



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO E ANÁLISE DE CIRCULADORES NÃO RECÍPROCOS PARA RADARES AUTOMOTIVOS EM ONDAS MILIMÉTRICAS

ALBERTO MATEUS PINHEIRO DA GAMA

DM 11/2025

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALBERTO MATEUS PINHEIRO DA GAMA

**PROJETO E ANÁLISE DE CIRCULADORES NÃO RECÍPROCOS
PARA RADARES AUTOMOTIVOS EM ONDAS MILIMÉTRICAS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. MIÉRCIO CARDOSO DE ALCÂNTARA NETO

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

P654p Pinheiro Da Gama, Alberto Mateus.
PROJETO E ANÁLISE DE CIRCULADORES NÃO
RECÍPROCOS PARA RADARES AUTOMOTIVOS EM
ONDAS MILIMÉTRICAS / Alberto Mateus Pinheiro Da
Gama, . — 2025.
80 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Miercio Cardoso de Alcantara
Neto
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. Circulador. 2. Microfita. 3. Hexaferrita de
Estrôncio. 4. CST. 5. HFSS. I. Título.

CDD 384

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROJETO E ANÁLISE DE CIRCULADORES NÃO RECÍPROCOS
PARA RADARES AUTOMOTIVOS EM ONDAS MILIMÉTRICAS**

AUTOR: ALBERTO MATEUS PINHEIRO DA GAMA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA APROVADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 29/05/2025

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. MIÉRCIO CARDOSO DE ALCÂNTARA
NETO**
(Orientador - PPGEE / UFPA)

Prof. Dr. FABRÍCIO JOSÉ BRITO BARROS
(Avaliador Interno - PPGEE / UFPA)

Prof. Dr. BRUNO SOUZA LYRA CASTRO
(Avaliador Externo - CAMPUS CASTANHAL / UFPA)

Dra. THEOMA MURIEL SANCHES OTOBO
(Avaliador Externo - PRODEPA / UFPR)

VISTO:

Prof. Dr. DIEGO LISBOA CARDOSO
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Dedico este trabalho à minha família, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.
Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me inspiraram a buscar o conhecimento.
E a todos que, de alguma forma, tornaram esta jornada possível.*

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas e instituições. Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Miércio Cardoso de Alcântara Neto, por sua orientação constante, dedicação e incentivo durante todas as etapas desta pesquisa. Sua expertise e apoio foram essenciais para alcançar os objetivos deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT), agradeço pelas discussões técnicas, ideias compartilhadas e pelo ambiente colaborativo que tornou este projeto possível.

Sou profundamente grato à minha família, pelo amor incondicional, paciência e encorajamento em todos os momentos. Vocês foram a base que me sustentou e me motivou a seguir adiante.

Agradeço também à Universidade Federal do Pará, pelo suporte financeiro e pelos recursos disponibilizados que permitiram a realização desta pesquisa.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, seja com palavras de incentivo, sugestões técnicas ou apoio moral. A todos vocês, meu muito obrigado!

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”

Robert Collier

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto, a modelagem e a análise de circuladores não recíprocos operando na faixa de frequências de 76–81 GHz, visando aplicações em sistemas de radar automotivo de alta performance. Empregando *Strontium Hexaferrite* ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ - hexaferrita de estrôncio) como material ferrítico, foram projetados e simulados circuladores de 3, 4 e 6 portas em configuração microfita. As simulações eletromagnéticas foram realizadas nos softwares CST Microwave Studio (FDTD) e Ansys HFSS (FEM) para validação dos resultados. A análise dos parâmetros S demonstrou consistentemente perdas de inserção inferiores a 0,8 dB e isolamentos superiores a 25 dB para os *designs* propostos, indicando o potencial promissor da abordagem para aplicações em 77 GHz. Adicionalmente, a pesquisa aborda o impacto das propriedades da hexaferrita de estrôncio no desempenho dos circuladores e discute a relevância da precisão geométrica para a fabricação desses dispositivos em altas frequências. Este estudo contribui para o desenvolvimento de tecnologias de radar automotivo mais avançadas, fornecendo soluções eficientes e escaláveis para o roteamento e isolamento de sinais em sistemas de radar complexos operando em 77 GHz.

Palavras-chave: Circulador, Microfita, Hexaferrita de Estrôncio, CST, HFSS.

Abstract

This work presents the design, modeling, and analysis of non-reciprocal circulators operating in the 76–81 GHz frequency range, targeting applications in high-performance automotive radar systems. Employing *Strontium Hexaferrite* ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) as the ferritic material, 3-port, 4-port, and 6-port circulators were designed and simulated in a microstrip configuration. Electromagnetic simulations were performed using CST Microwave Studio (FDTD) and Ansys HFSS (FEM) software for results validation. The S-parameter analysis consistently demonstrated insertion losses below 0.8 dB and isolations exceeding 25 dB for the proposed designs, indicating the promising potential of the approach for 77 GHz applications. Additionally, the research addresses the impact of strontium hexaferrite properties on circulator performance and discusses the relevance of geometric precision for the fabrication of these devices at high frequencies. This study contributes to the development of more advanced automotive radar technologies by providing efficient and scalable solutions for signal routing and isolation in complex radar systems operating at 77 GHz.

Keywords: Circulator, Microstrip, Strontium Hexaferrite, CST, HFSS.

Lista de Figuras

Figura 1 – Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) para funcionalidade de segurança ativa/passiva e conforto nos veículos atuais. (Fonte: Adaptado de (CHIPENGO, 2018))	1
Figura 2 – Espectro eletromagnético, com destaque para a faixa de ondas milimétricas (30 GHz - 300 GHz). (Fonte: Adaptado de (LAWRENCE et al., 2017))	2
Figura 3 – Ilustração do efeito Faraday em um ferrite magnetizado, mostrando a rotação do plano de polarização da onda eletromagnética. (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))	19
Figura 4 – Representação da estrutura cristalina do tipo espinélio, mostrando os sítios tetraédricos (A) e octaédricos (B). (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))	23
Figura 5 – Representação da estrutura cristalina de uma hexaferrita do tipo M. (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))	24
Figura 6 – Laço de histerese típico para um material ferrimagnético, mostrando a magnetização de saturação (M_s), a magnetização remanente (M_r) e o campo coercivo (H_c).	25
Figura 7 – Fluxo metodológico para o design e validação de circuladores.	29
Figura 8 – Diagrama esquemático de um circulador de junção em Y de três portas.	38
Figura 9 – Variação da matriz de espalhamento (S) em função do raio do disco de ferrite (R).	41
Figura 10 – Variação da matriz de espalhamento (S) em função da largura da linha de microfita (W).	41
Figura 11 – Geometria do circulador proposto em microfita.	42
Figura 12 – Geometria do circulador de 4 portas, construído a partir da junção de dois circuladores de 3 portas.	44
Figura 13 – Geometria do circulador de 6 portas, construído a partir do arranjo de seis circuladores de 3 portas, formando uma estrutura hexagonal.	44
Figura 14 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 1.	46
Figura 15 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 2.	47
Figura 16 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 3.	47
Figura 17 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($ \mathbf{E} $) no circulador de 3 portas a 77 GHz, com excitação na porta 1. (Fonte: Autor, 2024)	48
Figura 18 – Circulador de 3 portas simulados no Ansys HFSS. (Fonte: Autor, 2024)	49
Figura 19 – Parâmetros S do circulador de 4 portas com excitação na porta 1, simulados no CST Microwave Studio. (Fonte: Autor, 2024)	51
Figura 20 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($ \mathbf{E} $) no circulador de 4 portas a 77 GHz, com excitação na porta 1. (Fonte: Autor, 2024)	52

Figura 21 – Magnitude dos parâmetros S_{1j} ($j = 1 \dots 6$) do circulador de 6 portas, com excitação na porta 1. Faixa de simulação: 76–81 GHz. (Fonte: Autor, 2024)	54
Figura 22 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($ \mathbf{E} $) no circulador de 6 portas com excitação na porta 1, a 77 GHz. (Fonte: Autor, 2024)	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do circulador proposto.	42
Tabela 2 – Comparação dos parâmetros S do circulador de 3 portas obtidos com CST e HFSS a 77 GHz.	49
Tabela 3 – Comparação de desempenho dos circuladores projetados (simulações CST).	56

Lista de abreviaturas e siglas

FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
SRM	<i>Strontium Hexaferrite</i> (Estrôncio Hexaferrita)
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i> (Diferenças Finitas no Tempo)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
dB	<i>Decibel</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
WR-10	Guia de onda para banda de 75–110 GHz
EM	<i>Electromagnetic</i> (Eletromagnético)
LTCC	<i>Low-Temperature Co-fired Ceramic</i> (Cerâmica Co-fired de Baixa Temperatura)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
RF	<i>Radio Frequency</i> (Frequência de Rádio)
S-parameters	<i>Parâmetros S</i>
PML	<i>Perfectly Matched Layers</i> (Camadas Perfeitamente Acomodatórias)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e Relevância do Tema	1
1.2	Motivação	3
1.3	Problema de Pesquisa	4
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo Geral	5
1.4.2	Objetivos Específicos	5
1.5	Justificativa	6
1.6	Estrutura do Documento	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1	Introdução	8
2.2	Fundamentos do Eletromagnetismo: Equações de Maxwell e Materiais Ferrimagnéticos	9
2.2.1	Equações de Maxwell	9
2.2.2	Relações Constitutivas	13
2.2.3	Materiais Ferrimagnéticos e o Tensor de Polder	13
2.2.4	Conexão com o Funcionamento de Circuladores	16
2.3	Modelagem Matemática: Matriz de Espalhamento e Otimização	20
2.4	Materiais Ferrimagnéticos: Ferrites e suas Propriedades	22
2.4.1	Estrutura Cristalina e Classificação	22
2.4.2	Histerese Magnética	24
2.4.3	Mecanismos de Perda em Ferrites	26
2.5	Conclusão do Capítulo 2	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	Visão Geral da Metodologia	29
3.2	Modelagem e Simulação Computacional	30
3.2.1	Descrição dos Softwares	30
3.2.1.1	CST Microwave Studio	30
3.2.1.2	Ansys HFSS	30
3.2.2	Métodos Numéricos Empregados	31
3.2.2.1	Método das Diferenças Finitas no Tempo (FDTD) - CST Microwave Studio	31
3.2.2.2	Método dos Elementos Finitos (FEM) - Ansys HFSS	32
3.2.3	Configurações de Simulação no CST Microwave Studio	32
3.2.4	Configurações de Simulação no Ansys HFSS	34
3.2.5	Comparação dos Métodos Numéricos	34

3.2.6	Validação Cruzada com HFSS	35
3.2.7	Limitações da Metodologia	36
3.3	Design dos Circuladores	37
3.3.1	Circulador de 3 Portas	37
3.3.1.1	Design Conceitual e Escolha de Dimensões Iniciais	38
3.3.1.2	Escolha do Material Ferrítico	39
3.3.1.3	Adaptação de Impedância	39
3.3.1.4	Projeto do Campo Magnético Estático	40
3.3.1.5	Otimização Paramétrica Iterativa	40
3.3.1.6	Design do circulador proposto	42
3.3.2	Circuladores de 4 e 6 Portas	43
3.4	Considerações Finais do Capítulo	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.0.1	Resultados dos Circuladores de 3 Portas	46
4.0.1.1	Parâmetros S	46
4.0.1.2	Distribuição de Campos Eletromagnéticos	48
4.0.1.3	Validação com Ansys HFSS	48
4.0.2	Discussão dos Resultados do Circulador de 3 Portas	49
4.1	Resultados dos Circuladores de 4 Portas	51
4.1.1	Parâmetros S	51
4.1.2	Distribuição de Campos Eletromagnéticos	52
4.1.3	Discussão dos Resultados do Circulador de 4 Portas	53
4.2	Resultados do Circulador de 6 Portas	53
4.2.1	Parâmetros S	53
4.2.2	Distribuição de Campos Eletromagnéticos	54
4.2.3	Discussão dos Resultados do Circulador de 6 Portas	55
4.3	Comparação dos Resultados	56
4.3.1	Análise Comparativa	56
4.3.2	Impacto das Propriedades dos Ferrites	57
4.3.3	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Projeto	58
4.4	Discussão Geral	58
4.5	Considerações Finais do Capítulo	59
5	Conclusão	61
5.1	Trabalhos futuros e Perspectivas	61
	Referências	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Relevância do Tema

Nas últimas décadas, a evolução tecnológica tem impulsionado transformações significativas no setor automotivo, com destaque para o desenvolvimento de veículos autônomos e Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS, do inglês *Advanced Driver Assistance Systems*) (WENGER, 2005). Tais sistemas, como demonstrado na Figura X, compreendem uma gama de funcionalidades voltadas para a segurança ativa e passiva, bem como para o conforto do condutor. A figura ilustra exemplos práticos desses sistemas, incluindo o controle de cruzeiro adaptativo, assistente de estacionamento, alerta de tráfego cruzado, avisos de pré-colisão e detecção de ponto cego, que são cada vez mais comuns nos veículos modernos.

