do modelo analítico. Tais variações são as responsáveis diretas pela sintonia

da frequência de ressonância (f_r), governada pela relação fundamental expressa na Equação (7). A seguir, o impacto eletromagnético de cada parâmetro geométrico é analisado.

4.1.1 Efeito da Variação da Periodicidade (p_q)

As Figuras 10(a) e 10(b) ilustram a resposta da estrutura ao variar a periodicidade p_q de 19 mm a 23 mm, mantendo fixo os demais parâmetros.

Do ponto de vista analítico, o aumento de p_q implica diretamente o alargamento da fenda intercelular ($g_q = p_q - d_q$). Fisicamente, o alargamento de g_q implica no afastamento das células vizinhas, enfraquecendo o acoplamento do campo elétrico de borda e a indutância mútua entre os espalhadores, reduzindo a capacitância C e aumentando a indutância L . Com o aumento da periodicidade, observa-se uma queda suave do produto $L \times C$, o que justifica o aumento aproximadamente linear da frequência de ressonância f_r .

4.1.2 Efeito da Variação do Comprimento do Lado (d_q)

A variação do lado externo do anel (d_q), mapeada nas Figuras 10(c) e 10(d), demonstra ser o mecanismo de sintonia mais sensível do projeto. O aumento de d_q de 14 mm para 18 mm, confinado num período fixo ($p_q = 21$ mm), provoca uma redução significativa da frequência de ressonância.

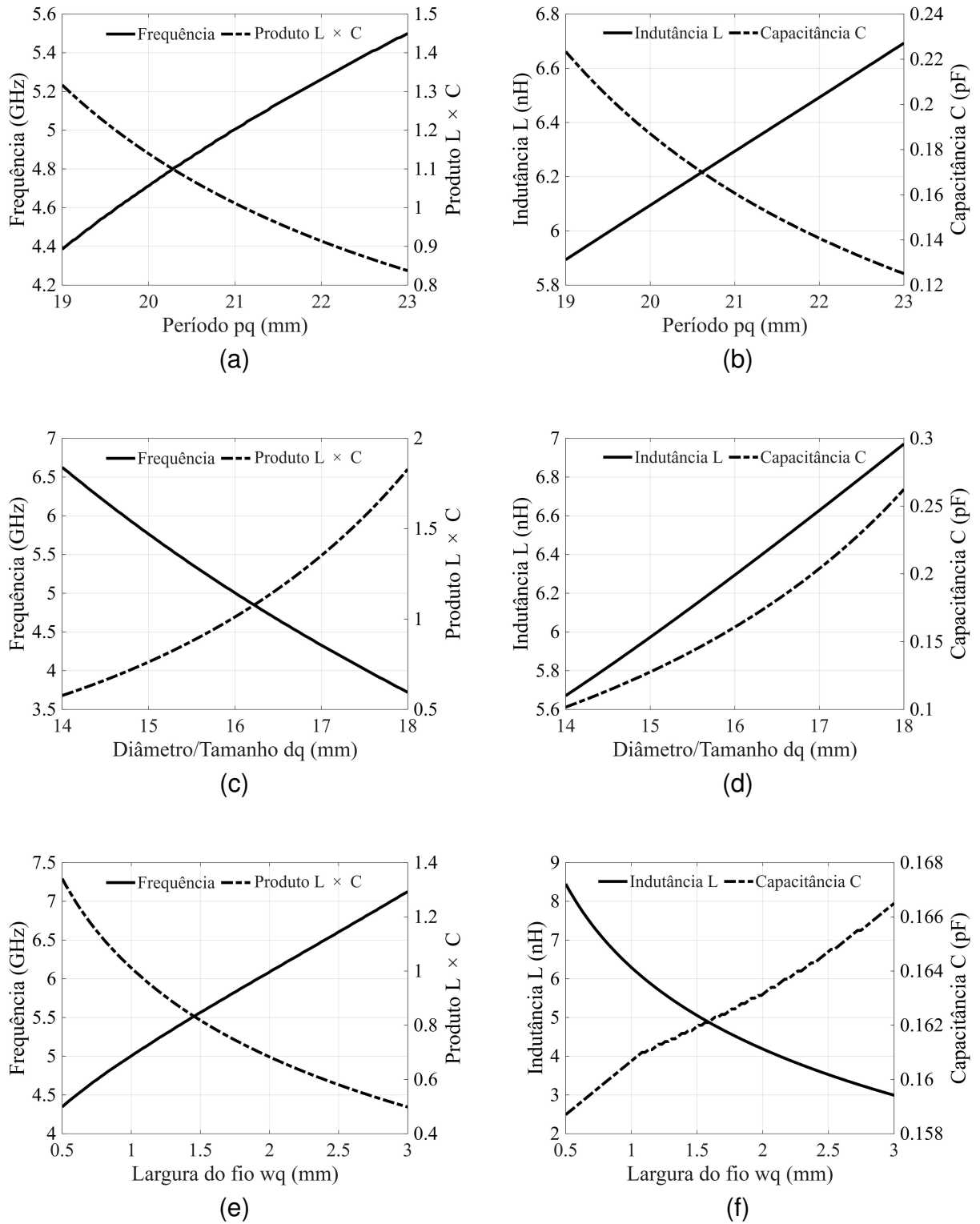
O aumento de d_q alonga o comprimento da trilha condutora polarizada ao longo do campo elétrico incidente. Na aproximação do circuito modelado pela Equação (8), isto se traduz no aumento direto da indutância distribuída (L). Além disso, o crescimento de d_q resulta no estreitamento abrupto da fenda intercelular ($g_q \rightarrow 0$). Matematicamente, à medida que o argumento $\left(\frac{\pi g_q}{2p_q}\right)$ se aproxima de zero, a função seno tende a zero e a cossecante da Equação (4) tende ao infinito. Esta singularidade analítica modela a acumulação extrema de densidade de carga elétrica entre as células.

O crescimento exponencial da capacitância, atrelado ao aumento da indutância, eleva o produto $L \times C$ vertiginosamente, tornando a variação de d_q uma forma eficaz de redução da frequência de ressonância de operação do filtro.

4.1.3 Efeito da Variação da Largura da Trilha (w_q)

As Figuras 10(e) e 10(f) descrevem o comportamento do espalhador frente à variação da espessura da fita metálica (w_q). Observa-se que o aumento da espessura da fita desloca a ressonância para frequências substancialmente mais altas.

Figura 10 – Análise paramétrica da geometria anel quadrado: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de p_q ; (b) variação de L e C em função de p_q ; (c) variação da f_r e do produto $L \times C$ em função de d_q ; (d) variação de L e C em função de d_q ; (e) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de w_q ; (f) variação de L e C em função de w_q .



Fonte: Autor.

Este comportamento se deve principalmente ao fato de que o alargamento de w_q proporciona uma área de secção superior para o escoamento das correntes de superfície. A menor restrição física à densidade de corrente diminui o campo magnético induzido ao redor da trilha, traduzindo-se em uma redução acentuada de L .

A fenda principal da célula ($g_q = p_q - d_q$) não é alterada nesta avaliação (visto que p_q e d_q são mantidos fixos), preservando o comportamento espacial primário da capacitância transversal, mantendo o efeito capacitivo praticamente constante. Desta forma, o fenômeno dominante passa a ser a queda acentuada da reatância indutiva.

Apesar de a capacitância primária da fenda se manter praticamente constante, nota-se na Figura 10(f) um crescimento muito tênue e residual de C . Este detalhe comprova a robustez da correção da permissividade efetiva (ε_{ef}) introduzida no modelo. O engrossamento da trilha altera a razão (w_q/p_q), o que diminui progressivamente o fator empírico de decaimento α estipulado na Equação (11). Uma menor restrição no expoente da Equação (10) faz com que a estrutura tenha um ε_{ef} sutilmente maior, provocando a leve elevação de C . Entretanto, a massiva queda da indutância prevalece, derrubando o produto $L \times C$ e tendendo a ressonância para o limite superior da banda analisada.