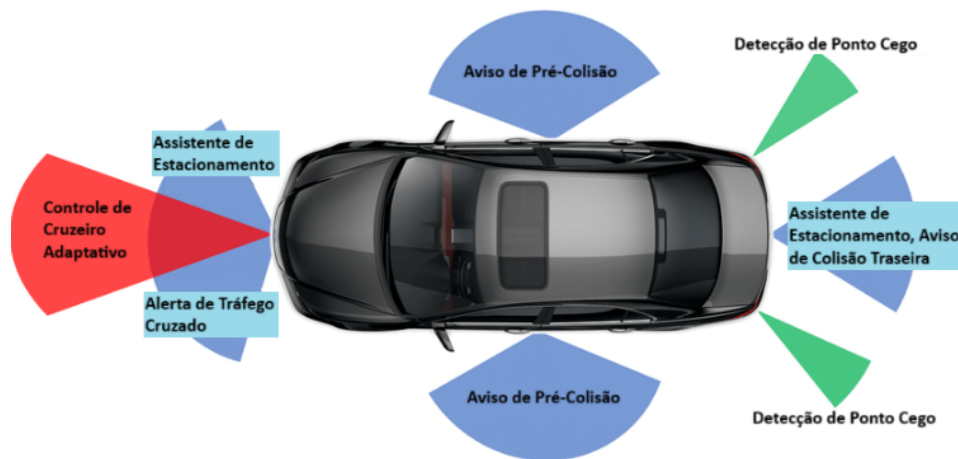


Figura 1 – Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) para funcionalidade de segurança ativa/passiva e conforto nos veículos atuais. (Fonte: Adaptado de (CHIPPENGO, 2018))

Para entender o funcionamento desses sistemas, é fundamental introduzir o conceito de espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético (Figura 2) abrange uma vasta gama de frequências de radiação, desde as ondas de rádio de baixa frequência até os raios gama de alta frequência. Cada faixa do espectro possui características e aplicações distintas.

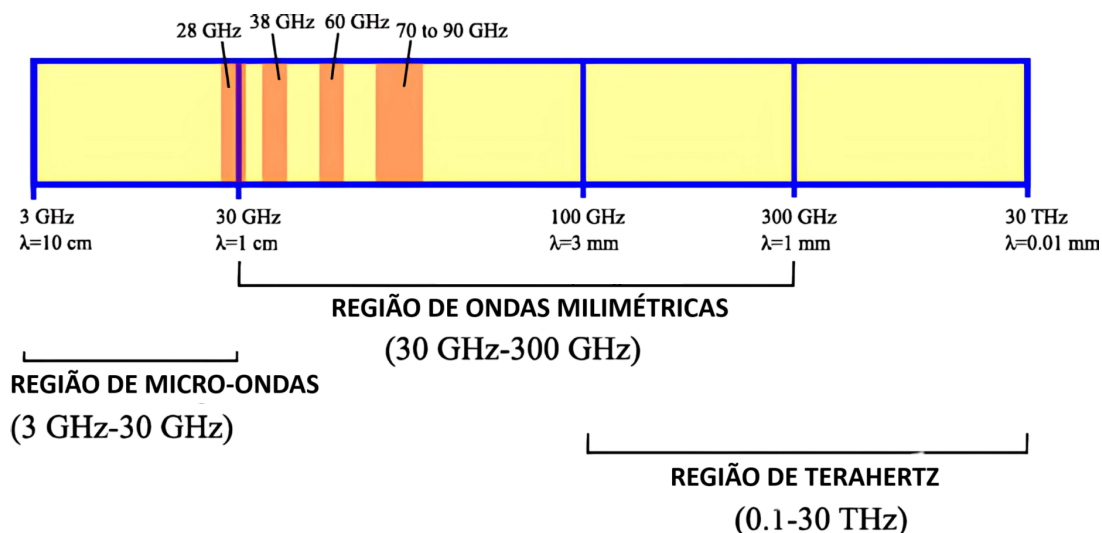


Figura 2 – Espectro eletromagnético, com destaque para a faixa de ondas milimétricas (30 GHz - 300 GHz). (Fonte: Adaptado de (LAWRENCE et al., 2017))

Dentro deste espectro, a faixa de ondas milimétricas, que se estende de 30 GHz a 300 GHz, tem-se mostrado particularmente promissora para aplicações automotivas e de comunicação (BACHA; BELLILI; GHARSALLAH, 2023; RAPPAPORT et al., 2013). As ondas milimétricas são assim chamadas devido aos seus comprimentos de onda variarem de 1 a 10 milímetros. Especificamente, a faixa de 76 a 81 GHz consolidou-se como padrão global para radares automotivos devido a um balanço otimizado entre resolução espacial, tamanho de antena e atenuação atmosférica (HASCH et al., 2012; STOLLE; SCHITTENHELM; WENGER, 2001). Comprimentos de onda menores permitem uma melhor resolução, possibilitando a detecção precisa de objetos próximos. Além disso, frequências mais altas permitem o uso de antenas menores, facilitando a integração em veículos. Embora a atenuação atmosférica seja um fator a ser considerado, a faixa de 76-81 GHz oferece um bom compromisso para aplicações de curto alcance, como as encontradas em sistemas ADAS (CHAMPION; REMSKI, 2008; PULLIAINEN; HALLIKAINEN; TAKALA, 2011).

Componentes centrais desses sistemas, os radares automotivos baseados em ondas milimétricas, emergem como ferramentas indispensáveis para a segurança veicular, operando na detecção de obstáculos, previsão de colisões e monitoramento do entorno dos veículos em tempo real, garantindo maior segurança, eficiência e conforto na condução (WENGER, 2005). Em aplicações espaciais, onde as restrições de tamanho e peso são ainda mais rigorosas, a busca por componentes de micro-ondas eficientes e compactos, como circuladores de guia de onda auto-polarizados, é de suma importância (ROUÉ et al., 2023).

No cerne das arquiteturas de radar automotivo, encontram-se os dispositivos não recíprocos, como os circuladores. Os circuladores, em particular, são *componentes não recíprocos fundamentais* nessas arquiteturas, pois permitem o compartilhamento da antena entre transmissor e receptor (operações TX e RX) (SKOLNIK, 2008). Essa funcionalidade não apenas reduz o

tamanho, o custo e a complexidade do sistema, mas também torna os circuladores componentes estratégicos em sistemas modernos de radar. Contudo, o desenvolvimento de circuladores otimizados para frequências de ondas milimétricas apresenta desafios significativos, particularmente relacionados ao *design*, aos materiais e à conformidade regulatória.

1.2 Motivação

A crescente demanda por veículos mais seguros, eficientes e autônomos, impulsiona a adoção de sistemas de radar automotivo como uma tecnologia central nos ADAS (WENGER, 2005). Projetados para operar em cenários complexos e sob condições climáticas adversas, esses sistemas dependem fundamentalmente da confiabilidade e precisão dos sensores (HASCH et al., 2012).

Nesse contexto, os radares de ondas milimétricas, que operam na faixa de 76–81 GHz, destacam-se por oferecer alta resolução espacial, baixo impacto de interferências externas e robustez em ambientes adversos (BACHA; BELLILI; GHARSALLAH, 2023). A implementação dessa tecnologia, entretanto, enfrenta desafios relacionados à miniaturização, eficiência e conformidade com regulamentações internacionais (Federal Communications Commission, 2023; European Telecommunications Standards Institute, 2017). Os circuladores não recíprocos, portanto, surgem como componentes essenciais, possibilitando o uso de uma única antena para transmissão e recepção, o que contribui para a redução do custo e da complexidade dos sistemas (SKOLNIK, 2008). A motivação deste trabalho reside na necessidade premente de superar os desafios técnicos e científicos associados ao desenvolvimento de circuladores para frequências milimétricas. Especificamente, busca-se:

- **Miniaturização e Eficiência:** Desenvolver dispositivos compactos e eficientes, cruciais para a integração de radares em plataformas automotivas modernas, onde o espaço é restrito e as demandas por desempenho são crescentes.
- **Propriedades Magnéticas de Ferrites:** Investigar de forma aprofundada as propriedades magnéticas de materiais ferrimagnéticos, como o *Strontium Hexaferrite* (SRM), especialmente a permeabilidade magnética e as perdas magnéticas em 77 GHz, visando otimizar o desempenho de dispositivos não recíprocos em frequências acima de 60 GHz.
- **Conformidade Regulatória:** Assegurar que os dispositivos projetados atendam rigorosamente às regulamentações da FCC e ETSI, estabelecendo um equilíbrio entre inovação tecnológica e viabilidade prática (Federal Communications Commission, 2023; European Telecommunications Standards Institute, 2017; European Telecommunications Standards Institute, 2018).

Adicionalmente, a presente pesquisa almeja contribuir para o avanço das tecnologias de radar automotivo, com potencial para impactar positivamente áreas como telecomunicações, vigilância e, em particular, o desenvolvimento das redes de comunicação 6G, onde circuladores em ondas milimétricas podem desempenhar um papel crucial (ANDREWS et al., 2014; BOC-CARDI et al., 2014). A inovação proposta neste estudo, portanto, não se limita ao aprimoramento dos sistemas de radar automotivo, mas estende-se à promoção de avanços tecnológicos com ampla aplicabilidade, reforçando a relevância e o impacto potencial desta pesquisa no cenário tecnológico atual.

1.3 Problema de Pesquisa

O desenvolvimento e a implementação de dispositivos não recíprocos, como circuladores, para aplicações em ondas milimétricas enfrentam desafios técnicos e científicos substanciais, limitando sua viabilidade em cenários práticos (HASCH et al., 2012). Embora sejam essenciais para o funcionamento de sistemas de radar automotivo na faixa de 76–81 GHz (SKOLNIK, 2008), a operação em frequências tão elevadas introduz uma série de problemas que precisam ser resolvidos para alcançar o desempenho almejado.

Os principais desafios podem ser sintetizados nas seguintes questões:

- **Uniformidade de Magnetização:** Como assegurar a uniformidade de magnetização em dispositivos miniaturizados, considerando a necessidade de campos magnéticos estáticos homogêneos? Essa questão é crítica para evitar distorções nos parâmetros da matriz S , como isolamento (S_{31}) e perda de inserção (S_{21}).
- **Configurações Multi-Porta:** De que forma expandir a funcionalidade de circuladores para configurações de múltiplas portas (como 4 ou 6 portas) sem comprometer o isolamento e a perda de inserção? Essa expansão é essencial para aplicações mais complexas, como redes de antenas *phased-array*.
- **Conformidade com Normas Regulatórias:** Quais são as implicações práticas de atender às regulamentações rigorosas da FCC e ETSI, especialmente em relação às máscaras de emissão e potência irradiada? Como projetar dispositivos que sejam simultaneamente eficientes e conformes às normas? (Federal Communications Commission, 2023; European Telecommunications Standards Institute, 2017; European Telecommunications Standards Institute, 2018)
- **Integração e Miniaturização:** Como integrar circuladores não recíprocos em sistemas compactos, atendendo às demandas de miniaturização exigidas pelos radares automotivos modernos, mantendo alta eficiência e robustez?

Essas questões revelam que o problema de pesquisa possui múltiplas dimensões, abrangendo áreas de materiais, *design* de dispositivos e regulamentação. A eficiência dos metais ferromagnéticos em frequências elevadas está diretamente relacionada ao desempenho dos circuladores, enquanto a conformidade regulatória e a miniaturização determinam sua viabilidade em aplicações práticas. A resolução desses problemas é crucial não apenas para habilitar sistemas mais eficientes e compactos, mas também para impulsionar o avanço de tecnologias em setores como telecomunicações, segurança e redes de comunicação 6G (BACHA; BELLILI; GHARSALLAH, 2023; RAPPAPORT et al., 2013). Pesquisas recentes, como a de Roué et al. (2023) em circuladores de guia de onda para banda E, buscam soluções para minimizar perdas e miniaturizar dispositivos (ROUÉ et al., 2023).

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo central o desenvolvimento, a modelagem e a análise de circuladores não recíprocos em microfita de cobre com ferrite do tipo *Strontium Hexaferrite* (SRM), otimizados para operação na faixa de 76–81 GHz. Para atingir esse propósito, são definidos objetivos específicos que abordam os aspectos teóricos, computacionais e regulatórios desse problema.

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver e analisar, por meio de simulações computacionais, circuladores não recíprocos compactos e eficientes para aplicações automotivas na faixa de 76–81 GHz, considerando as propriedades dos materiais ferríticos, desafios de miniaturização e conformidade com normas regulatórias.

1.4.2 Objetivos Específicos

- **Investigar profundamente as propriedades do ferrite:** Analisar as características magnéticas e elétricas da hexaferrita de estrôncio em altas frequências. O foco será compreender como o material interage com campos eletromagnéticos, buscando minimizar perdas de energia e assegurar uma resposta magnética uniforme.
- **Desenvolver e validar circuladores de três portas:** Projetar modelos de circuladores com três conexões, numa configuração em Y, utilizando materiais que apresentem baixa perda de sinal. O desempenho destes protótipos será avaliado com o auxílio de ferramentas de simulação computacional reconhecidas, como o CST Studio Suite e o Ansys HFSS.
- **Explorar configurações com múltiplas portas:** Expandir o estudo para o design de circuladores com quatro e seis conexões. A intenção é entender como essas diferentes arquiteturas influenciam o comportamento do dispositivo, especialmente em relação à

eficiência da transmissão do sinal, ao isolamento entre as portas e à minimização de reflexões de sinal.

- **Otimizar o projeto por meio de simulações computacionais:** Realizar simulações detalhadas para validar os modelos propostos. Ajustar as características magnéticas dos materiais, as dimensões físicas dos componentes e os parâmetros de operação para maximizar a eficiência e o desempenho geral dos circuladores.

1.5 Justificativa

O uso de frequências milimétricas, particularmente na faixa de 76–81 GHz, consolidou-se como uma solução tecnológica de ponta para sistemas de radar automotivo e redes de comunicação de alta frequência (HASCH et al., 2012). No entanto, a implementação de circuladores eficientes para essa faixa enfrenta desafios críticos, como a miniaturização de dispositivos, a eficiência em altas frequências e a compatibilidade com sistemas modernos, incluindo a integração com tecnologias emergentes, como redes 6G (ANDREWS et al., 2014; BOCCARDI et al., 2014). Em linha com pesquisas recentes, como o desenvolvimento de circuladores de guia de onda auto-polarizados para banda E (ROUÉ et al., 2023), esta dissertação contribui para o avanço no estado da arte de dispositivos de micro-ondas para aplicações de alta frequência.

As regulamentações internacionais estabelecidas pela *Federal Communications Commission* (FCC) nos Estados Unidos e pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) na Europa impõem requisitos rigorosos para dispositivos operando na faixa de 76–81 GHz (Federal Communications Commission, 2023; European Telecommunications Standards Institute, 2017; European Telecommunications Standards Institute, 2018). Essas diretrizes incluem limites de potência irradiada, máscaras de emissão, operação estável em condições extremas e compatibilidade eletromagnética (EMC) para coexistência com outras tecnologias. Este trabalho contribui diretamente para a conformidade com essas normas, ao investigar soluções que conciliem alta eficiência e segurança.

A pesquisa em dispositivos não recíprocos para frequências milimétricas tem o potencial de gerar impactos econômicos e sociais significativos. Sistemas de radar mais precisos podem contribuir para a redução de acidentes de trânsito, promovendo maior segurança para motoristas, pedestres e ciclistas. Além disso, dispositivos miniaturizados e eficientes podem reduzir os custos de produção e ampliar o acesso a veículos com sistemas avançados de assistência ao motorista, promovendo maior acessibilidade tecnológica. A utilização de materiais otimizados e técnicas de fabricação avançadas também contribui para uma produção mais sustentável e ambientalmente responsável.

O desenvolvimento de dispositivos não recíprocos em frequências milimétricas é essencial para atender às crescentes demandas tecnológicas nos setores automotivo, de telecomunicações e de segurança (BACHA; BELLILI; GHARSALLAH, 2023; RAPPAPORT et al., 2013).

Este trabalho justifica-se por três aspectos fundamentais: avanço tecnológico, conformidade regulatória e impacto socioeconômico.

1.6 Estrutura do Documento

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O presente capítulo introdutório contextualiza o tema, destacando a relevância das tecnologias de radar automotivo em ondas milimétricas e os desafios associados ao desenvolvimento de circuladores não recíprocos. Inclui a motivação, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa que fundamentam este trabalho. O Capítulo 2 explora a fundamentação teórica, abordando os conceitos centrais relacionados às ondas milimétricas, materiais ferríticos (como o *Strontium Hexaferrite* - SRM), a teoria e aplicação de circuladores em sistemas de radar automotivo, e as regulamentações internacionais estabelecidas por entidades como FCC e ETSI. O Capítulo 3 detalha a abordagem metodológica adotada para a modelagem e simulação dos circuladores, descrevendo as ferramentas computacionais empregadas (CST Studio Suite e Ansys HFSS), a modelagem geométrica e eletromagnética dos dispositivos, a configuração das simulações, a modelagem das propriedades do ferrite SRM em altas frequências, e o processo de análise de desempenho, com foco em parâmetros da matriz S , perdas e isolamento. O Capítulo 4 apresenta e analisa os resultados obtidos a partir das simulações, incluindo a avaliação da matriz S para diferentes configurações de circuladores (3, 4 e 6 portas), a comparação entre os resultados do CST e HFSS, o impacto de variações geométricas e de materiais nos parâmetros de desempenho, e a comparação entre resultados simulados e exigências regulatórias. Discussões aprofundadas são conduzidas para interpretar os achados e sugerir melhorias no projeto. Finalmente, o Capítulo 5 sintetiza as principais contribuições deste trabalho, discute suas limitações e sugere direções para pesquisas futuras, destacando a aplicabilidade dos resultados em sistemas automotivos e outras áreas emergentes, a necessidade de investigações experimentais complementares e potenciais avanços na integração de dispositivos não recíprocos em tecnologias 6G e IoT.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Os circuladores não recíprocos desempenham um papel crucial em sistemas de radar automotivo, particularmente na faixa de ondas milimétricas de 76 a 81 GHz, que é o foco deste trabalho. O desenvolvimento de circuladores eficientes e compactos para essa faixa de frequência exige um profundo conhecimento dos fenômenos eletromagnéticos em materiais ferrimagnéticos, bem como das técnicas de modelagem e simulação desses dispositivos.

A base para a análise de circuladores reside na teoria eletromagnética clássica, governada pelas equações de Maxwell (BALANIS, 2012; JACKSON, 1999; POZAR, 2011). Essas equações, juntamente com as relações constitutivas apropriadas para os materiais ferrimagnéticos, permitem descrever a propagação de ondas eletromagnéticas em circuladores e entender o mecanismo fundamental da não reciprocidade. Um conceito central neste contexto é o tensor de permeabilidade de Polder, que quantifica a anisotropia magnética induzida em um ferrite por um campo magnético estático externo (LAX; BUTTON, 1962; SOOHOO, 1960; HELSZAJN, 2008).

Este capítulo abordará os seguintes tópicos, em ordem crescente de complexidade e especificidade:

1. **Fundamentos do Eletromagnetismo:** Uma revisão concisa das equações de Maxwell, tanto na forma diferencial quanto na integral, enfatizando sua interpretação física e sua relevância para a análise de circuladores. As relações constitutivas para meios lineares, isotrópicos e homogêneos serão apresentadas, preparando o terreno para a discussão dos materiais ferrimagnéticos.
2. **Materiais Ferrimagnéticos e o Tensor de Polder:** Uma introdução aos materiais ferrimagnéticos, com foco nos ferrites, e uma apresentação detalhada do tensor de Polder, incluindo suas componentes, suas equações (para o caso ideal e com perdas) e sua interpretação física. A conexão entre o tensor de Polder e a não reciprocidade será explicitada.
3. **Princípio de Funcionamento de Circuladores:** Uma explicação detalhada do mecanismo de operação de circuladores de junção, com ênfase no efeito Faraday e na interação entre as ondas eletromagnéticas e o ferrite magnetizado. Diagramas ilustrativos serão incluídos para facilitar a compreensão.
4. **Modelagem Matemática:** Uma introdução à matriz de espalhamento (matriz S) como ferramenta para a caracterização de circuladores. Os parâmetros de desempenho mais

importantes (perda de inserção, isolamento, perda de retorno e VSWR) serão definidos e relacionados aos elementos da matriz S .

5. **Propriedades dos Materiais Ferrimagnéticos:** Uma discussão aprofundada das propriedades dos ferrites que são relevantes para o projeto de circuladores, incluindo:
 - Estrutura cristalina (espinélios e hexagonais).
 - Histerese magnética (magnetização de saturação, magnetização remanente, campo coercivo) e sua modelagem.
 - Mecanismos de perda (perdas por histerese, correntes de Foucault, ressonância ferrimagnética).
 - Técnicas de dopagem para otimizar as propriedades dos ferrites.
 - O Strontium Hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ –SRM) como material de escolha para aplicações em 77 GHz.
6. **Desafios e Tendências:** Uma breve visão geral dos desafios atuais e das tendências futuras no desenvolvimento de circuladores de ondas milimétricas, incluindo miniaturização, largura de banda, perdas, integração e conformidade com normas regulatórias.

2.2 Fundamentos do Eletromagnetismo: Equações de Maxwell e Materiais Ferrimagnéticos

A teoria eletromagnética clássica, fundamentada nas equações de Maxwell, é essencial para descrever a propagação de ondas eletromagnéticas em qualquer meio, incluindo os materiais ferrimagnéticos utilizados em circuladores (LINKHART, 2014). Essas equações relacionam os campos elétricos e magnéticos com suas fontes (cargas e correntes) e descrevem como esses campos variam no tempo e no espaço (BALANIS, 2012), (POZAR, 2011), (COLLIN, 1992).

2.2.1 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell podem ser formuladas de duas maneiras equivalentes: a forma *diferencial* e a forma *integral*. A forma diferencial é útil para analisar o comportamento dos campos em um ponto específico do espaço, enquanto a forma integral é mais conveniente para problemas com simetria e para visualizar os fluxos e circulações dos campos.

Forma Diferencial:

Na forma diferencial, as equações de Maxwell são expressas como (LINKHART, 2014), (BALANIS, 2012), (POZAR, 2011):

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{Lei de Gauss para a eletricidade}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo}) \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday da indução}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère-Maxwell}) \quad (2.4)$$

onde:

- **E**: Vetor campo elétrico (V/m). Representa a força por unidade de carga que uma carga elétrica de teste experimentaria em um determinado ponto se estivesse presente.
- **B**: Vetor indução magnética (ou densidade de fluxo magnético) (T –Tesla). Representa a força que uma carga elétrica de teste em movimento experimentaria em um determinado ponto se estivesse presente.
- **H**: Vetor campo magnético (A/m). Relacionado a **B** pelas propriedades magnéticas do meio. Em vácuo, $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$.
- **D**: Vetor deslocamento elétrico (C/m² –Coulombs por metro quadrado). Relacionado a **E** pelas propriedades elétricas do meio. Em vácuo, $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$.
- ρ : Densidade volumétrica de carga livre (C/m³). Representa a quantidade de carga elétrica livre (não ligada a átomos ou moléculas) por unidade de volume.
- **J**: Vetor densidade de corrente elétrica (A/m²). Representa o fluxo de carga elétrica livre por unidade de área.
- ε : Permissividade elétrica do meio (F/m –Farads por metro). Descreve a capacidade do meio de armazenar energia em um campo elétrico.
- t : Tempo (s).
- $\nabla \cdot$: Operador divergente. Para um campo vetorial **F**, $\nabla \cdot \mathbf{F}$ representa a "fonte" ou "sumidouro" do campo naquele ponto. Um valor positivo indica uma fonte (o campo "diverge" do ponto), um valor negativo indica um sumidouro (o campo "converge" para o ponto), e zero indica que não há fonte nem sumidouro.
- $\nabla \times$: Operador rotacional. Para um campo vetorial **F**, $\nabla \times \mathbf{F}$ representa a "circulação" do campo ao redor de um ponto. A direção do vetor resultante indica o eixo em torno do qual a circulação é máxima, e a magnitude indica a intensidade da circulação.