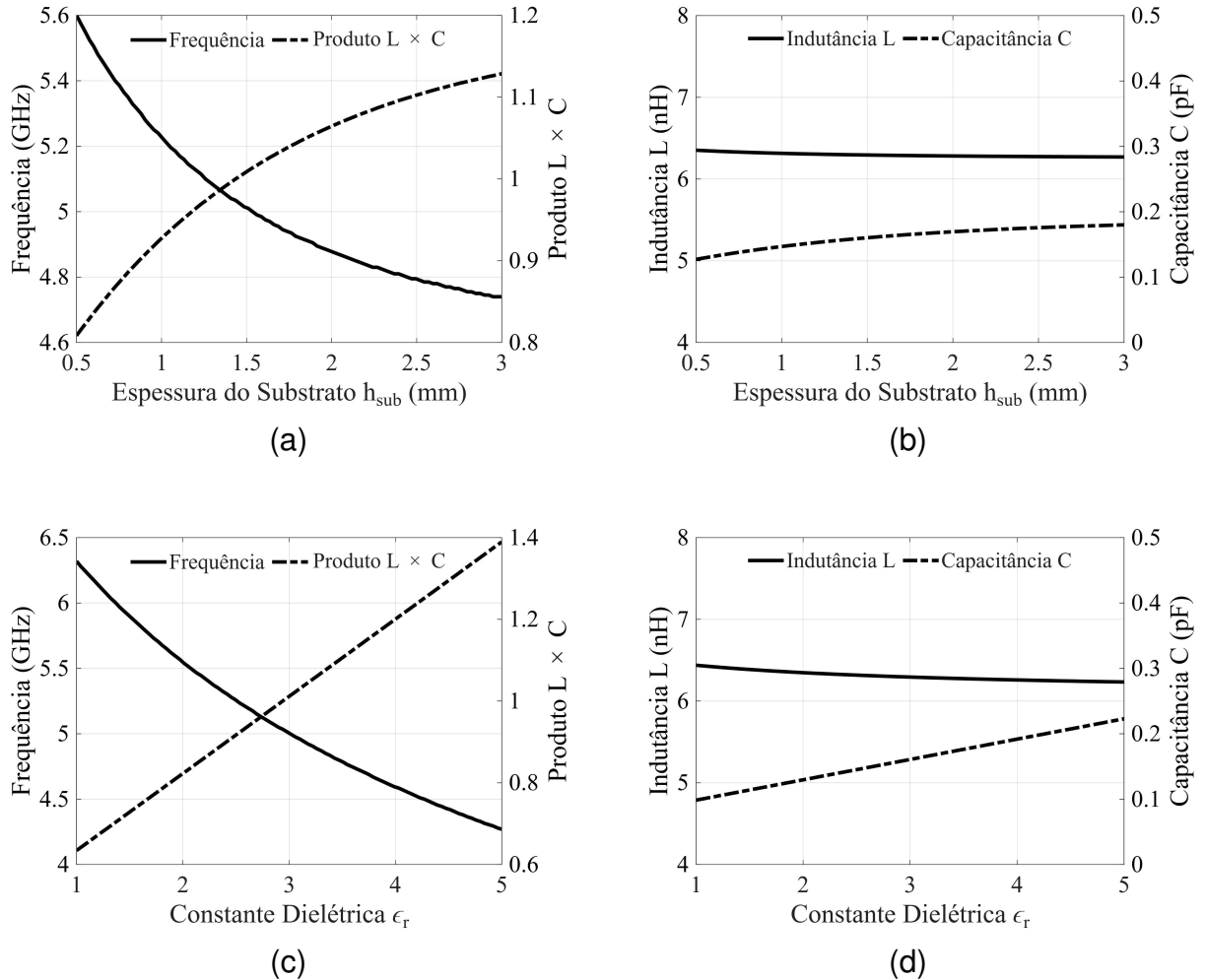
4.1.4 Efeito do Substrato Dielétrico (h_{sub} e ε_r)

Além das dimensões da metalização, o perfil dielétrico do substrato exerce um papel governante sobre a sintonia do filtro. A Figura 11 apresenta a análise paramétrica isolada para a espessura da placa (h_{sub}) e para a sua constante dielétrica relativa (ε_r).

As Figuras 11(a) e 11(b) documentam o comportamento eletromagnético da FSS à medida que o substrato é espessado. O traçado das curvas revela que o aumento de h_{sub} provoca uma elevação inicial rápida na capacitância (C) e uma respectiva queda na frequência de ressonância, contudo, esse comportamento tende à estabilidade com o aumento da espessura.

De acordo com a Equação (10), o termo governante do modelo é a função exponencial negativa $\left(1 - e^{-\alpha \frac{h_{\text{sub}}}{p_q}}\right)$. Para substratos fisicamente finos, grande parte do campo elétrico de borda dispersa-se no espaço livre ($\varepsilon_r = 1$). Com o incremento de h_{sub} , o material dielétrico passa a englobar mais linhas de campo, elevando a permissividade efetiva (ε_{ef}). Contudo, a partir do momento em que a espessura se torna eletricamente grande em relação ao período (p), ocorre o confinamento total do campo de borda. Matematicamente, o termo exponencial converge para zero, e o ε_{ef} atinge seu limite assintótico máximo de $\frac{\varepsilon_r + 1}{2}$. Por conseguinte, a capacitância C e a frequência de ressonância (f_r) tornam-se invariantes a espessamentos adicionais. Destaca-se, na Figura 11(b), o perfil aproximadamente constante da indutância (L), o que comprova

Figura 11 – Análise paramétrica das propriedades do substrato dielétrico no espalhador anel quadrado: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_{sub} ; (b) variação de L e C em função de h_{sub} ; (c) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de ϵ_r ; (d) variação de L e C em função de ϵ_r .



Fonte: Autor.

que o fluxo magnético tangencial gerado pela geometria independe das propriedades de profundidade do dielétrico.

Já as Figuras 11(c) e 11(d) expõem a resposta da FSS frente à variação de ϵ_r , mantendo a geometria e a espessura fixas. Diferentemente do efeito de estabilização observado na espessura, o aumento do ϵ_r produz um crescimento aproximadamente linear sobre a capacitância C .

O aumento de ϵ_r atua como um multiplicador direto sobre a capacidade do meio em armazenar energia, conforme descrito na Equação (10). Isto é visualmente atestado pela reta inclinada da capacitância (C) na Figura 11(d). Sendo a indutância (L) praticamente constante à mudança de ϵ_r , o produto $L \times C$ acompanha com fidelidade o crescimento linear. Finalmente, a curva de f_r na Figura 11(c) não é linear, mas sim

uma curva de decaimento que segue a proporção exata do inverso da raiz quadrada do meio ($f_r \propto 1/\sqrt{\varepsilon_{\text{ef}}}$). Este comportamento consolida o embasamento teórico clássico de miniaturização de FSS, em que é indicada a utilização de substratos de elevada permissividade para transladar a banda de rejeição para frequências menores sem a necessidade de aumentar as dimensões físicas da célula unitária.

4.2 Análise Paramétrica Cruz de Jerusalém

A análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém é particularmente relevante devido à complexidade das suas terminações capacitivas (chapéus), que introduzem graus de liberdade adicionais no projeto. Para garantir a rastreabilidade dos efeitos reativos, foram estabelecidos parâmetros geométricos base que permaneceram estáticos enquanto variáveis individuais eram avaliadas.

Neste estudo, a dimensão inicial da periodicidade para a célula unitária foi definida a partir de um quarto do comprimento de onda no espaço livre ($\lambda_0/4$), fixando-se em $p_c = 21$ mm. Os demais parâmetros geométricos foram estipulados proporcionalmente em relação a essa periodicidade, adotando-se $d_c = 10$ mm, $w_c = 1$ mm, $h_c = 1$ mm e $g_c = 1$ mm. O dielétrico considerado manteve $h_{\text{sub}} = 1,52$ mm e $\varepsilon_r = 3,0$. Os intervalos definidos para avaliação de cada variável geométrica e do substrato para este espalhador são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Intervalos adotados na análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém.

Parâmetro	Símbolo	Valor inicial	Intervalo de varredura
Periodicidade da célula unitária	p_c	21 mm	19–23 mm
Comprimento total do braço	d_c	10 mm	8–12 mm
Largura da trilha central	w_c	1 mm	0,5–3,0 mm
Espessura da terminação	h_c	1 mm	0,5–3,0 mm
Gap intercelular	g_c	1 mm	0,5–3,0 mm
Espessura do substrato	h_{sub}	1,52 mm	0,5–3,0 mm
Permissividade elétrica relativa	ε_r	3,0	1,0–5,0

Fonte: Autor.

É imprescindível salientar uma particularidade eletromagnética desta geometria. Devido à presença das terminações ortogonais (chapéus), a Cruz de Jerusalém atua classicamente como um ressonador de múltiplas bandas, capaz de gerar ressonâncias secundárias em frequências mais altas. Contudo, a presente avaliação paramétrica leva em consideração unicamente o comportamento da primeira ressonância fundamental (f_r). De acordo com (COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2014), a distribuição de corrente na primeira ressonância da Cruz de Jerusalém concentra-se nas fitas metálicas

centrais da estrutura, tendo efeito reduzido nas bordas, impactando diretamente na análise paramétrica da geometria.

Os gráficos apresentados nas Figuras 12 e 13 documentam o comportamento eletromagnético da célula unitária da Cruz de Jerusalém frente a variações dimensionais. A seguir, é detalhado o impacto individual de cada parâmetro geométrico no comportamento da estrutura.

Antes de detalhar o impacto individual de cada parâmetro geométrico, é imprescindível salientar que, embora esta geometria atue classicamente como um ressoador de múltiplas bandas, a presente avaliação paramétrica foca exclusivamente na primeira ressonância fundamental (f_r). Esta abordagem isola a resposta do ramo LC principal, viabilizando uma análise rigorosa do mecanismo primário de rejeição de banda.

Essa abordagem isola o ramo principal do circuito LC em série, permitindo analisar a banda de rejeição primária com máxima precisão teórica.

4.2.1 Efeito da Variação da Periodicidade (p_c)

As Figuras 12(a) e (b) ilustram o efeito da variação de p_c , mantendo as dimensões da metalização inalteradas.