Interpretação das Equações (Forma Diferencial):

- **Lei de Gauss para a Eletricidade (Eq. 2.1):** A divergência do campo elétrico ($\nabla \cdot \mathbf{E}$) em um ponto é *diretamente proporcional* à densidade de carga elétrica *livre* (ρ) naquele ponto. Uma carga positiva atua como uma "fonte" de campo elétrico (linhas de campo divergem da carga), enquanto uma carga negativa atua como um "sumidouro" (linhas de campo convergem para a carga).
- **Lei de Gauss para o Magnetismo (Eq. 2.2):** A divergência do campo magnético ($\nabla \cdot \mathbf{B}$) é *sempre zero*. Isso significa que não existem monopolos magnéticos (cargas magnéticas isoladas, análogas a cargas elétricas positivas ou negativas). As linhas de campo magnético são sempre fechadas, não tendo começo nem fim.
- **Lei de Faraday da Indução (Eq. 2.3):** O rotacional do campo elétrico ($\nabla \times \mathbf{E}$) é igual à taxa de variação temporal (negativa) do campo magnético ($-\partial \mathbf{B} / \partial t$). Um campo magnético *variável no tempo* induz um campo elétrico *circulante*. A direção do campo elétrico induzido é tal que se opõe à variação do campo magnético (Lei de Lenz).
- **Lei de Ampère-Maxwell (Eq. 2.4):** O rotacional do campo magnético ($\nabla \times \mathbf{H}$) é igual à soma da densidade de corrente elétrica *livre* (\mathbf{J}) com a taxa de variação temporal do deslocamento elétrico ($\partial \mathbf{D} / \partial t$). Um campo magnético *circulante* pode ser gerado tanto por correntes elétricas *livres* quanto por campos elétricos *variáveis no tempo*. O termo $\partial \mathbf{D} / \partial t$ é chamado de *corrente de deslocamento* e é essencial para a propagação de ondas eletromagnéticas.

Forma Integral:

As equações de Maxwell também podem ser expressas em sua forma integral, que é muitas vezes mais intuitiva para visualizar os fluxos e circulações dos campos e para aplicar a problemas com simetria (BALANIS, 2012), (LINKHART, 2014), (POZAR, 2011):

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss para a eletricidade}) \quad (2.5)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo}) \quad (2.6)$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{Lei de Faraday da indução}) \quad (2.7)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{Lei de Ampère-Maxwell}) \quad (2.8)$$

onde:

- S representa uma superfície fechada arbitrária.
- C representa um contorno fechado arbitrário.

- $d\mathbf{S}$ é um vetor infinitesimal de área, com direção perpendicular à superfície e apontando para *fora* da superfície fechada.
- $d\mathbf{l}$ é um vetor infinitesimal de comprimento ao longo do contorno, com direção tangente ao contorno.
- Q_{int} é a carga elétrica total *contida* dentro da superfície fechada S .
- I_{enc} é a corrente elétrica total que *atravessa* a superfície *aberta* delimitada pelo contorno fechado C . A direção da corrente é definida pela regra da mão direita (se os dedos da mão direita apontam na direção do contorno, o polegar aponta na direção da corrente positiva).
- ϵ_0 é a permissividade do vácuo (8.854×10^{12} F/m).
- \oint_S representa uma integral de superfície sobre a superfície fechada S .
- \oint_C representa uma integral de linha (circulação) ao longo do contorno fechado C .
- $\frac{d}{dt}$ representa a derivada em relação ao tempo.
- \int_S representa uma integral de superfície sobre uma superfície *aberta* delimitada pelo contorno C .

Interpretação das Equações (Forma Integral):

- **Lei de Gauss (Elétrica) (Eq. 2.5):** O *fluxo* total do campo elétrico através de uma superfície fechada é *diretamente proporcional* à carga elétrica total *contida* dentro dessa superfície. O fluxo elétrico é uma medida de quantas linhas de campo elétrico atravessam a superfície.
- **Lei de Gauss (Magnética) (Eq. 2.6):** O *fluxo* total do campo magnético através de *qualquer* superfície fechada é *sempre zero*. Isso significa que as linhas de campo magnético são sempre fechadas, não tendo começo nem fim.
- **Lei de Faraday (Eq. 2.7):** A *circulação* do campo elétrico ao longo de um contorno fechado é igual à taxa de variação temporal (com sinal negativo) do *fluxo* do campo magnético através da superfície *aberta* delimitada por esse contorno. A circulação do campo elétrico é uma medida da "força eletromotriz" induzida ao longo do contorno.
- **Lei de Ampère-Maxwell (Eq. 2.8):** A *circulação* do campo magnético ao longo de um contorno fechado é igual à soma da corrente elétrica que atravessa a superfície *aberta* delimitada pelo contorno com a taxa de variação temporal do *fluxo* do deslocamento elétrico através dessa mesma superfície.

2.2.2 Relações Constitutivas

As equações de Maxwell precisam ser complementadas pelas *relações constitutivas*, que descrevem como os materiais respondem aos campos eletromagnéticos. Essas relações ligam os campos \mathbf{D} e \mathbf{B} aos campos \mathbf{E} e \mathbf{H} , e dependem das propriedades intrínsecas de cada material (LINKHART, 2014).

Para meios linearmente isotrópicos e homogêneos, as relações constitutivas assumem uma forma simples (LINKHART, 2014), (BALANIS, 2012), (POZAR, 2011):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (2.10)$$

onde:

- ε : Permissividade elétrica do meio (F/m).
- ε_0 : Permissividade do vácuo (8.854×10^{12} F/m).
- ε_r : Permissividade relativa do meio (adimensional).
- μ : Permeabilidade magnética do meio (H/m).
- μ_0 : Permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m). *Aqui, o símbolo π representa o número pi (3.14159...), e não deve ser confundido com uma variável.*
- μ_r : Permeabilidade relativa do meio (adimensional).

Linearidade: A permissividade e a permeabilidade *não dependem* da intensidade dos campos aplicados.

Isotropia: As propriedades do material (ε e μ) são as mesmas *em todas as direções*.

Homogeneidade: As propriedades do material (ε e μ) são as mesmas *em todos os pontos* do material.

Materiais que não satisfazem essas condições (como os ferrites sob polarização magnética) exigem relações constitutivas mais complexas.

2.2.3 Materiais Ferrimagnéticos e o Tensor de Polder

Os materiais ferrimagnéticos, como os ferrites utilizados em circuladores, apresentam um comportamento magnético complexo que não pode ser descrito pelas relações constitutivas simples apresentadas na seção anterior (Equações 2.9 e 2.10). A principal diferença reside na

anisotropia magnética que esses materiais exibem quando submetidos a um campo magnético estático externo, denotado por \mathbf{H}_0 (LINKHART, 2014).

Em um material isotrópico, a permeabilidade magnética é um escalar (μ), e os vetores \mathbf{B} (indução magnética) e \mathbf{H} (campo magnético) são paralelos. Em um material anisotrópico, a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} é mais complexa, e esses vetores, em geral, *não* são paralelos. A anisotropia significa que a resposta do material a um campo magnético aplicado depende da *direção* do campo em relação a eixos preferenciais dentro do material.

No caso dos ferrites, a aplicação de um campo magnético estático \mathbf{H}_0 (geralmente chamado de campo de polarização ou "bias") alinha, ainda que parcialmente, os momentos magnéticos atômicos (ou iônicos) presentes no material. Esse alinhamento cria uma direção preferencial (o eixo de magnetização), e a permeabilidade magnética do ferrite passa a depender da direção do campo magnético de RF em relação a esse eixo.

Para descrever matematicamente essa anisotropia, a permeabilidade magnética, μ , que é um escalar em materiais isotrópicos, é substituída por um *tensor* em materiais ferrimagnéticos. Este tensor é conhecido como *tensor de permeabilidade de Polder*, representado por $\boldsymbol{\mu}$ (LINKHART, 2014), (LAX; BUTTON, 1962), (SOOHOO, 1960).

O Tensor de Polder:

Se o campo magnético estático \mathbf{H}_0 é aplicado na direção z (que é a convenção usual), o tensor de Polder assume a seguinte forma (LINKHART, 2014):

$$\boldsymbol{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}$$

onde:

- μ_0 é a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
- μ , κ e μ_z são as componentes do tensor de Polder. Estas componentes são, em geral, *complexas* e dependem da frequência da onda eletromagnética (ω), da intensidade do campo magnético estático aplicado (H_0), e das propriedades intrínsecas do ferrite (magnetização de saturação M_s , frequência de ressonância giromagnética ω_0 , e largura de linha de ressonância ferrimagnética ΔH).

Componentes do Tensor de Polder (Caso Ideal, sem Perdas):

Para um ferrite *ideal*, isto é, sem perdas dissipativas, as componentes μ e κ do tensor de Polder são dadas pelas seguintes expressões (LINKHART, 2014), (LAX; BUTTON, 1962), (SOOHOO, 1960):

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (2.11)$$

$$\kappa = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (2.12)$$

onde:

- $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da onda eletromagnética (rad/s).
- $\omega_m = \gamma M_s$ é uma frequência característica relacionada à *magnetização de saturação* do ferrite (rad/s). M_s representa o valor máximo da magnetização que o material pode atingir quando todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados.
- $\omega_0 = \gamma H_0$ é a *frequência de ressonância giromagnética* (rad/s). Esta é a frequência natural de precessão dos momentos magnéticos dos elétrons no ferrite em torno do campo magnético estático \mathbf{H}_0 .
- γ é a *razão giromagnética* (aproximadamente 2.8 MHz/Oe ou 1.76×10^{11} rad/s por Tesla). É uma constante que relaciona a frequência de precessão com a intensidade do campo magnético e as propriedades do elétron.

A componente μ_z é geralmente considerada igual a 1 ($\mu_z = 1$) para ferrites operando na região de interesse para circuladores (abaixo ou acima da ressonância, mas não *na* ressonância).

Interpretação Física das Componentes:

- μ : Representa a componente da permeabilidade na direção *perpendicular* ao campo magnético estático \mathbf{H}_0 (ou seja, no plano xy).
- κ : Representa o *acoplamento* entre as componentes perpendiculares do campo magnético. É este termo que dá origem à *não reciprocidade* dos circuladores. No caso ideal (sem perdas), κ é um número *real*.
- μ_z : Representa a permeabilidade na direção do campo magnético estático (\mathbf{H}_0), que é a direção z .

Importância dos Termos Fora da Diagonal ($\pm j\kappa$):

Os termos fora da diagonal principal, $+j\kappa$ e $-j\kappa$, são *cruciais* para o funcionamento do circulador. Eles indicam que um campo magnético de RF aplicado em uma direção (por exemplo, na direção x) induz um campo magnético \mathbf{B} que tem componentes *tanto* em x quanto em y . Essa "mistura" das componentes do campo, causada pela anisotropia magnética do ferrite, é a *base da não reciprocidade*.

Caso com Perdas:

As equações (2.11) e (2.12) são simplificações válidas para um ferrite ideal, sem perdas. Na prática, os ferrites *sempre* apresentam perdas, que podem ser de origem magnética (relacionadas à histerese e à largura de linha de ressonância) ou dielétrica (relacionadas à condutividade finita do material).

Para modelar as perdas magnéticas, as componentes μ e κ do tensor de Polder tornam-se *complexas*:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{2.13}$$

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' \tag{2.14}$$

As partes imaginárias, μ'' e κ'' , representam as perdas. As expressões completas para μ' , μ'' , κ' e κ'' , que levam em conta a largura de linha de ressonância ferrimagnética (ΔH), são mais complexas e podem ser encontradas no livro do Linkhart (equações 1.25 a 1.28, p. 4) e em outras referências (LAX; BUTTON, 1962; SOOHOO, 1960).

Unidades (Importante!):

É *fundamental* prestar atenção às unidades ao usar as equações do tensor de Polder. O livro do Linkhart, e muitos outros textos sobre ferrites, usam um sistema misto de unidades:

- **Frequências** (ω , ω_m , ω_0): Embora sejam frequências *angulares* (rad/s), são frequentemente expressas em MHz ou GHz. Isso é feito para simplificar as equações, pois a razão giromagnética (γ) é comumente expressa em MHz/Oe.
- **Razão Giromagnética** (γ): Geralmente expressa em MHz/Oe.
- **Campo Magnético Estático** (H_0): Expresso em Oersted (Oe).
- **Magnetização de Saturação** (M_s): Frequentemente expressa em Gauss (G).

Essa mistura de unidades é conveniente, mas exige *muito cuidado* para evitar erros. Sempre verifique as unidades antes de usar as equações.

2.2.4 Conexão com o Funcionamento de Circuladores

A não reciprocidade, propriedade fundamental dos circuladores, é uma consequência direta da anisotropia magnética dos ferrites descrita pelo tensor de Polder. Para entender como essa anisotropia leva à não reciprocidade, vamos considerar a propagação de ondas eletromagnéticas em um ferrite magnetizado na direção z (direção do campo estático \mathbf{H}_0).

Propagação de Ondas em um Meio Anisotrópico:

Quando uma onda eletromagnética se propaga em um meio anisotrópico, como um ferrite magnetizado, a relação entre os vetores \mathbf{B} e \mathbf{H} não é mais simples e escalar, como em um meio isotrópico. Em vez disso, essa relação é dada pelo tensor de permeabilidade de Polder (Equação 2.2.3).

Uma consequência importante dessa anisotropia é que as ondas eletromagnéticas que se propagam no ferrite *não* podem, em geral, ser ondas planas TEM (Transversais Eletromagnéticas) com os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} mutuamente perpendiculares e à direção de propagação. Em vez disso, as ondas que se propagam de forma natural nesse meio (os *modos normais* de propagação) são ondas com *polarização circular*.

Polarização Circular:

Uma onda com polarização circular é aquela em que os vetores de campo elétrico (\mathbf{E}) e magnético (\mathbf{H}) giram em torno da direção de propagação com uma frequência angular ω . Existem dois tipos de polarização circular:

- **Polarização Circular Direita (RCP - Right Circular Polarization):** O vetor de campo elétrico gira no sentido horário (visto por um observador olhando na direção de propagação).
- **Polarização Circular Esquerda (LCP - Left Circular Polarization):** O vetor de campo elétrico gira no sentido anti-horário.

Qualquer onda linearmente polarizada pode ser decomposta em duas ondas circularmente polarizadas de mesma amplitude, mas com sentidos de rotação opostos (RCP e LCP).

O Efeito Faraday:

O efeito Faraday é a rotação do plano de polarização de uma onda *linearmente polarizada* ao se propagar através de um meio ferrimagnético sob a ação de um campo magnético estático *paralelo* à direção de propagação (LINKHART, 2014).

A explicação do efeito Faraday reside no fato de que as ondas com polarização circular direita (RCP) e esquerda (LCP) se propagam com *velocidades de fase diferentes* dentro do ferrite magnetizado. Essa diferença de velocidade é uma consequência direta do tensor de Polder.

Se calcularmos as constantes de propagação (β_+ e β_-) para as ondas RCP e LCP, respectivamente, usando as equações de Maxwell e o tensor de Polder, encontraremos que $\beta_+ \neq \beta_-$ (LINKHART, 2014). A diferença entre as constantes de propagação é proporcional a κ , o termo fora da diagonal do tensor de Polder.

Como as duas componentes circulares (RCP e LCP) de uma onda linearmente polarizada se propagam com velocidades diferentes, elas acumulam uma *diferença de fase* ($\Delta\phi$) ao longo da propagação. Essa diferença de fase é dada por:

$$\Delta\phi = (\beta_+ - \beta_-)L$$

onde L é o comprimento do caminho de propagação no ferrite.

Quando as duas componentes circulares se recombinaem na saída do ferrite, a onda resultante ainda é linearmente polarizada, mas seu plano de polarização foi *rotacionado* de um ângulo θ_F em relação ao plano de polarização original. Este ângulo de rotação é o *ângulo de Faraday* e é dado por:

$$\theta_F = \frac{1}{2}(\beta_+ - \beta_-)L = \frac{\Delta\phi}{2}$$

Não Reciprocidade:

A direção da rotação de Faraday depende do sentido do campo magnético estático aplicado (\mathbf{H}_0). Se invertermos a direção de \mathbf{H}_0 , a direção de rotação de Faraday também se inverte. *Esta é a propriedade não recíproca fundamental que é explorada em circuladores.*

Princípio de Funcionamento do Circulador (Detalhado):

Em um circulador de junção (o tipo mais comum), o ferrite (geralmente em forma de disco ou triângulo) é colocado em uma junção de três ou mais portas (linhas de transmissão). Um campo magnético estático \mathbf{H}_0 é aplicado *perpendicularmente* ao plano do ferrite (eixo z).

1. **Entrada:** Uma onda eletromagnética entrando em uma das portas (por exemplo, porta 1) excita uma combinação de modos de ressonância dentro do ferrite.
2. **Anisotropia e Modos Circulares:** Devido à anisotropia magnética do ferrite (descrita pelo tensor de Polder), esses modos de ressonância se propagam com diferentes velocidades e sofrem diferentes deslocamentos de fase. Esses modos se assemelham a ondas com polarização circular (mas não são perfeitamente circulares).
3. **Ajuste Preciso:** A geometria da junção (forma do ferrite, dimensões, posição das linhas de transmissão) e a intensidade do campo magnético estático \mathbf{H}_0 são cuidadosamente ajustadas.
4. **Interferência Construtiva e Destrutiva:** O ajuste preciso dos parâmetros faz com que:
 - A onda incidente na porta 1 sofra um deslocamento de fase que a direciona *construtivamente* para a próxima porta na direção de circulação desejada (por exemplo, porta 2).
 - Ao mesmo tempo, a onda sofra interferência *destrutiva* na direção oposta (porta 3), resultando em *isolamento* entre as portas 1 e 3.

5. **Circulação:** Uma onda entrando na porta 2 é direcionada para a porta 3, e uma onda entrando na porta 3 é direcionada para a porta 1, completando o ciclo de circulação.

Em resumo:

- O tensor de Polder, com seus termos fora da diagonal, descreve a anisotropia magnética do ferrite.
- Essa anisotropia causa diferentes velocidades de propagação para ondas com diferentes polarizações (aproximadamente circulares).
- O efeito Faraday (rotação do plano de polarização) é uma consequência dessa diferença de velocidades.
- A não reciprocidade surge porque a direção da rotação de Faraday depende do sentido do campo magnético estático.
- Em um circulator, o ajuste preciso da geometria e do campo magnético causa interferência construtiva em uma direção e destrutiva na direção oposta, direcionando o sinal de uma porta para a próxima.

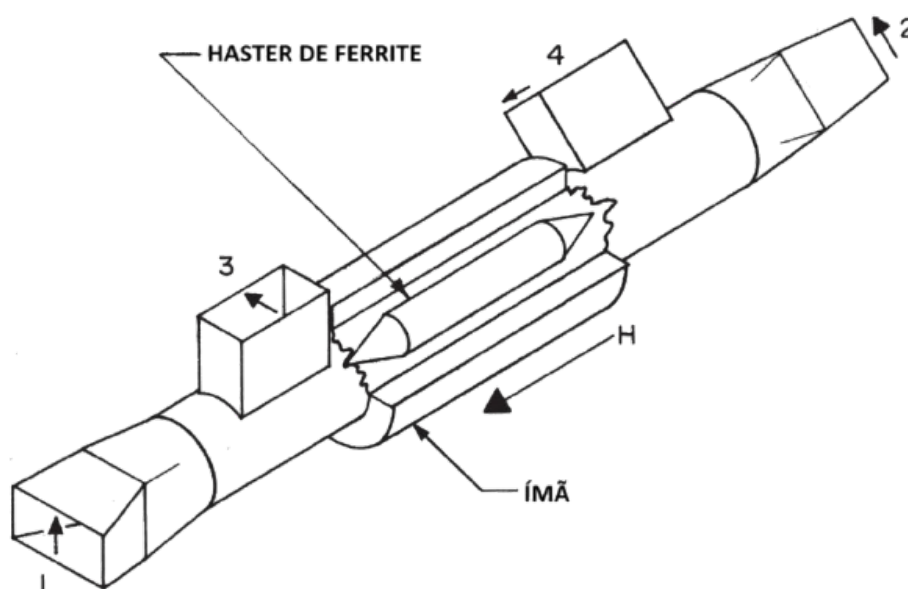


Figura 3 – Ilustração do efeito Faraday em um ferrite magnetizado, mostrando a rotação do plano de polarização da onda eletromagnética. (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))

2.3 Modelagem Matemática: Matriz de Espalhamento e Otimização

Para analisar e otimizar o desempenho de circuladores, é essencial utilizar ferramentas matemáticas que descrevam de forma precisa o comportamento do dispositivo. Uma das ferramentas mais poderosas e amplamente utilizadas é a *matriz de espalhamento*, também conhecida como *matriz S* (LINKHART, 2014; POZAR, 2011).

Matriz de Espalhamento (Matriz S):

A matriz S é uma matriz quadrada que relaciona as amplitudes e fases das ondas *incidentes* e *refletidas* em cada porta de um dispositivo de micro-ondas (como um circulador). Cada elemento da matriz S , denotado por S_{ij} , é um número complexo que representa a relação entre a onda *refletida* na porta i e a onda *incidente* na porta j .

- S_{ii} : Coeficiente de reflexão da porta i . Representa a fração da onda incidente na porta i que é refletida de volta para a mesma porta.
- S_{ij} (com $i \neq j$): Coeficiente de transmissão da porta j para a porta i . Representa a fração da onda incidente na porta j que é transmitida para a porta i .

Circulador Ideal de Três Portas:

Para um circulador ideal de *três portas*, a matriz S é dada por (LINKHART, 2014):

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{-j\phi} \\ e^{-j\phi} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j\phi} & 0 \end{bmatrix},$$

onde ϕ é o deslocamento de fase introduzido pelo circulador.

Interpretação da Matriz S Ideal:

- **Diagonal Principal:** Os elementos da diagonal principal (S_{11} , S_{22} , S_{33}) são todos *zero*. Isso significa que, em um circulador ideal, *não há reflexão* de sinal em nenhuma das portas. Toda a potência incidente em uma porta é transmitida para outra porta.
- **Termos Fora da Diagonal:** Os elementos fora da diagonal principal representam a *transmissão* entre as portas.
 - $|S_{21}| = |S_{32}| = |S_{13}| = 1$: A magnitude dos termos de transmissão na direção de circulação ($1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$) é *unitária*. Isso significa que toda a potência incidente em uma porta é transmitida para a próxima porta na direção de circulação.

- $|S_{12}| = |S_{23}| = |S_{31}| = 0$: A magnitude dos termos de transmissão na direção *oposta* à circulação ($2 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3$) é *zero*. Isso significa que não há transmissão de potência na direção oposta à circulação (isolamento perfeito).
- $e^{-j\phi}$: O termo de fase indica que o sinal sofre um deslocamento de fase ao passar de uma porta para a outra. Para um circulador de três portas, o valor ideal de ϕ é $2\pi/3$ radianos (120 graus) ou $4\pi/3$ radianos (240 graus), dependendo do sentido de circulação desejado (LINKHART, 2014).

Circuladores Reais:

Na prática, os circuladores *não* são ideais. Eles apresentam *perdas* (dissipação de energia) e *reflexões* (parte da energia incidente é refletida de volta). Portanto, a matriz S de um circulador real difere da matriz ideal:

- **Perda de Inserção:** Os termos de transmissão na direção de circulação (S_{21}, S_{32}, S_{13}) terão magnitudes *menores* que 1 (embora próximas de 1 para um bom circulador). A perda de inserção (em dB) é dada por:

$$IL_{ij} = -20 \log_{10} |S_{ji}|$$

- **Isolamento:** Os termos de transmissão na direção oposta à circulação (S_{12}, S_{23}, S_{31}) terão magnitudes *maiores* que 0 (embora pequenas para um bom circulador). O isolamento (em dB) é dado por:

$$ISO_{ij} = -20 \log_{10} |S_{ij}|$$

- **Perda de Retorno:** Os elementos da diagonal principal (S_{11}, S_{22}, S_{33}) terão magnitudes *maiores* que 0. A perda de retorno (em dB) é dada por:

$$RL_{ii} = -20 \log_{10} |S_{ii}|$$

Uma boa perda de retorno indica que a maior parte da potência incidente é transmitida, e não refletida.

Otimização do Design:

O objetivo do projeto de um circulador é *minimizar* a perda de inserção e *maximizar* o isolamento e a perda de retorno, dentro da faixa de frequência de operação desejada. Isso é feito ajustando-se:

1. **Geometria do Dispositivo:** Forma e dimensões do ferrite, das linhas de transmissão e da junção.

2. **Propriedades do Material Ferrimagnético:** Magnetização de saturação (M_s), largura de linha de ressonância (ΔH), permissividade (ϵ_r).
3. **Campo Magnético Estático (H_0):** Intensidade e uniformidade.

Esses ajustes são geralmente realizados de forma *iterativa*, combinando simulações computacionais (usando métodos como elementos finitos ou diferenças finitas) e medições experimentais (LINKHART, 2014).

Em resumo:

- A matriz S é uma ferramenta poderosa para caracterizar o desempenho de circuladores.
- A matriz S ideal descreve um circulador sem perdas e com isolamento perfeito.
- Circuladores reais têm perdas e reflexões, que se manifestam na matriz S.
- O projeto de um circulador visa otimizar os parâmetros da matriz S (minimizar perda de inserção, maximizar isolamento e perda de retorno).

2.4 Materiais Ferrimagnéticos: Ferrites e suas Propriedades

Como mencionado anteriormente, os circuladores de micro-ondas e ondas milimétricas utilizam materiais ferrimagnéticos, sendo os *ferrites* a classe mais comum (LINKHART, 2014). Os ferrites são materiais cerâmicos compostos principalmente de óxido de ferro (Fe_2O_3) combinado com outros óxidos metálicos (SMIT; WIJN, 1959). A combinação específica de óxidos e o processo de fabricação determinam as propriedades magnéticas e elétricas do ferrite, tornando-o adequado para aplicações em diferentes faixas de frequência e níveis de potência.

2.4.1 Estrutura Cristalina e Classificação

Os ferrites de interesse para aplicações em circuladores geralmente possuem uma estrutura cristalina cúbica do tipo *espinélio* ou uma estrutura *hexagonal* (LINKHART, 2014).