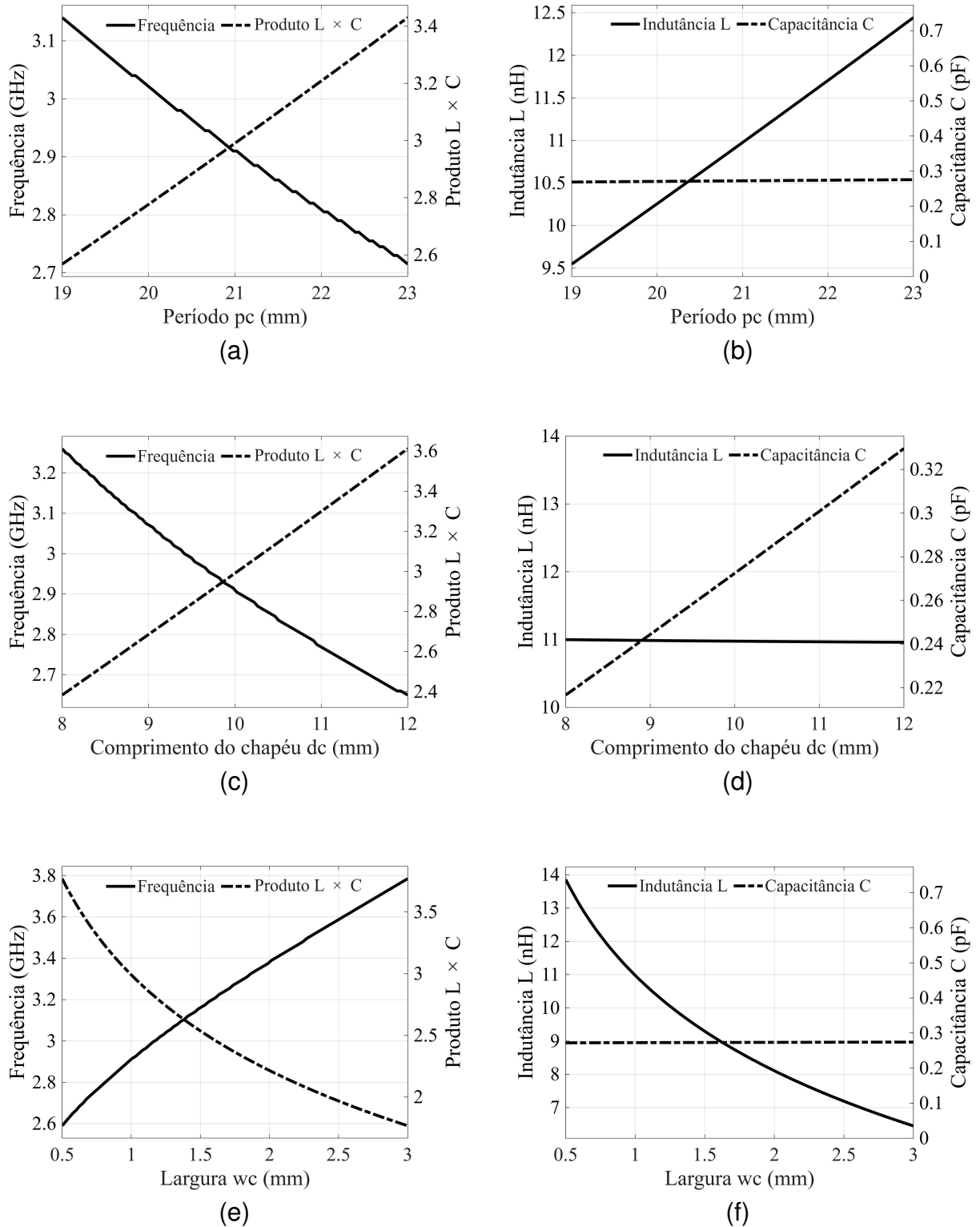
Observa-se uma redução da frequência de ressonância com o aumento de p_c . Este fenômeno pode ser explicado tendo em vista a concentração de corrente nas fitas metálicas centrais da estrutura, fazendo com que o aumento da periodicidade pouco afete a capacitância da Cruz de Jerusalém e aumente a indutância equivalente, uma vez que reduz o acoplamento com as células vizinhas. Desta forma, o produto $L \times C$ aumenta seguindo a tendência do aumento de indutância, reduzindo a frequência f_r .

Analizando o circuito equivalente, o aumento de p altera criticamente a distribuição do acoplamento capacitivo. Em primeiro lugar, a susceptância primária (B_g), atrelada à fenda horizontal (g), sofre uma atenuação direta devido à redução do fator de ponderação da célula ($4d/p$) expresso na Equação (13). De forma ainda mais severa, o aumento de p com o braço d fixo implica o afastamento iminente das terminações verticais (chapéus). Na Equação (14), que descreve a susceptância transversal B_d , a função espacial $F(p, p - d, \lambda, 0)$ é governada pela distância $(p - d)$. O alargamento dessa distância mitiga o confinamento das linhas do campo elétrico de borda, reduzindo drasticamente o termo logarítmico. Com a queda aditiva de B_g e B_d , a capacitância total (C) desmorona, o que justifica a forte elevação da frequência ressonante.

4.2.2 Efeito da Variação do Comprimento do Braço (d_c)

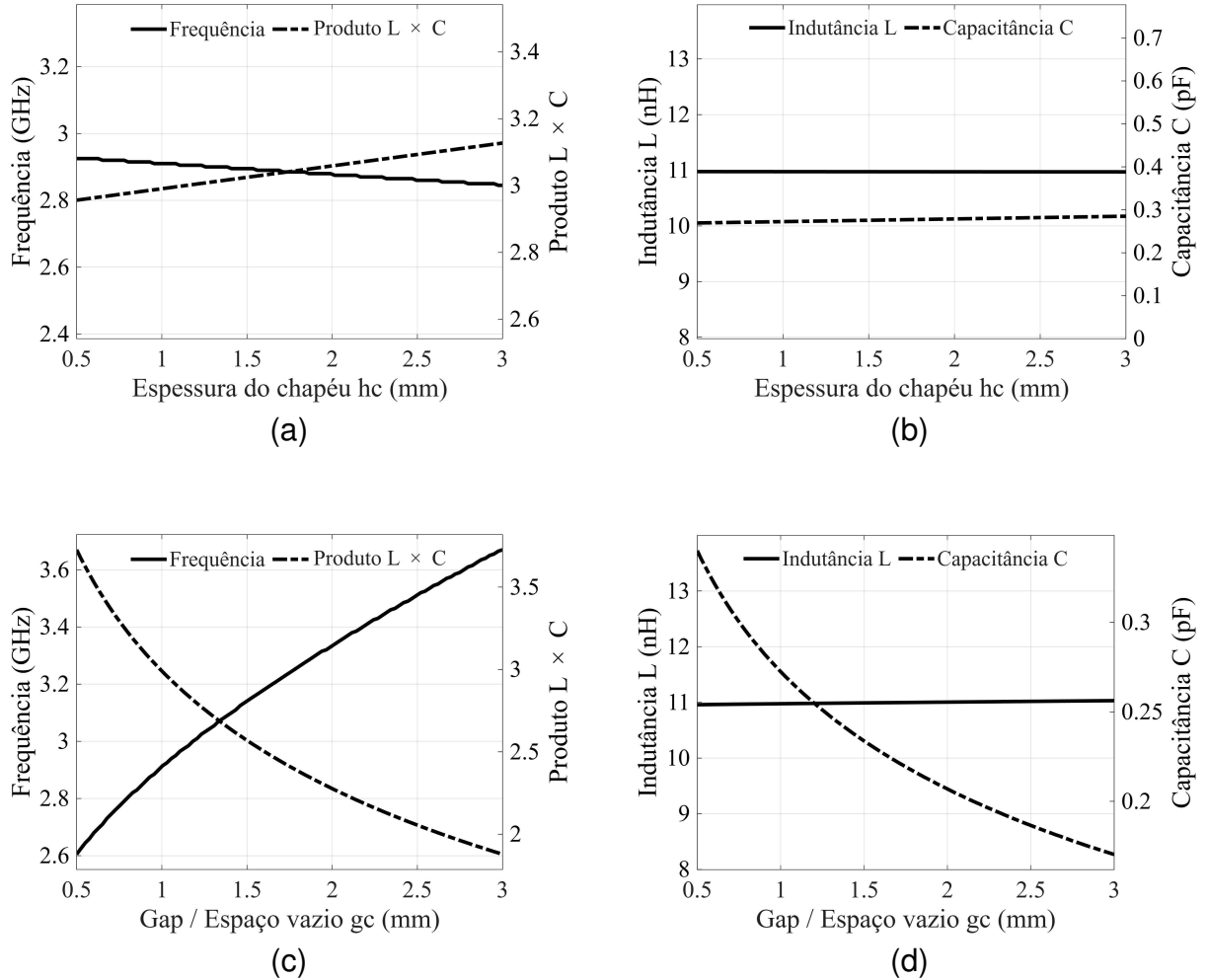
O alongamento do braço total da cruz (d_c), mapeado nas Figuras 12(c) e (d), evidencia que esta variável geométrica tem influência desprezível no efeito indutivo

Figura 12 – Análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém (Parte 1 de 2): (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de p_c ; (b) variação de L e C em função de p_c ; (c) variação de f_r e $L \times C$ em função de d_c ; (d) variação de L e C em função de d_c ; (e) variação de f_r e $L \times C$ em função de w_c ; (f) variação de L e C em função de w_c .



Fonte: Autor.

Figura 13 – Análise paramétrica da geometria Cruz de Jerusalém (Parte 2 de 2): (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_c ; (b) variação de L e C em função de h_c ; (c) variação de f_r e $L \times C$ em função de g_c ; (d) variação de L e C em função de g_c .