Ferrites de Espinélio:

A estrutura espinélio, nomeada a partir do mineral espinélio (MgAl_2O_4), é uma estrutura cúbica de face centrada (FCC) com uma célula unitária relativamente grande. A fórmula geral dos ferrites de espinélio é $M\text{Fe}_2\text{O}_4$, onde M representa um íon metálico divalente (com valência +2), como Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, ou uma combinação deles (LINKHART, 2014), (SMIT; WIJN, 1959).

A estrutura espinélio pode ser visualizada como um arranjo compacto de ânions de oxigênio (O^{2-}), formando interstícios (espaços vazios) com geometria tetraédrica (sítios A) e octaédrica (sítios B). Os cátions metálicos (M^{2+} e Fe^{3+}) ocupam esses interstícios. Em um espinélio *normal*, os cátions divalentes (M^{2+}) ocupam os sítios tetraédricos (A), e os cátions trivalentes (Fe^{3+}) ocupam os sítios octaédricos (B). No entanto, em ferrites, a distribuição dos cátions pode ser diferente, levando a estruturas do tipo *inverso* ou *misto* (SMIT; WIJN, 1959).

- **Espinélio Inverso:** Na estrutura inversa, metade dos íons Fe^{3+} ocupa os sítios tetraédricos (A), enquanto a outra metade dos íons Fe^{3+} e todos os íons M^{2+} ocupam os sítios octaédricos (B). A magnetita ($Fe_3O_4 = FeO \cdot Fe_2O_3$) é um exemplo de espinélio inverso.
- **Espinélio Misto:** É uma combinação das estruturas normal e inversa, com uma distribuição intermediária dos cátions entre os sítios A e B.

A distribuição dos cátions entre os sítios A e B tem um impacto significativo nas propriedades magnéticas do ferrite, como a magnetização de saturação e a anisotropia.

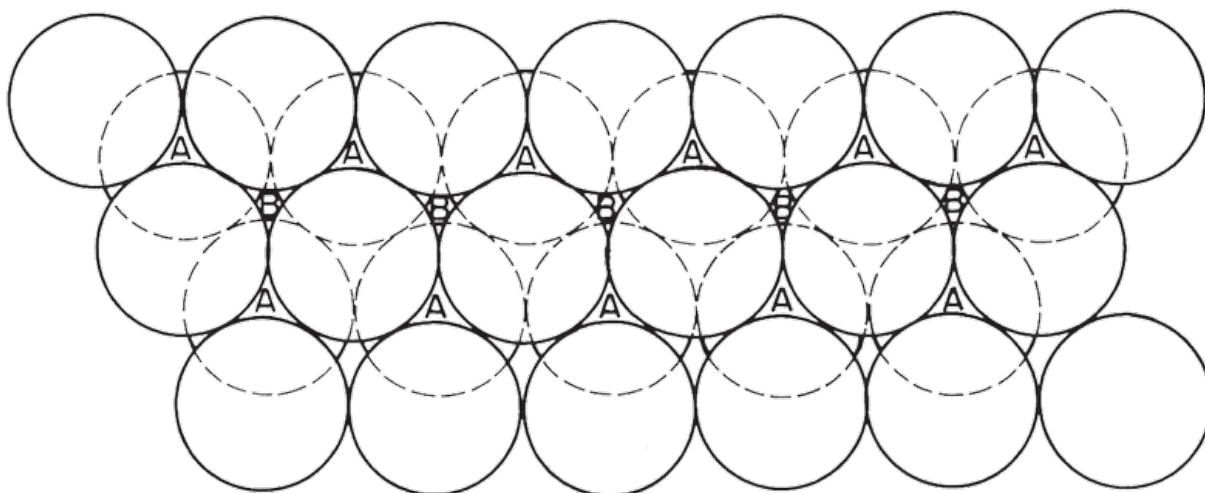


Figura 4 – Representação da estrutura cristalina do tipo espinélio, mostrando os sítios tetraédricos (A) e octaédricos (B). (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))

Ferrites Hexagonais:

Os ferrites hexagonais, também conhecidos como hexaferritas, possuem uma estrutura cristalina hexagonal mais complexa do que a estrutura espinélio. A estrutura é composta por camadas de oxigênio empilhadas, com os cátions metálicos ocupando diferentes tipos de sítios intersticiais. A fórmula geral das hexaferritas do tipo M (as mais comuns) é $AF_{12}O_{19}$, onde A é um íon divalente grande, como Ba (bário), Sr (estrôncio) ou Pb (chumbo) (LINKHART, 2014), (PULLAR, 2012).

A estrutura hexagonal pode ser vista como uma combinação de blocos com estrutura do tipo espinélio e blocos com estrutura hexagonal. Essa estrutura em camadas leva a uma forte *anisotropia magnetocristalina*, o que significa que as propriedades magnéticas do material são

significativamente diferentes dependendo da direção do campo magnético aplicado em relação aos eixos cristalográficos.

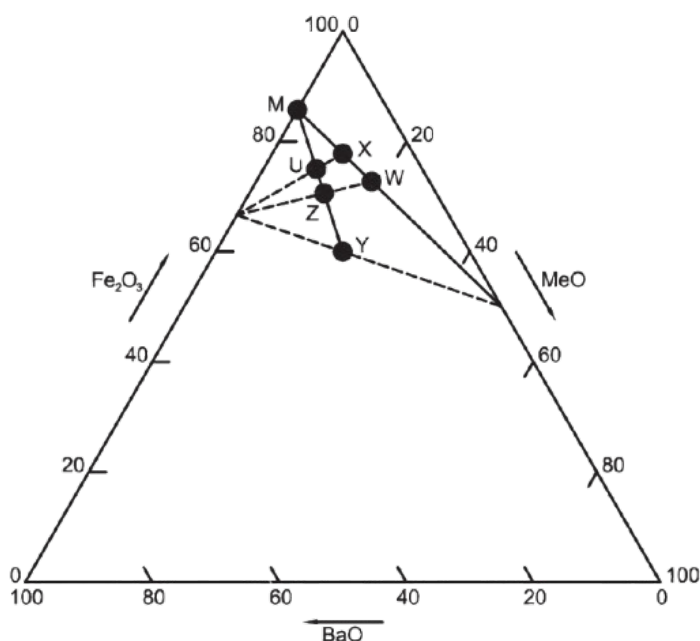


Figura 5 – Representação da estrutura cristalina de uma hexaferrita do tipo M. (Fonte: Adaptado de (LINKHART, 2014))

2.4.2 Histerese Magnética

Os materiais ferrimagnéticos, como os ferrites, exibem um comportamento magnético não linear conhecido como *histerese*. A histerese se manifesta na relação entre a magnetização (M) do material e o campo magnético aplicado (H). Essa relação não é linear e depende da *história* magnética do material (LINKHART, 2014).

Quando um campo magnético externo é aplicado a um ferrite inicialmente desmagnetizado, a magnetização do material aumenta gradualmente. Os momentos magnéticos atômicos, que inicialmente estão orientados aleatoriamente, tendem a se alinhar com o campo aplicado. À medida que a intensidade do campo aumenta, mais e mais momentos se alinham, até que a magnetização atinge um valor máximo, chamado de *magnetização de saturação* (M_s).

Se o campo magnético externo for então reduzido, a magnetização do ferrite *não* retorna ao seu valor inicial (zero) seguindo o mesmo caminho. Em vez disso, a magnetização diminui mais lentamente, e mesmo quando o campo externo é completamente removido, uma certa magnetização *permanece* no material. Essa magnetização residual é chamada de *magnetização remanente* (M_r).

Para reduzir a magnetização a zero, é necessário aplicar um campo magnético no sentido *oposto* ao campo original. A intensidade do campo magnético reverso necessária para anular a magnetização é chamada de *campo coercivo* (H_c).

Se o campo magnético reverso for aumentado ainda mais, o material será magnetizado na direção oposta, atingindo novamente a saturação. Se o campo for então reduzido e invertido novamente, o ciclo se completa, formando um *laço de histerese*.

Parâmetros do Laço de Histerese:

- **Magnetização de Saturação (M_s):** O valor máximo da magnetização que o material pode atingir quando todos os momentos magnéticos estão alinhados.
- **Magnetização Remanente (M_r):** A magnetização que permanece no material após a remoção do campo magnético externo.
- **Campo Coercivo (H_c):** O campo magnético reverso necessário para reduzir a magnetização a zero.

A forma e o tamanho do laço de histerese dependem das propriedades intrínsecas do material (composição, estrutura cristalina, tamanho de grão, etc.) e do processo de fabricação.

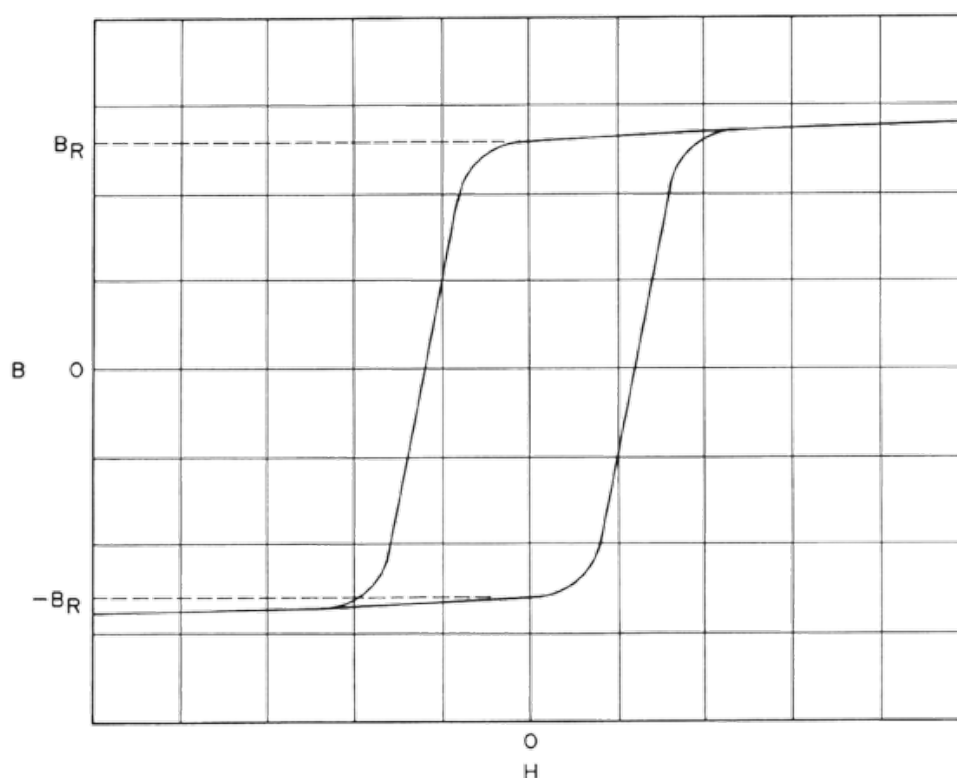


Figura 6 – Laço de histerese típico para um material ferrimagnético, mostrando a magnetização de saturação (M_s), a magnetização remanente (M_r) e o campo coercivo (H_c).

Modelagem da Histerese:

A histerese é um fenômeno complexo e não linear, e sua modelagem matemática precisa é um desafio. Vários modelos foram desenvolvidos para descrever o comportamento histerético de materiais magnéticos, incluindo:

- **Modelo de Preisach:** Um modelo fenomenológico que descreve a histerese como uma superposição de operadores histeréticos elementares (LINKHART, 2014).
- **Modelo de Jiles-Atherton:** Um modelo baseado em princípios físicos que considera a energia envolvida no movimento das paredes de domínio e na rotação da magnetização (LINKHART, 2014), (JILES; ATHERTON, 1986).
- **Modelo Estocástico de Histerese Vetorial (SVHM):** Um modelo que combina aspectos dos modelos de Preisach e Jiles-Atherton, levando em conta a natureza vetorial da magnetização e as flutuações térmicas (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

A escolha do modelo de histerese mais adequado depende da aplicação e do nível de precisão desejado.

2.4.3 Mecanismos de Perda em Ferrites

Em aplicações de micro-ondas e ondas milimétricas, as perdas nos materiais ferrimagnéticos são um fator crítico que afeta o desempenho de dispositivos como circuladores. As perdas podem ser classificadas em três categorias principais (LINKHART, 2014):

1. **Perdas por Histerese:** Associadas à energia dissipada durante um ciclo de histerese, devido à irreversibilidade do processo de magnetização.
2. **Perdas por Correntes de Foucault (Eddy Currents):** Resultantes das correntes elétricas induzidas no material pela variação temporal do campo magnético.
3. **Perdas por Ressonância Ferrimagnética:** Relacionadas à absorção de energia quando a frequência da onda eletromagnética coincide com a frequência natural de precessão dos momentos magnéticos no ferrite.