Fonte: Autor.

da geometria na primeira ressonância, tendo em vista a concentração da distribuição de corrente nas fitas metálicas centrais. Porém, observa-se que o fato de aumentar d_c aumenta o efeito capacitivo da parcela de corrente que chega às bordas em f_r por aumentar a área de acúmulo de cargas nos braços. Sendo assim, o produto $L \times C$ aumenta seguindo a tendência do aumento de capacitância, reduzindo a frequência f_r .

Este fenômeno é o reflexo invertido da análise anterior. À medida que d_c se aproxima do limite da célula, a distância física transversal entre os chapéus adjacentes ($p_c - d_c$) tende a zero. Na Equação (14), à medida que o argumento se anula, a função assintótica $\csc\left(\frac{\pi(p_c - d_c)}{2p_c}\right)$ tende ao infinito. Esta singularidade matemática traduz a massiva concentração de densidade de carga na microfenda entre os terminais. Simultaneamente, o crescimento de d_c atua como um multiplicador direto ($4d_c/p_c$) sobre

a susceptância horizontal na Equação (13). A combinação destes efeitos faz com que a capacitância (C) aumente, elevando o produto $L \times C$.

4.2.3 Efeito da Variação da Largura da Trilha (w_c)

As Figuras 12(e) e (f) demonstram a resposta do arranjo face ao alargamento da haste central condutora (w_c). O espessamento desloca a ressonância para altas frequências.

O rigor do modelo de circuito equivalente isola perfeitamente esta variável: como w_c não compõe as formulações capacitivas de B_g e B_d , a capacitância global (C) mantém-se praticamente constante. O efeito restringe-se ao domínio magnético. Recorrendo à Equação (12), a reatância indutiva do braço é ditada por $F(p_c, w_c, \lambda, 0)$, fundamentada em $\ln \left[\csc \left(\frac{\pi w_c}{2p_c} \right) \right]$. O alargamento de w_c oferece uma secção de escoamento maior para as correntes superficiais, o que reduz a oposição à variação da corrente e atenua a indutância concentrada (L). A queda isolada de L reduz o produto $L \times C$, aumentando a sintonia do filtro para frequências maiores.

4.2.4 Efeito da Variação da Espessura da Terminação (h_c)

As Figuras 13(a) e (b) revelam que o aumento de h_c impõe uma sintonia fina redutora sobre a frequência de ressonância.

As equações de modelagem da geometria confirmam este comportamento uma vez que a alteração de h_c não impacta a fita metálica central, garantindo que a indutância (L) permaneça aproximadamente constante. O impacto é unicamente capacitivo transversal. Na Equação (14), a espessura da terminação atua no multiplicador linear de área frontal $\frac{4(2h_c + g_c)}{p_c}$. Fisicamente, aumentar h_c alonga os chapéus paralelos, maximizando a área efetiva das placas do capacitor virtual formado entre as células vizinhas. Porém, uma vez que a distribuição de corrente está predominantemente concentrada nas fitas centrais, este aumento de capacitância reduz suavemente f_r .

4.2.5 Efeito da Variação da Fenda Intercelular (g_c)

Por fim, as Figuras 13(c) e (d) analisam o distanciamento frontal direto através do alargamento da fenda g_c . Como esperado, distanciar as bordas da Cruz de Jerusalém pouco afeta a indutância da geometria, porém, reduz o efeito capacitivo entre as células vizinhas.

O alargamento de g_c afeta o balanço capacitivo, mas é governado predominantemente pela susceptância horizontal (B_g). O parâmetro g_c atua como argumento direto da função de Marcuvitz na Equação (13). O aumento do *gap* eleva o argumento da função seno, o que reduz o valor da cossecante e, consequentemente, minimiza o

logaritmo $\ln \left[\csc \left(\frac{\pi g_c}{2p_c} \right) \right]$, reduzindo o efeito capacitivo. Desta forma, o produto $L \times C$ segue a tendência de queda de C , aumentando f_r .

A drástica dissipação da intensidade do campo elétrico ao redor da fenda desidrata a capacitância global (C). Sustentada por uma inércia indutiva (L constante), a queda aguda de C reduz severamente o denominador da Equação, projetando a frequência do filtro para a extremidade superior do espectro analisado.

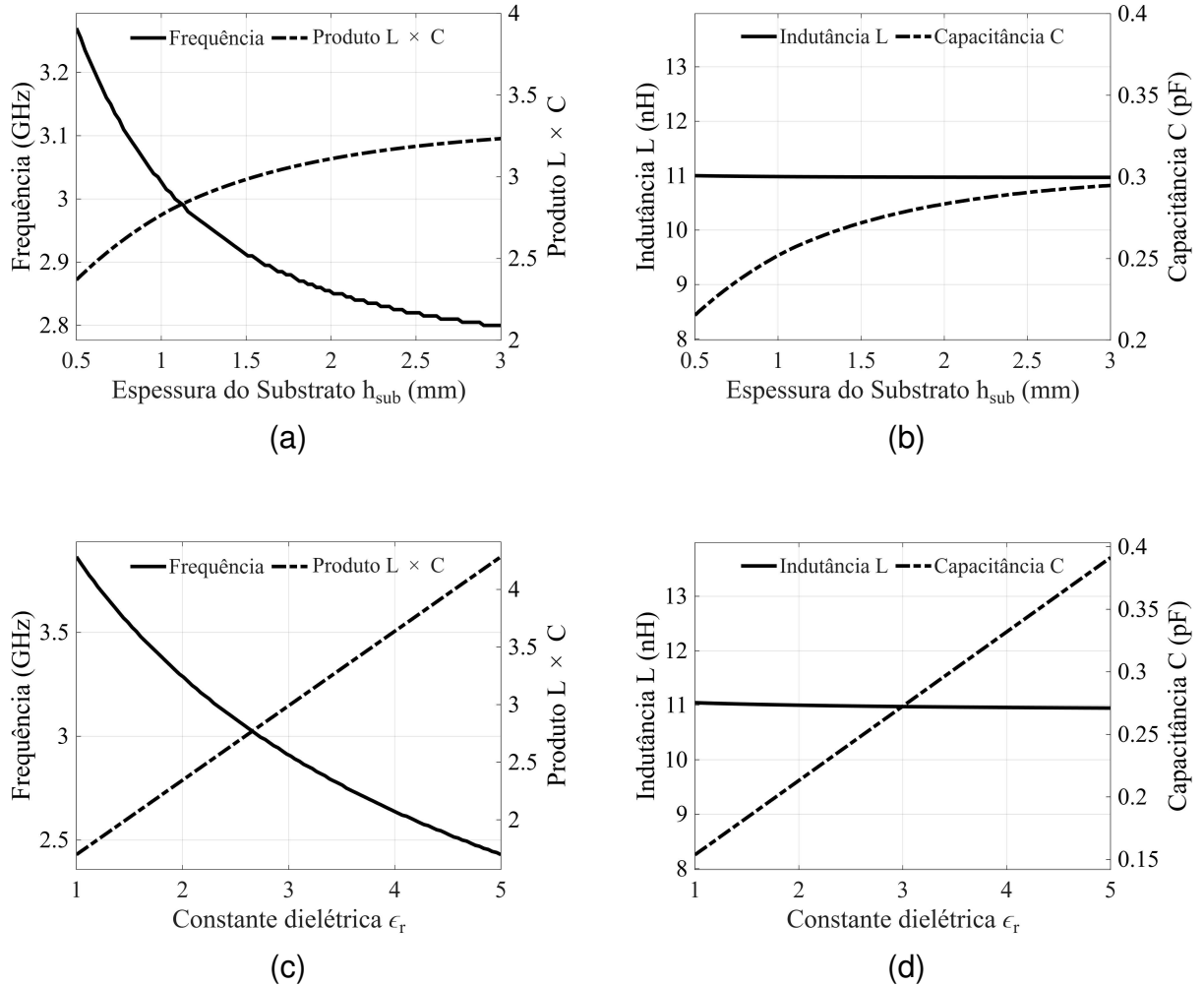
4.2.6 Efeito do Substrato Dielétrico (h_{sub} e ε_r)

Para finalizar a caracterização paramétrica da Cruz de Jerusalém, avalia-se o comportamento eletromagnético da estrutura frente às propriedades do material dielétrico. A Figura 14 ilustra as variações de resposta do circuito quando a espessura da placa (h_{sub}) e a sua constante dielétrica relativa (ε_r) são alteradas isoladamente.

Como esperado, variações no substrato dielétrico não afetam o comportamento indutivo da geometria de forma significativa. Porém, o aumento da espessura confina uma porção maior do campo elétrico de borda, elevando a capacitância (C) e forçando a queda da ressonância até atingir um claro patamar de saturação assintótica.

Contudo, a Cruz de Jerusalém apresenta uma complexidade analítica superior no cômputo da permissividade efetiva (ε_{ef}). Conforme modelado na Equação (16), o fator de decaimento de Costa (α) é interpolado dinamicamente em função da razão h_{sub}/p . Esse acoplamento cruzado faz com que, à medida que h_{sub} aumenta, a permissividade efetiva se aproxime gradualmente de um regime saturado, reduzindo a sensibilidade incremental da capacitância e estabilizando a frequência de ressonância.