Perdas por Histerese:

As perdas por histerese são proporcionais à área do laço de histerese (ver Figura 6). A energia dissipada por unidade de volume e por ciclo é dada por:

$$P_h = \oint H dM$$

onde a integral é calculada ao longo do laço de histerese. Em baixas frequências, as perdas por histerese são geralmente o mecanismo de perda dominante. Para minimizar essas perdas, materiais com baixo campo coercivo (H_c) são desejáveis, pois isso resulta em um laço de histerese mais estreito.

Perdas por Correntes de Foucault:

As perdas por correntes de Foucault (ou correntes parasitas) são causadas pelas correntes elétricas induzidas no material pela variação temporal do campo magnético, de acordo com a Lei de Faraday. Essas correntes circulam dentro do material e dissipam energia na forma de calor devido à resistência elétrica do material.

A densidade de potência dissipada por correntes de Foucault (P_e) pode ser estimada por (LINKHART, 2014):

$$P_e \approx \frac{\sigma \omega^2 B^2 d^2}{24}$$

onde:

- σ é a condutividade elétrica do material (S/m).
- $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da onda eletromagnética (rad/s).
- B é a amplitude da indução magnética (T).
- d é uma dimensão característica do material (por exemplo, a espessura de uma lâmina ou o diâmetro de uma esfera).

Em altas frequências, as perdas por correntes de Foucault podem se tornar significativas. Para reduzir essas perdas, materiais com alta resistividade elétrica ($\rho = 1/\sigma$) são utilizados. Os ferrites, por serem materiais cerâmicos, possuem resistividade elétrica muito superior à dos metais, o que os torna vantajosos para aplicações em altas frequências.

Perdas por Ressonância Ferrimagnética:

As perdas por ressonância ferrimagnética ocorrem quando a frequência da onda eletromagnética se aproxima da frequência natural de precessão dos momentos magnéticos no ferrite (frequência de ressonância giromagnética, $\omega_0 = \gamma H_0$). Na ressonância, a absorção de energia pelo material é máxima.

A largura de linha de ressonância ferrimagnética (ΔH) é uma medida da largura da curva de ressonância, ou seja, da faixa de frequências em torno da ressonância onde as perdas são significativas. Quanto menor ΔH , mais estreita é a curva de ressonância e menores são as perdas fora da ressonância.

A perda total em um ferrite é a soma das perdas por histerese, correntes de Foucault e ressonância:

$$P_{total} = P_h + P_e + P_r$$

Em circuladores operando na faixa de 76–81 GHz, as perdas por ressonância ferrimagnética e as perdas por histerese são geralmente os mecanismos dominantes, dependendo do ponto

de operação (abaixo, acima ou na ressonância). A escolha de um material com baixo ΔH e a operação fora da região de ressonância (para circuladores) são cruciais para minimizar a perda de inserção do dispositivo.

Observações:

- As equações fornecidas são aproximações. Modelos mais precisos podem ser encontrados na literatura.
- As perdas dielétricas, embora geralmente menores que as perdas magnéticas em ferrites, também contribuem para a perda total e devem ser consideradas. A perda dielétrica é caracterizada pela tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$).

2.5 Conclusão do Capítulo 2

Este capítulo apresentou os fundamentos teóricos essenciais para o projeto e a análise de circuladores não recíprocos de ondas milimétricas. Foram abordados os conceitos de eletromagnetismo, incluindo as equações de Maxwell e as relações constitutivas, com ênfase nos materiais ferrimagnéticos e no tensor de permeabilidade de Polder. O princípio de funcionamento dos circuladores, baseado na não reciprocidade e no efeito Faraday, foi explicado em detalhes. A matriz de espalhamento (matriz S) foi introduzida como uma ferramenta fundamental para a modelagem matemática e a caracterização do desempenho de circuladores. Além disso, foram discutidas as propriedades relevantes dos materiais ferrimagnéticos, com foco no Strontium Hexaferrite (SRM) como um material promissor para aplicações na faixa de 76 a 81 GHz. Os mecanismos de perda em ferrites (histerese, correntes de Foucault e ressonância ferrimagnética) foram analisados, pois são cruciais para a otimização da perda de inserção do circulador.

A base teórica estabelecida neste capítulo será fundamental para a metodologia de projeto e simulação que será apresentada no Capítulo 3. As equações de Maxwell, o tensor de Polder e a matriz S serão utilizados para modelar o comportamento eletromagnético do circulador, enquanto as propriedades dos materiais ferrimagnéticos determinarão os parâmetros de entrada para as simulações. O entendimento dos mecanismos de perda permitirá otimizar o projeto para minimizar a dissipação de energia e maximizar a eficiência do dispositivo. O Capítulo 3 detalhará a abordagem metodológica adotada, descrevendo as ferramentas computacionais empregadas, a modelagem geométrica e eletromagnética dos circuladores, a configuração das simulações e o processo de análise de desempenho.

3 METODOLOGIA

A abordagem adotada abrange desde o design conceitual, baseado na fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2, até a simulação computacional e a validação dos projetos. Devido à indisponibilidade de recursos para fabricação e testes experimentais na instituição, a validação experimental não foi realizada. Em vez disso, a validação dos resultados foi feita por meio de simulações em dois softwares distintos (CST Microwave Studio e Ansys HFSS) e pela comparação com dados e tendências reportados na literatura para circuladores semelhantes.

A Figura 7 apresenta uma visão geral do fluxo metodológico adotado neste trabalho, destacando as principais etapas do processo de design e validação dos circuladores.

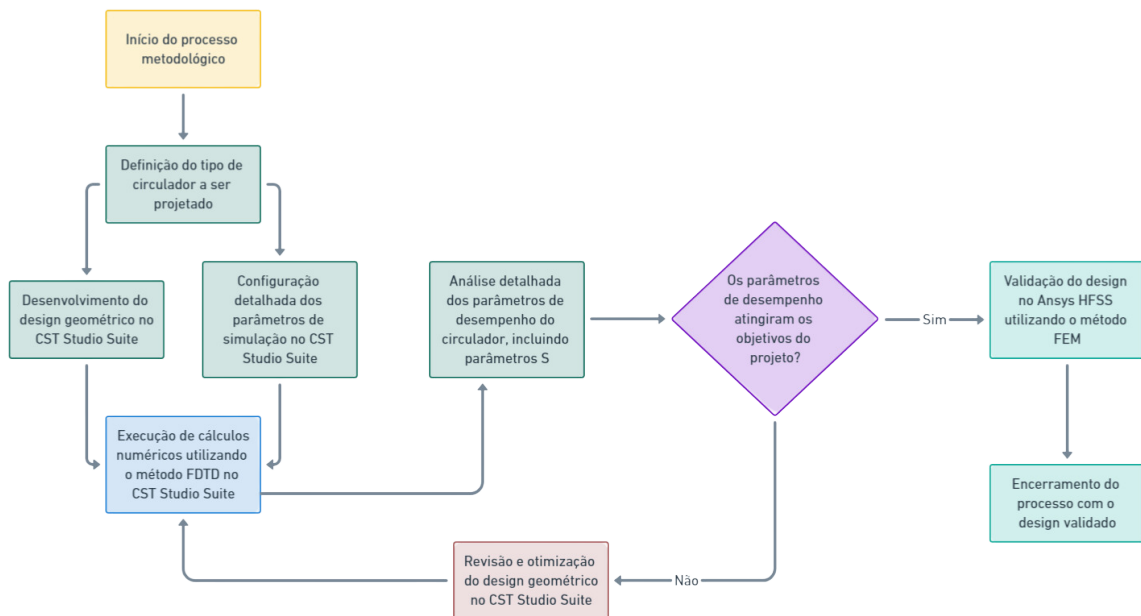


Figura 7 – Fluxo metodológico para o design e validação de circuladores.

3.1 Visão Geral da Metodologia

A pesquisa foi conduzida com foco na simulação computacional, utilizando o software CST Microwave Studio (versão 2023) (CST Studio Suite, 2023) como ferramenta principal para modelagem, simulação e otimização dos circuladores. O Ansys HFSS (versão 2023) (ANSYS HFSS, 2023) foi empregado como uma ferramenta de validação independente, baseada em um método numérico distinto (FEM), para corroborar os resultados obtidos com o CST.

O processo de otimização dos circuladores foi realizado de forma iterativa. Inicialmente, foram feitas estimativas para os parâmetros de projeto com base na teoria e nas equações

apresentadas no Capítulo 2. Em seguida, foram realizadas simulações no CST Microwave Studio. Os resultados dessas simulações foram analisados, e os parâmetros de projeto foram ajustados manualmente. Este processo iterativo de simulação e ajuste foi repetido até que um desempenho satisfatório fosse alcançado. Além disso, o otimizador **Particle Swarm Optimization (PSO)** (KENNEDY; EBERHART, 1995), integrado ao CST, foi utilizado como uma ferramenta auxiliar para explorar o espaço de projeto e encontrar soluções promissoras. O PSO, no entanto, foi empregado como uma "caixa preta", sem acesso aos seus hiperparâmetros internos.

Devido à indisponibilidade de equipamentos para fabricação e teste de dispositivos na faixa de 76–81 GHz na instituição, a validação experimental dos projetos não foi possível. A validação dos resultados foi, portanto, limitada à comparação entre as simulações realizadas no CST e no HFSS, bem como à comparação com dados e tendências reportados na literatura para circuladores semelhantes (LINKHART, 2014; POZAR, 2011; HELSZAJN, 2008).

Serão apresentados os procedimentos para o design de circuladores de 3, 4 e 6 portas, incluindo a escolha de materiais, a definição das dimensões e a otimização dos parâmetros de desempenho. O foco principal reside no circulador de 3 portas, que foi otimizado no CST Microwave Studio. Os designs de 4 e 6 portas são apresentados como propostas baseadas no design de 3 portas, demonstrando a escalabilidade da solução.

3.2 Modelagem e Simulação Computacional

3.2.1 Descrição dos Softwares

3.2.1.1 CST Microwave Studio

O **CST Microwave Studio (versão 2023)** (CST Studio Suite, 2023) foi utilizado como a principal ferramenta de modelagem, simulação e otimização dos circuladores. O software permite a criação de modelos 3D complexos, a definição de materiais com propriedades dependentes da frequência e a aplicação de diferentes tipos de excitação e condições de contorno. Além disso, o CST oferece uma interface amigável para a configuração de simulações e a análise dos resultados.

3.2.1.2 Ansys HFSS

O **Ansys High-Frequency Structure Simulator (HFSS)** (ANSYS HFSS, 2023) foi empregado como uma ferramenta de validação dos resultados obtidos com o CST. O HFSS é reconhecido por sua precisão na simulação de estruturas eletromagnéticas em alta frequência, especialmente quando se utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM). A validação cruzada entre os dois softwares, que utilizam métodos numéricos distintos, aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.2.2 Métodos Numéricos Empregados

3.2.2.1 Método das Diferenças Finitas no Tempo (FDTD) - CST Microwave Studio

O **Método das Diferenças Finitas no Tempo (FDTD)** é a principal técnica numérica empregada pelo CST Microwave Studio para a solução das equações de Maxwell no domínio do tempo (TAFLOVE; HAGNESS, 2005). O FDTD discretiza as equações de Maxwell no espaço e no tempo, permitindo a simulação da propagação de ondas eletromagnéticas de forma dinâmica.

No FDTD, o espaço é dividido em uma grade tridimensional composta por células de Yee (YEE, 1966). Os componentes do campo elétrico (\mathbf{E}) são calculados nas arestas das células, enquanto os componentes do campo magnético (\mathbf{H}) são calculados nos centros das faces.

As equações de Maxwell no FDTD são atualizadas iterativamente usando as seguintes fórmulas discretizadas (para o caso de um meio sem perdas e isotrópico) (TAFLOVE; HAGNESS, 2005):

$$\mathbf{E}^{n+1}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^n(\mathbf{r}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}^{n+1/2}(\mathbf{r}) - \frac{\Delta t}{\varepsilon(\mathbf{r})} \mathbf{J}^n(\mathbf{r}), \quad (3.1)$$

$$\mathbf{H}^{n+1/2}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^{n-1/2}(\mathbf{r}) - \frac{\Delta t}{\mu(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{E}^n(\mathbf{r}), \quad (3.2)$$

onde:

- \mathbf{E} e \mathbf{H} são os vetores de campo elétrico e magnético, respectivamente;
- $\mathbf{r} = (x, y, z)$ é o vetor posição;
- n é o índice de tempo;
- Δt é o passo de tempo;
- ε e μ são a permissividade e a permeabilidade do meio, respectivamente;
- \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica.