Figura 14 – Análise paramétrica das propriedades do substrato para a Cruz de Jerusalém: (a) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de h_{sub} ; (b) variação de L e C em função de h_{sub} ; (c) variação de f_r e do produto $L \times C$ em função de ϵ_r ; (d) variação de L e C em função de ϵ_r .



Fonte: Autor.

4.3 Considerações finais

A análise paramétrica sistemática apresentada neste capítulo revelou de forma quantitativa como cada variável geométrica e dielétrica governa o comportamento ressonante das estruturas FSS estudadas. O mapeamento detalhado das influências de periodicidade, dimensões do elemento ressonante e das propriedades do substrato permitiu estabelecer um entendimento físico robusto sobre os mecanismos de sintonia das topologias de Espira Quadrada e Cruz de Jerusalém.

Com a base teórica consolidada, tornou-se possível identificar quais parâmetros possuem maior sensibilidade para o ajuste de frequência, fornecendo as diretrizes fundamentais para a etapa de projeto. Este conjunto de conhecimentos empíricos e

analíticos constitui o alicerce para a utilização do FSS Explorer, que será empregado no capítulo seguinte para a sintonia fina das geometrias conforme as especificações de desempenho requeridas.

5 Projeto e Validação das Superfícies Seletivas de Frequência

Este capítulo descreve o processo de projeto, otimização e validação das superfícies seletivas de frequência (FSS) propostas para operação na banda de interesse. A metodologia de projeto fundamenta-se na utilização do simulador FSS Explorer como ferramenta de exploração rápida do espaço de parâmetros, permitindo o ajuste preciso das dimensões geométricas das topologias de Espira Quadrada e Cruz de Jerusalém.

O objetivo central desta etapa consistiu em calibrar cada uma das duas geometrias para que apresentassem uma frequência de ressonância fundamental (f_r) de 3,55 GHz, frequência central da banda n78 do 5G, sob condição de incidência normal de onda plana. Para avaliar a sensibilidade de cada ressonador frente às propriedades dielétricas do substrato, o projeto contemplou a análise de quatro diferentes substratos comerciais para cada topologia, abrangendo uma variação controlada de constantes dielétricas (ϵ_r) e espessuras (h_{sub}).

Após a convergência analítica obtida através do simulador desenvolvido, as geometrias resultantes foram submetidas à simulação de onda completa (*full-wave*) no *software* Ansys HFSS. A validação do projeto é apresentada mediante a comparação direta entre os resultados analíticos e os dados numéricos de referência, com foco na concordância dos valores de f_r e na conformidade do fator de qualidade (Q) obtido em cada cenário, consolidando a precisão do modelo de circuito equivalente empregado.

As células unitárias foram implementadas no Ansys HFSS considerando condições periódicas a partir das condições de contorno primária e secundária, com alimentação por portas Floquet, seguindo os passos indicados em (OLIVEIRA, 2023).

É importante ressaltar que o simulador analítico desenvolvido opera sob a premissa de um modelo idealizado, desconsiderando as perdas ôhmicas no condutor e as perdas dielétricas no substrato. Em contrapartida, as simulações realizadas no Ansys HFSS incorporaram modelos físicos realistas, atribuindo condutividade finita ao cobre para representar o metal e tangentes de perda ($\tan \delta$) aos substratos dielétricos. Consequentemente, pequenas divergências entre os resultados analíticos e numéricos são esperadas, sendo atribuídas, em parte, à ausência de efeitos dissipativos no modelo de circuito equivalente.

5.1 Análise do Espalhador Anel Quadrado

Inicialmente, avaliou-se o desempenho da topologia Anel Quadrado. A Tabela 5 detalha os cenários de simulação, definindo as características espaciais e elétricas de cada laminado. É importante destacar que, para garantir a mesma frequência de ressonância em todos os casos, os parâmetros geométricos da célula unitária (periodicidade p_q , lado externo d_q e largura da trilha w_q) foram otimizados individualmente no FSS Explorer para compensar a variação de densidade dielétrica de cada material. As dimensões finais sintetizadas para cada caso estão consolidadas na Tabela 6.

Tabela 5 – Configurações de substrato para os projetos do Anel Quadrado.

Caso	Substrato Comercial	Espessura h_{sub} [mm]	Permissividade ε_r
1	Rogers RO3003	1,520	3,00
2	Rogers RO3006	1,280	6,15
3	FR4	1,600	4,40
4	RF-35	0,762	3,50

Tabela 6 – Parâmetros geométricos otimizados para o Anel Quadrado em cada cenário.

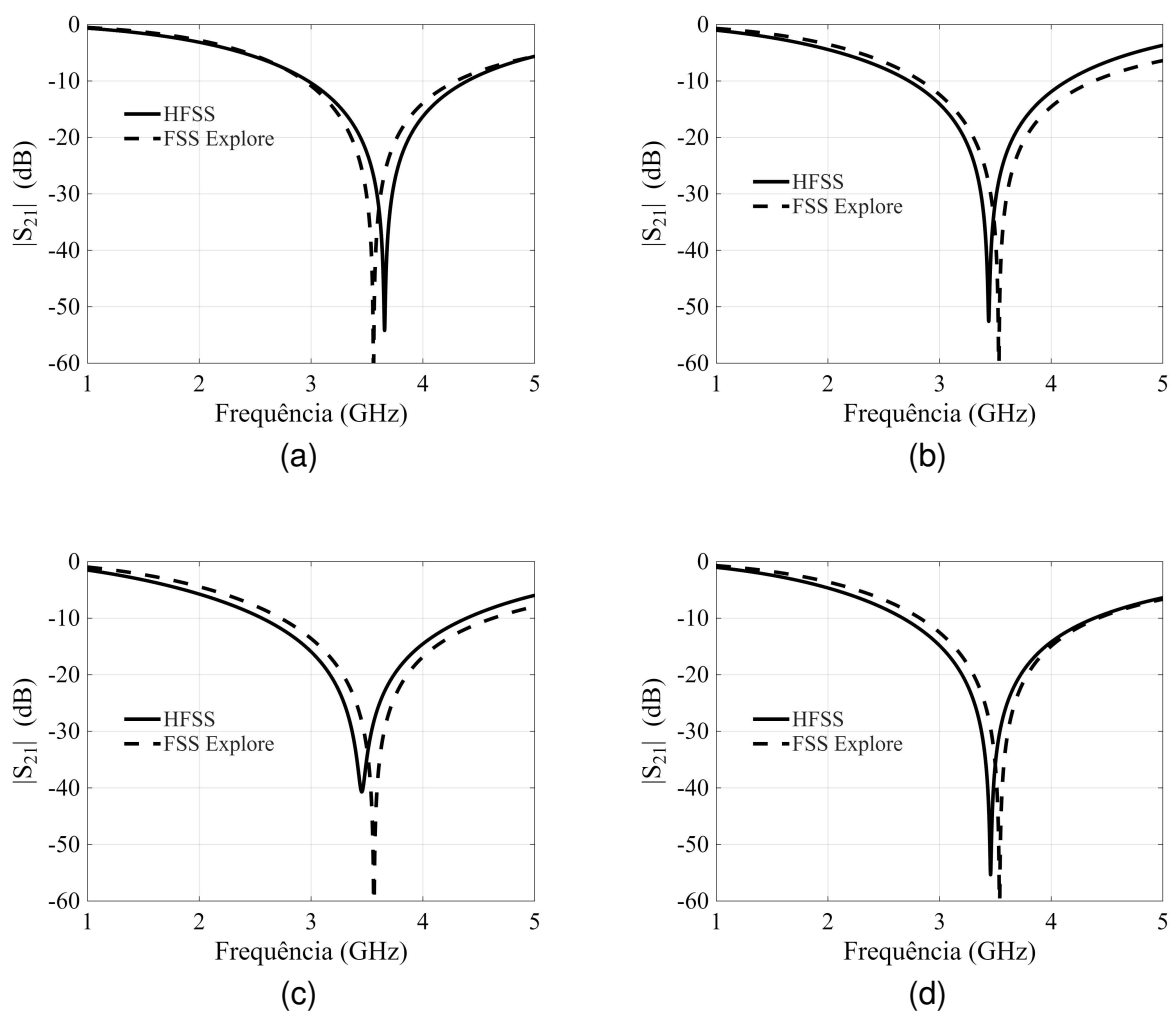
Caso	Substrato Comercial	p_q [mm]	d_q [mm]	w_q [mm]
1	Rogers RO3003	18	16,0	0,62
2	Rogers RO3006	20	16,5	1,00
3	FR4	19	17,0	1,40
4	RF-35	16	15,0	0,67

5.1.1 Comparação entre Simulador Analítico e HFSS

A validação da síntese analítica projetada para a banda n78 é materializada na Figura 15. Os gráficos sobrepõem as curvas do coeficiente de transmissão (magnitude de $|S_{21}|$) geradas pelo modelo ECM implementado no FSS Explorer aos dados paramétricos extraídos da simulação de onda completa no Ansys HFSS. A inspeção visual das respostas espectrais atesta uma convergência morfológica significativa entre as abordagens, evidenciando o comportamento característico de um filtro rejeita-faixa (*band-stop*) com vales de atenuação agudos centrados na vizinhança de 3,55 GHz.

A Tabela 7 apresenta a análise quantitativa das métricas de desempenho dos casos avaliados em termos de frequência de ressonância (f_r) e fator de qualidade (Q). O desvio relativo percentual (Erro %) foi calculado adotando-se o *solver* comercial como referência numérica padronizada.

Figura 15 – Comparativo das respostas em frequência ($|S_{21}|$) para o Anel Quadrado: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso 4.



Fonte: Autor.

Tabela 7 – Validação paramétrica de f_r e Q para os projetos do Anel Quadrado.

Substrato	f_r (Sim) [GHz]	f_r (HFSS) [GHz]	Erro %	Q (Sim)	Q (HFSS)	Erro %
RO3003	3,55	3,66	3,01	2,63	2,58	1,94
RO3006	3,55	3,44	3,20	2,28	2,42	5,79
FR4	3,55	3,45	2,90	1,87	1,89	1,06
RF-35	3,55	3,45	2,90	2,21	1,89	16,93

5.1.2 Análise e Discussão dos Resultados

A análise espectral consolidada na Figura 15 atesta uma concordância morfológica notável entre o modelo de circuito equivalente sintetizado no FSS Explorer e as soluções eletromagnéticas tridimensionais rigorosas extraídas do Ansys HFSS. A inspeção visual das curvas de transmissão ($|S_{21}|$) confirma que a topologia do Anel Quadrado atua com excelência como um filtro rejeita-faixa (*band-stop*), exibindo vales de atenuação agudos e bem definidos. O alinhamento dos picos de ressonância em torno do espectro de 3,55 GHz valida o equacionamento analítico utilizado para a predição de funcionamento da estrutura.

No que tange à avaliação quantitativa, os dados da Tabela 7 evidenciam a precisão do algoritmo de sintonia geométrica. Em todos os cenários investigados, o erro da frequência de ressonância (f_r) manteve-se estritamente na margem de 2,9% a 3,2%. Apesar destes erros, destaca-se que todas as geometrias projetadas pelo simulador desenvolvido apresentaram f_r dentro da faixa de operação do 5G quando simulados no Ansys HFSS.

Constatam-se, ainda, divergências quanto à profundidade do vale de rejeição (magnitude absoluta de $|S_{21}|$) e ao fator de qualidade (Q). Acredita-se que tais variações sejam uma consequência direta das premissas simplificadoras adotadas em sua modelagem circuital.

Dentre as variações analisadas, o projeto sintetizado sobre o substrato FR4 (Caso 3) desponta como a escolha técnica mais adequada para a aplicação final. Além de apresentar a melhor correlação de erro entre o modelo analítico e o numérico na determinação da frequência (2,9%) e da seletividade (1,06%), sua banda de rejeição cobre toda a faixa de frequências n78 do 5G.

Do ponto de vista prático e metodológico, os resultados qualificam a topologia do Anel Quadrado como uma solução geometricamente robusta para a filtragem espacial para aplicações de redes móveis de quinta geração. Ademais, a análise referenda o FSS Explorer como uma ferramenta eficiente de pré-projeto, uma vez que o aplicativo permitiu explorar rapidamente o amplo espaço de variáveis (p_q , d_q , w_q) e entregar dimensões que obtiveram desempenho de ressonância próximo ao objetivo estabelecido. Isso confere ao fluxo de engenharia uma redução drástica na carga e no ônus computacional, fornecendo um ponto de partida confiável ao Ansys HFSS para a etapa final de otimização da geometria.

5.2 Análise do Espalhador Cruz de Jerusalém

Nesta seção, avalia-se o desempenho da topologia Cruz de Jerusalém, cujos múltiplos graus de liberdade geométrica foram explorados para a sintonia na frequência central de 3,55 GHz. A geometria foi sintetizada sobre quatro laminados comerciais com perfis dielétricos e espessuras diferentes, cujas configurações físicas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Configurações de substrato para os projetos da Cruz de Jerusalém.

Caso	Substrato Comercial	Espessura h_{sub} [mm]	Permissividade ϵ_r
1	FR4	1,600	4,40
2	Rogers RO3003	1,520	3,00
3	Rogers RO3006	1,280	6,15
4	Rogers RT/duroid 5880	0,254	2,20

O FSS Explorer foi utilizado na otimização paramétrica da célula unitária. As dimensões finais sintetizadas englobando a periodicidade (p_c), comprimento do braço central (d_c), largura da trilha (w_c), espessura da terminação capacitiva (h_c) e fenda intercelular (g_c) estão consolidadas na Tabela 9.

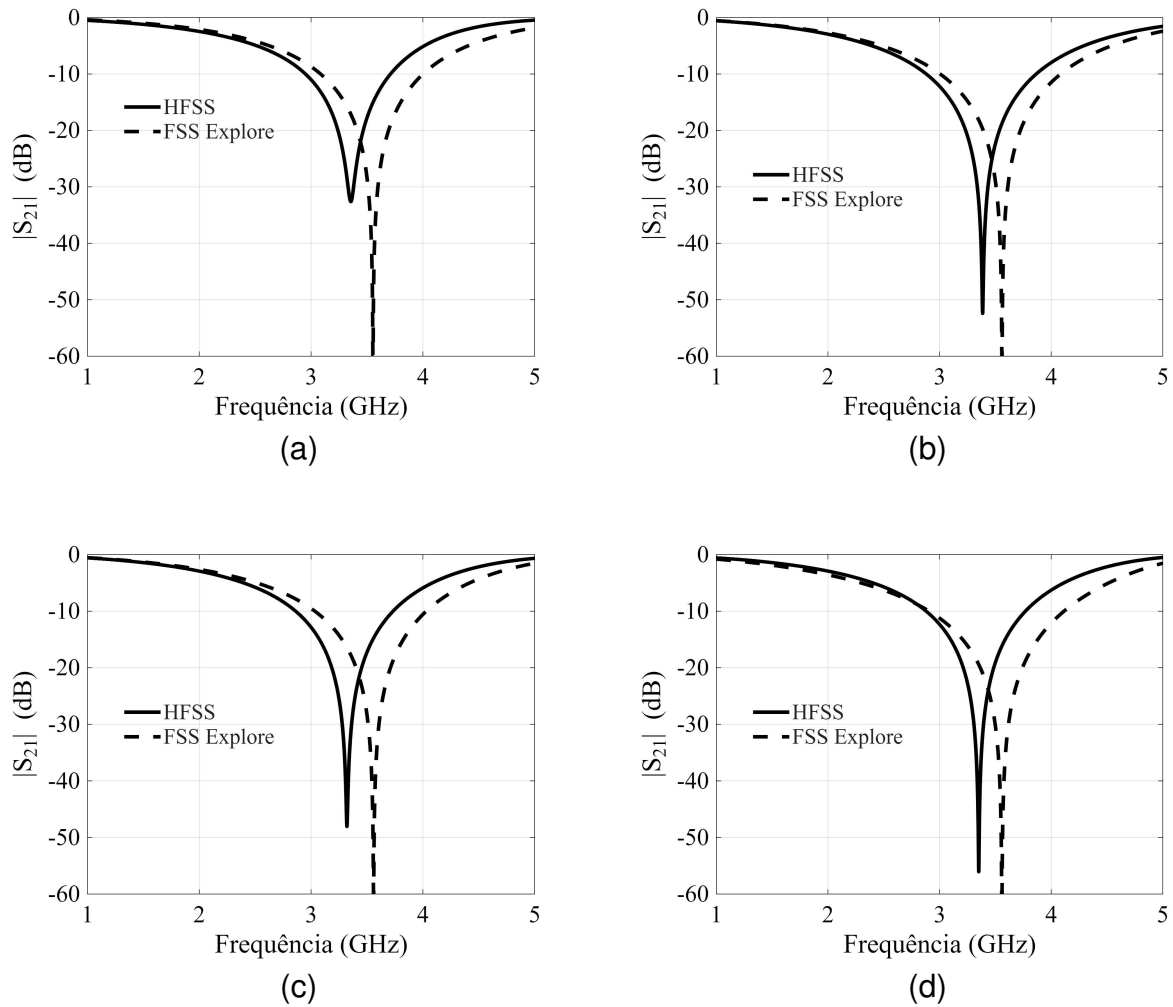
Tabela 9 – Parâmetros geométricos otimizados para a Cruz de Jerusalém em cada cenário.

Caso	Substrato Comercial	p_c [mm]	d_c [mm]	w_c [mm]	h_c [mm]	g_c [mm]
1	FR4	17	7,2	0,5	2,0	2,0
2	Rogers RO3003	18	8,3	1,0	2,0	1,0
3	Rogers RO3006	19	6,5	1,0	1,0	2,0
4	Rogers RT/duroid 5880	20	14,0	1,9	2,0	1,0

5.2.1 Comparação entre Simulador Analítico e HFSS

A eficácia do equacionamento do modelo ECM implementado para estruturas com terminações capacitivas complexas é visualmente inspecionada na Figura 16. Os gráficos sobrepõem as respostas em frequência (magnitude do coeficiente de transmissão $|S_{21}|$) obtidas instantaneamente via FSS Explorer com os perfis de onda completa gerados no Ansys HFSS. É imperativo destacar que apesar da estrutura atuar como um ressonador de múltiplas bandas, capaz de gerar ressonâncias secundárias em frequências superiores, a presente validação restringe-se unicamente à caracterização e sintonia da primeira ressonância fundamental, garantindo a rejeição primária na banda n78.

Figura 16 – Comparativo das respostas em frequência ($|S_{21}|$) para a Cruz de Jerusalém: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso 4.



Fonte: Autor.

Para promover uma validação rigorosa, a Tabela 10 quantifica as métricas espectrais essenciais de cada curva em termos de f_r e Q , com seus respectivos desvios relativos tomando o HFSS como referência.

Tabela 10 – Validação paramétrica de f_r e Q para os projetos da Cruz de Jerusalém.

Substrato	f_r (Sim) [GHz]	f_r (HFSS) [GHz]	Erro %	Q (Sim)	Q (HFSS)	Erro %
FR4	3,55	3,36	5,65	3,86	4,42	12,67
RO3003	3,55	3,39	4,72	3,29	3,42	3,80
RO3006	3,55	3,32	6,92	3,56	3,82	6,81
RT5880	3,55	3,35	5,97	2,94	3,77	22,02

5.2.2 Análise e Discussão dos Resultados

A análise espectral consolidada na Figura 16 demonstra a eficácia da formulação analítica na predição do comportamento de filtragem da Cruz de Jerusalém.

A inspeção visual das curvas de magnitude de transmissão ($|S_{21}|$) atesta que o modelo ECM do FSS Explorer obteve êxito em traçar a morfologia do espalhamento. No entanto, a quantificação apresentada na Tabela 10 revela que o desvio relativo da frequência central (f_r) situou-se em um patamar superior ao do Anel Quadrado. Acredita-se que esta divergência é fisicamente fundamentada na complexidade do arranjo capacitivo da célula. O solucionador *full-wave* do HFSS computa integralmente o volume dessas interações tridimensionais, observando uma capacitância total levemente superior à predita pelo modelo ECM. O aumento dessa reatância capacitiva justifica o deslocamento das curvas do HFSS para frequências sutilmente mais baixas em todos os casos.

No que concerne à seletividade do ressonador, acredita-se que os desvios dos resultados obtidos sejam devidos às premissas de modelagem idealizada, manifestando-se de maneira distinta dependendo do meio material. A discrepância mais severa no fator de qualidade ocorreu no substrato Rogers RT/duroid 5880 (Caso 4), atingindo 22,02%, justamente na arquitetura que apresenta uma condição de projeto extremo, utilizando um substrato ultrafino.

Dentre os laminados avaliados, o Rogers RO3003 (Caso 2) destaca-se como a solução mais assertiva e robusta, entregando a melhor fidelidade na previsão simultânea de ressonância e banda, além de apresentar uma faixa de frequências de rejeição que cobre todo o espectro da banda n78.

Do ponto de vista aplicado à engenharia de micro-ondas para o 5G, conclui-se que o FSS Explorer cumpre o seu papel de ferramenta de síntese preliminar. Em estruturas complexas como a Cruz de Jerusalém, mesmo que as geometrias projetadas apresentem erros de até 7% em f_r como observado nos casos avaliados, garantem que o projetista inicie a modelagem com estruturas iniciais que apresentem f_r dentro da banda n78.

5.3 Considerações finais

Os resultados discutidos ao longo deste capítulo confirmam a eficácia de utilizar o simulador analítico desenvolvido como uma etapa precedente à modelagem tridimensional. Ao cruzar os dados do FSS Explorer com as respostas do Ansys HFSS, foi possível não apenas encontrar as dimensões adequadas para operar na banda n78 (3,55 GHz), mas, principalmente, compreender os limites práticos do ECM.

A avaliação conjunta das duas topologias evidencia que a precisão preditiva das equações está diretamente ligada à simplicidade geométrica da célula e à espessura do dielétrico. No caso do **Anel Quadrado**, em que o acoplamento elétrico ocorre por fendas retas e uniformes, o modelo de Marcuvitz entrega uma boa concordância. Como a estrutura se aproxima bastante de um problema bidimensional ideal, a diferença na frequência central limitou-se à margem de 2% a 3%. As pequenas variações observadas na métrica de seletividade refletem as aproximações utilizadas na elaboração do modelo.

O cenário torna-se tecnicamente mais desafiador com a **Cruz de Jerusalém**. A presença de terminações ortogonais altera a distribuição de corrente nas bordas do elemento, criando efeitos capacitivos adicionais. Para continuar tratando essa estrutura como um circuito LC em série, o modelo matemático exige simplificações mais agressivas. Como reflexo dessa dinâmica, o erro na previsão da frequência desloca-se para a faixa de 5% a 7%. Além disso, o impacto do dielétrico sobre o fator de qualidade fica muito mais evidente, ultrapassando os 20% de divergência quando são empregados substratos ultrafinos.

Contudo, essas discrepâncias em geometrias mais complexas não desqualificam o equacionamento construído; elas servem justamente para demarcar os limites físicos do modelo ECM. Para os fins de validação propostos neste capítulo, acredita-se que o FSS Explorer cumpriu seu papel, tendo em vista que as parametrizações das geometrias são realizadas de forma ágil e computacionalmente eficiente, resultando em estruturas com desempenho próximo aos requisitos de projeto.

6 Conclusões e trabalhos futuros.

Este trabalho concentrou-se na análise paramétrica e no projeto de Superfícies Seletivas em Frequência (FSS) voltadas para a banda n78 do 5G. Ao longo do estudo, buscou-se compreender como a geometria dos espalhadores metálicos e as propriedades dos substratos afetam o desempenho dessas estruturas. Esse objetivo foi atingido com sucesso graças à criação do FSS Explorer, um simulador analítico desenvolvido especificamente para esta análise. As estimativas geradas por ele mostraram-se consistentes e confiáveis quando cruzadas com os resultados rigorosos obtidos pelas simulações de onda completa no Ansys HFSS.

Os resultados evidenciaram que geometrias com menor grau de complexidade lidam muito bem com as formulações do Modelo de Circuito Equivalente. O Anel Quadrado, por exemplo, apresentou desvios entre 2,9% e 3,2% na previsão da frequência de ressonância, especialmente quando associado ao substrato FR4. Em contrapartida, como a estrutura da Cruz de Jerusalém apresenta braços com terminações mais detalhadas, a resposta analítica tendeu a subestimar sutilmente o comportamento real da célula, fazendo com que a margem de erro das estimativas aumentasse para a casa dos 4,7% a 6,9%. Ainda assim, as geometrias avaliadas resultaram em estruturas com f_r dentro da banda n78.

Do ponto de vista prático, o uso do simulador analítico como uma ferramenta de pré-projeto de FSS surge como uma alternativa viável para redução do custo computacional. O ambiente web desenvolvido atuou de forma eficiente nessa etapa inicial, sendo fundamental para o entendimento da influência dos parâmetros geométricos na resposta em frequência da estrutura e para fornecer ao software comercial um ponto de partida mais assertivo para posterior otimização.

A pesquisa teve como contribuição principal o desenvolvimento de uma ferramenta computacional intuitiva e um mapeamento preliminar dos limites da teoria de circuitos equivalentes na modelagem das FSS compostas por espalhadores em formato de anel quadrado e cruz de Jerusalém. É importante pontuar, contudo, as restrições do modelo matemático implementado, pois o software parte de um cenário ideal, considerando apenas ondas planas em incidência normal, desconsiderando as perdas ôhmicas do condutor e a tangente de perda do dielétrico. Tais simplificações explicam as pequenas diferenças notadas na profundidade dos vales de atenuação e na seletividade da banda.

Como continuidade para este trabalho, recomenda-se a expansão das capacidades do FSS Explorer por meio da incorporação de novos recursos matemáticos e

estruturais. Destaca-se a inclusão de um fator de correção para calcular o desempenho sob incidência oblíqua, permitindo simulações com diferentes ângulos de incidência e polarização da onda, além do suporte para a modelagem de novas geometrias e de arranjos mais complexos em cascata. Outra possibilidade promissora é a avaliação da distribuição de corrente da FSS no Ansys HFSS, para validar a influência dos parâmetros geométricos e para propor adaptações às geometrias convencionais. Por fim, indica-se a fabricação de protótipos para testes práticos e validação experimental dos parâmetros de espalhamento com o auxílio de analisador de rede vetorial.

Referências

3GPP. *ETSI TS 138 104 V15.19.0 (2023-07): 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.19.0 Release 15)*. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.etsi.org/standards-search>. Citado na página [18](#).

Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). **Ato nº 16539, de 27 de novembro de 2023**. 2023. Publicado no Diário Oficial da União em 29/11/2023. Requisitos Técnicos e Operacionais de Uso das Faixas de Radiofrequências Associadas aos Serviços de Interesse Coletivo. Citado 2 vezes nas páginas [18](#) e [19](#).

Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). **Ato nº 915, de 01 de fevereiro de 2024**. 2024. Publicado no Diário Oficial da União em 07/02/2024. Requisitos Técnicos e Operacionais para Uso das Faixas de Radiofrequências Associadas aos Serviços Limitado Privado. Citado na página [19](#).

ANWAR, R. S.; MAO, L.; NING, H. Frequency selective surfaces: A review. **Sensors**, MDPI, v. 18, n. 10, p. 1–52, 2018. Review article. ISSN: 1424-8220. Citado 2 vezes nas páginas [26](#) e [30](#).

ARAUJO, L. M. et al. A simple dual-band frequency selective surface. **Microwave and Optical Technology Letters**, Wiley, v. 51, n. 4, p. 942–944, 2009. Citado na página [28](#).

ARAUJO, L. M. de. **Análise teórica e experimental de superfícies seletivas de frequência e suas aplicações em antenas planares**. Agosto 2009. 84 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação), 2009. Citado na página [24](#).

BRANDAO, G. L. de F. **Projeto e análise de metasuperfícies condutoras magnéticas artificiais utilizando condições de contorno generalizadas**. 100 p. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica), 2022. Citado na página [20](#).

BUKHARI, S. S.; VARDAXOGLU, J.; WHITTOW, W. Applied sciences. **A Metasurfaces Review: Definitions and Applications**, MDPI, v. 9, n. 13, p. 2727, 2019. Open Access under CC BY. Citado na página [23](#).

CAMPOS, A. L. P. de S. Livro. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. Natal, RN: Editora IFRN, 2008. 199 p. Inclui bibliografia e apêndice com códigos em Matlab. ISBN 978-85-89571-47-0. Citado 7 vezes nas páginas [25](#), [26](#), [29](#), [30](#), [31](#), [32](#) e [33](#).

CHEN, X. et al. Frequency selective surface toward 6g communication systems: A contemporary survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 2024. Manuscript received 22 July 2023; revised 16 January 2024 and 19 February 2024; accepted 19 February 2024. Date of publication 23 February 2024; date of current version 23 August 2024. Citado na página [25](#).

COSTA, F. A simple effective permittivity model for metasurfaces within multilayer stratified media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 69, n. 8, p. 5148–5153, 2021. Citado 2 vezes nas páginas [34](#) e [36](#).

COSTA, F.; MONORCHIO, A.; MANARA, G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, IEEE, v. 54, n. 4, p. 35–48, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.

COSTA, F.; MONORCHIO, A.; MANARA, G. An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces. **Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) Journal**, ACES, v. 29, n. 12, p. 960–976, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 34, 36 e 48.

FILGUEIRA, J. D. B. **Cálculo de parâmetros otimizados para superfícies seletivas em frequência por meio do método de otimização Taguchi**. 2016. 114 p. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.

GLYBOVSKI, S. B. et al. Physics reports. **Metasurfaces: From microwaves to visible**, Elsevier, v. 634, p. 1–72, 2016. Review article. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

GUSTAFSSON, M. et al. Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication. **Antennas and Propagation, IEEE Transactions on**, v. 54, p. 1897 – 1900, 07 2006. Citado na página 30.

KAPOOR, A.; MISHRA, R.; KUMAR, P. Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. **Alexandria Engineering Journal**, Elsevier, v. 61, p. 4263–4293, 2022. Open access under CC BY license. Citado na página 30.

LANGLEY, E. P. R. **Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit**. 1983. Citado na página 30.

LANGLEY, R. J.; PARKER, E. A. Equivalent circuit model for arrays of square loops. **Electronics Letters**, IET, v. 18, n. 7, p. 294–296, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

LEONARD, T. W.; COFER, J. W. A new equivalent circuit representation for the jerusalem cross. In: **International Conference on Antennas and Propagation, Proceedings. Part 1**. London, England: Institution of Electrical Engineers, 1978. p. 65–69. Presented at ICAP, November 28–30, 1978. Citado na página 35.

MARCUVITZ, N. **Waveguide Handbook**. London, UK: IET, 1951. v. 10. (MIT Radiation Laboratory Series, v. 10). Reprinted by the Institution of Engineering and Technology. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

MUNK, B. A. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**. New York: Wiley-Interscience, 2000. Professor of Electrical Engineering, Emeritus, The Ohio State University. Life Fellow IEEE. ISBN 0-471-37047-9. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 29 e 30.

NETO, J. J. G. P. et al. Absorb/transmit broadband type frequency selective surface. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 22, n. 1, 2023. Citado na página 19.

NOBRE, F. D. M. et al. Micromachines. **Multifunctional Metasurface with PIN Diode Application Featuring Absorption, Polarization Conversion, and Transmission Functions**, v. 15, n. 11, p. 1344, 2024. Open Access under CC BY 4.0. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

- OLIVEIRA, A. L. M. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica), **Superfícies seletivas em frequências multibanda e/ou banda larga**. 2023. 78 p. Citado 2 vezes nas páginas [31](#) e [56](#).
- POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4th. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-63155-3. Citado 2 vezes nas páginas [39](#) e [40](#).
- ROMEU, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Fractal fss: A novel dual-band frequency selective surface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 48, n. 7, p. 1097–1104, 2000. Citado na página [28](#).
- RONG, X. R. et al. Design of multiband frequency selective surface using fractal elements. **Proceedings of the 2008 Asia-Pacific Microwave Conference**, IEEE, p. 1–4, 2008. Citado na página [29](#).
- SANZ-IZQUIERDO, B. et al. Singly and dual polarized convoluted frequency selective structures. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 58, n. 4, p. 1172–1177, 2010. Accepted pre-published version available via ResearchGate. Citado na página [28](#).
- SEGUNDO, J. dos S. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), **Aplicação de inteligência computacional para a análise de estruturas seletivas em frequência de banda dupla**. Natal, RN: [s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas [29](#) e [30](#).
- SILVA, M. W. B. da. **Superfícies Seletivas em Frequência – FSS: concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em WLAN, WiMAX e radar**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, Brasil, 2014. Citado 3 vezes nas páginas [27](#), [31](#) e [33](#).
- SOUSA, T. R. de et al. Convoluted frequency selective surface with dual and trial-band response. In: **2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–3. Citado na página [29](#).
- SOUTO, G. A. **Estudo Paramétrico sobre Superfícies Seletivas em Frequência Reconfiguráveis**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, dezembro 2020. Citado na página [24](#).
- SOUZA, J. da S. **Análise de superfície seletiva em frequência baseada na geometria anéis trapezoidais abertos**. Março 2018. 70 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, 2018. Citado 3 vezes nas páginas [19](#), [20](#) e [23](#).
- SUNG, G.-H.; SOWERBY, K.; WILLIAMSON, A. Equivalent circuit modelling of a frequency selective plasterboard wall. In: **2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4A, p. 400–403 vol. 4A. Citado na página [30](#).
- WU, T.-K. Frequency selective surfaces. In: _____. **Encyclopedia of RF and Microwave Engineering**. [S.l.: John Wiley Sons, Ltd, 2005. ISBN 9780471654506. Citado 2 vezes nas páginas [29](#) e [30](#).



ANEXO I - Declaração sobre o Uso de Inteligência Artificial

Aluno (a): Felipe Augusto Ferreira Santos

Matrícula: 41811ETE010

Título PFCII: Análise Paramétrica e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência para Aplicações na Banda n78 do 5G

Eu, aluno(a) com nome e matrícula supracitados, e com o respectivo trabalho de PFCII, declaro para os devidos fins que as informações prestadas a seguir refletem de forma verídica e completa o uso ou não uso de ferramentas de Inteligência Artificial neste trabalho, em conformidade com a Resolução COLCGETPM Nº 19, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2025.

SELECIONE UMA DAS OPÇÕES A SEGUIR:

☐ **NÃO HOUVE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

(Se marcar esta opção, não é necessário preencher os campos 1 a 4)

Declaro que não utilizei, em nenhuma etapa do desenvolvimento do presente trabalho, ferramentas de Inteligência Artificial para qualquer finalidade e assumo integral responsabilidade pelo conteúdo.

☒ **HOVE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

(Preencher os campos obrigatórios abaixo, assinalando obrigatoriamente os itens 3 e 4)

Declaro que utilizei, durante o desenvolvimento do presente trabalho, as seguintes ferramentas de Inteligência Artificial e informações descritas nos itens de 1 a 4.

1. Ferramenta(s) e versão(ões) predominante(s): Gemini, Claude code, NotebookLM, Prism GPT, Perplexity.

2. Propósito(s) (marque todos os que se aplicam):

- ☐ Exploração inicial de ideias.
- ☒ Busca de referências bibliográficas.
- ☒ Revisão de linguagem (por exemplo, melhoria de gramática ou correção de ortografia).
- ☒ Tradução técnica (conversão do texto ou partes dele para outro idioma).
- ☐ Geração automatizada de tabelas, gráficos ou figuras a partir de dados previamente analisados pelos autores.
- ☒ Programação: sugestão, depuração e documentação de códigos computacionais.

☐ Outros (especificar): _____



3. Autoria e validação humana:

☒ Informo que a autoria intelectual do manuscrito, bem como sua supervisão e validação, são de minha responsabilidade e que o uso de ferramentas de IA foi exclusivamente para os propósitos acima declarados.

4. Princípios éticos:

☒ Declaro que a utilização das ferramentas de IA seguiu práticas éticas, não incluindo atividades que comprometam a integridade científica tais como a geração de conteúdo original, manipulação de dados, plágio, interpretações ou análises pela IA.

☒ Declaro que respeitei direitos autorais, licenças, confidencialidade e políticas editoriais.

☒ Declaro que não enviei dados inéditos ou sensíveis à serviços que utilizam conteúdos para treinamento de modelos, exceto em plataformas institucionais ou com garantias contratuais de confidencialidade e não retenção, assegurando conformidade com a LGPD (Lei nº 13.709/2018) e demais normas de proteção de dados.

Data: 14/07/2026

Documento assinado digitalmente
gov.br FELIPE AUGUSTO FERREIRA SANTOS
Data: 14/07/2026 13:42:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) Discente