A estabilidade do método FDTD é garantida pela condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que limita o passo de tempo Δt em relação ao tamanho da célula da grade Δx , Δy , Δz e à velocidade da luz no meio c (TAFLOVE; HAGNESS, 2005):

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}.$$

O FDTD permite a modelagem precisa de materiais dispersivos e anisotrópicos, como os ferrites utilizados nos circuladores, e é eficiente para simulações de tempo-resolvidas onde a propagação transiente das ondas é de interesse (TAFLOVE; HAGNESS, 2005).

Embora o FDTD seja excelente para análises no domínio do tempo, suas demandas computacionais para estruturas detalhadas, especialmente em altas frequências, justificaram a escolha da abordagem de otimização paramétrica iterativa adotada, permitindo um equilíbrio entre a exploração do design e a viabilidade computacional dentro do escopo desta pesquisa.

3.2.2.2 Método dos Elementos Finitos (FEM) - Ansys HFSS

O **Método dos Elementos Finitos (FEM)** é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver equações diferenciais parciais em domínios complexos. No contexto do Ansys HFSS, o FEM é empregado para resolver as equações de Maxwell no domínio da frequência (JIN, 2014). O FEM divide a geometria do circulator em uma malha de elementos finitos (como tetraedros), permitindo uma resolução detalhada das distribuições de campo.

As equações de Maxwell no domínio da frequência, em termos do campo elétrico \mathbf{E} , podem ser escritas como (JIN, 2014):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{J} - \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \mathbf{M} \right) \quad (3.3)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa, ε_r é a permissividade relativa, k_0 é o número de onda no vácuo, \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica, e \mathbf{M} é a magnetização. Uma equação similar pode ser escrita em termos do campo magnético \mathbf{H} :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times \mathbf{H} \right) - k_0^2 \mu_r \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \mathbf{J} \right) - j\omega\varepsilon_0 \mathbf{M} \quad (3.4)$$

A discretização dessas equações no FEM resulta em um sistema de equações lineares, cuja solução fornece as distribuições dos campos eletromagnéticos dentro e ao redor do circulator.

3.2.3 Configurações de Simulação no CST Microwave Studio

Para as simulações no CST Microwave Studio, foram adotadas as seguintes configurações:

- **Solver:** Foi utilizado o solver *Transient*, baseado no método FDTD, para todas as simulações. Esse solver é adequado para a análise de problemas de propagação de ondas em estruturas complexas e permite a obtenção dos parâmetros S em uma ampla faixa de frequência a partir de uma única simulação.
- **Unidades:** As unidades de medida foram definidas como milímetros (mm) para comprimento, gigahertz (GHz) para frequência e nanossegundos (ns) para tempo.

- **Faixa de Frequência:** A faixa de frequência de 76–81 GHz foi definida para todas as simulações, cobrindo a banda de operação dos radares automotivos.
- **Condições de Fundo (Background):** Foi definido como *normal*.
- **Condições de Contorno:** Foram utilizadas condições de contorno do tipo *PML (Perfectly Matched Layer)* em todas as faces externas do domínio de simulação. As PMLs são camadas absorventes que minimizam a reflexão de ondas nas fronteiras do domínio, simulando um espaço aberto. A espessura e as propriedades das PMLs foram ajustadas para garantir a absorção eficiente das ondas na faixa de frequência de interesse. Em algumas simulações, para fins de simplificação e redução do tempo de simulação, foram utilizadas condições de contorno de simetria elétrica (*electric*) e magnética (*magnetic*) quando aplicável.
- **Fonte de Excitação:** Foram aplicadas fontes de excitação do tipo *Waveguide Port*, configuradas para operar na faixa de 76–81 GHz no modo fundamental (TE_{10}). As portas foram definidas nas extremidades das linhas de microfita e normalizadas para uma impedância de 50Ω . A excitação foi feita por meio de um sinal pulso gaussiano, com largura espectral cobrindo a faixa de 76–81 GHz.
- **Malha:** Foi utilizada uma malha hexaédrica com refinamento local nas regiões de maior variação de campo, como nas interfaces entre o ferrite e o substrato e nas linhas de microfita. A regra de pelo menos 20 células de malha por comprimento de onda foi seguida para garantir a precisão das simulações. Além disso, um *estudo de convergência da malha baseado nos parâmetros S* foi realizado para assegurar que os resultados obtidos fossem independentes do tamanho da malha. Para isso, a malha foi sucessivamente refinada até que a variação nos parâmetros S entre duas simulações consecutivas fosse inferior a 1%.
- **Materiais:** O ferrite SRM foi modelado como um material anisotrópico, com o tensor de permeabilidade de Polder definido conforme a Equação 2.2.3. Os valores dos parâmetros do SRM ($M_s = 4800$ Gauss, $\Delta H = 200$ Oe, $\epsilon_r = 21.3$ e $\tan \delta = 0.0005$) foram inseridos conforme especificado na Seção 3.3.1. As linhas de microfita foram modeladas como cobre, com condutividade finita de 5.8×10^7 S/m.
- **Campo Magnético Estático:** O campo magnético estático (H_0) foi aplicado na direção z , perpendicular ao plano do circulador. A intensidade do campo foi definida como 4800 Oe.
- **Monitores de Campo:** Foram definidos monitores de campo elétrico e magnético para registrar a distribuição dos campos no interior e ao redor do circulador em diferentes frequências e instantes de tempo. Esses monitores permitiram visualizar a propagação das ondas e a interação com o ferrite, auxiliando na compreensão do funcionamento do dispositivo e na identificação de possíveis problemas.

- **Parâmetros S:** Os parâmetros S foram calculados automaticamente pelo CST a partir das simulações no domínio do tempo. A impedância de referência para o cálculo dos parâmetros S foi definida como 50Ω .
- **Sweeps de Parâmetros:** Foram configurados *sweeps* de parâmetros para otimizar o design do circulador. Os parâmetros variados incluíram o raio do disco de ferrite, a largura das linhas de microfita, o comprimento das seções de $\lambda/4$ e a intensidade do campo magnético estático. Os *sweeps* foram realizados de forma iterativa, ajustando os parâmetros com base nos resultados obtidos em cada iteração.

3.2.4 Configurações de Simulação no Ansys HFSS

Para as simulações no Ansys HFSS, foram adotadas as seguintes configurações:

- **Solver:** Foi utilizado o solver *Driven Modal* do HFSS, adequado para a análise de parâmetros S em dispositivos de micro-ondas.
- **Malha (Mesh):** Foi utilizada uma malha tetraédrica com refinamento adaptativo baseado em critérios de erro. A convergência da solução foi verificada através de um processo iterativo de refinamento da malha, até que a variação nos parâmetros S entre iterações sucessivas fosse inferior a 1%. A malha foi refinada nas regiões de maior gradiente de campo, como nas interfaces entre o ferrite e o substrato e nas proximidades das linhas de microfita.
- **Condições de Contorno:** Foram aplicadas condições de contorno *Radiation* nas faces externas do domínio de simulação para simular a propagação das ondas fora da região de interesse. Essas condições absorvem as ondas incidentes, minimizando reflexões espúrias.
- **Fonte de Excitação:** Foram utilizadas portas de onda (*Wave Ports*) configuradas para operar na faixa de 76–81 GHz no modo fundamental.
- **Parâmetros de Simulação:** As análises foram realizadas em frequência para obter os parâmetros S, com variação contínua de 76–81 GHz. A solução adaptativa foi configurada para refinar a malha até que a variação nos parâmetros S entre iterações sucessivas fosse inferior a 0.02 dB.
- **Extração dos Parâmetros S:** Os parâmetros S foram calculados automaticamente pelo HFSS a partir da solução dos campos eletromagnéticos no domínio da frequência. A impedância de referência para o cálculo dos parâmetros S foi definida como 50Ω .

3.2.5 Comparação dos Métodos Numéricos

Cada método numérico possui vantagens e limitações que o tornam mais adequado para determinadas aplicações:

- **FDTD (CST Microwave Studio):**

- **Vantagens:** Excelente para simulações transientes e dinâmicas, permitindo a visualização da propagação temporal das ondas. É particularmente útil para modelar a interação de pulsos eletromagnéticos com estruturas complexas e materiais dispersivos como os ferrites. O FDTD também é eficiente na modelagem de estruturas abertas e na análise de uma ampla faixa de frequências a partir de uma única simulação.
- **Limitações:** Pode exigir um grande esforço computacional para estruturas com detalhes finos em comparação com o comprimento de onda, devido à necessidade de uma malha espacial refinada. Além disso, a precisão do FDTD pode ser afetada por erros de dispersão numérica, especialmente em simulações de longa duração ou em frequências muito altas.

- **FEM (Ansys HFSS):**

- **Vantagens:** Ideal para simulações em regime permanente e análise de frequência, proporcionando alta precisão na resolução de campos estáticos e estacionários. O FEM é eficiente para otimização de designs onde a resposta em uma ou várias frequências específicas é de interesse. Além disso, o FEM lida bem com geometrias complexas e materiais não homogêneos, permitindo a adaptação da malha para capturar detalhes importantes.
- **Limitações:** Pode ser menos eficiente que o FDTD para problemas de banda larga e simulações que envolvem a propagação de ondas por longas distâncias. Além disso, a formulação no domínio da frequência não permite a análise direta de fenômenos transientes.

A escolha entre FDTD e FEM depende das características específicas do circulator a ser projetado, incluindo a complexidade geométrica, os materiais utilizados e os requisitos de precisão e tempo de simulação.

3.2.6 Validação Cruzada com HFSS

Após a otimização dos circutores no CST Microwave Studio, os designs selecionados foram modelados e simulados no Ansys HFSS para fins de validação. Essa validação cruzada é importante para aumentar a confiabilidade dos resultados, uma vez que os dois softwares utilizam métodos numéricos distintos (FDTD no CST e FEM no HFSS).

Para a validação no HFSS, os seguintes passos foram seguidos:

1. **Importação da Geometria:** A geometria otimizada de cada circulator (incluindo o ferrite, o substrato, as linhas de microfita e os transformadores de impedância) foi exportada do

CST Microwave Studio em um formato compatível (e.g., STEP, IGES) e importada para o Ansys HFSS.

2. **Definição dos Materiais:** Os materiais foram definidos no HFSS com as mesmas propriedades utilizadas nas simulações no CST (ver Seção 3.2.3). É crucial garantir que as propriedades dos materiais, especialmente as propriedades magnéticas do ferrite (tensor de Polder), sejam definidas de forma consistente nos dois softwares.
3. **Configuração das Portas e Condições de Contorno:** As portas de onda e as condições de contorno de radiação foram configuradas de forma análoga às simulações no CST (ver Seção 3.2.4). As portas foram definidas nas extremidades das linhas de microfita e normalizadas para uma impedância de 50Ω .
4. **Definição da Malha:** Uma malha tetraédrica adaptativa foi gerada, com refinamento automático nas regiões críticas, como nas interfaces entre o ferrite e o substrato e nas proximidades das linhas de microfita. O HFSS utiliza um processo iterativo de refinamento da malha, onde a malha é refinada em regiões de alto erro até que a variação nos parâmetros S entre iterações sucessivas seja inferior a um determinado limite.
5. **Simulação e Extração dos Parâmetros S:** Foram realizadas simulações no domínio da frequência na faixa de 76–81 GHz, e os parâmetros S (magnitude e fase) foram extraídos para cada porta do circulador.
6. **Comparação com os Resultados do CST:** Os parâmetros S obtidos no HFSS foram comparados com os resultados correspondentes obtidos no CST. As diferenças entre os resultados foram analisadas e quantificadas. Gráficos comparativos (como os que serão apresentados no Capítulo 4) foram gerados para visualizar as diferenças.

Essa validação cruzada permitiu verificar a consistência dos resultados obtidos com os dois métodos numéricos e aumentar a confiança nos designs otimizados. Embora pequenas diferenças sejam esperadas devido às diferentes abordagens numéricas e às simplificações inerentes a cada método, diferenças significativas indicariam a necessidade de investigar e corrigir possíveis erros na modelagem ou nas configurações de simulação.

3.2.7 Limitações da Metodologia

É importante reconhecer as limitações da metodologia adotada neste trabalho:

- **Ausência de Validação Experimental:** A principal limitação é a ausência de validação experimental dos circuladores projetados. Devido à indisponibilidade de equipamentos para fabricação e teste de dispositivos na faixa de 76–81 GHz na instituição, não foi possível construir protótipos e medir seu desempenho. Embora a validação cruzada entre

CST e HFSS e a comparação com a literatura aumentem a confiabilidade dos resultados, a validação experimental é *fundamental* para confirmar o desempenho real dos dispositivos e para identificar possíveis discrepâncias entre o modelo e a realidade.

- **Simplificações nos Modelos de Simulação:** Os modelos de simulação empregados, tanto no CST quanto no HFSS, consideram algumas simplificações:
 - **Materiais Ideais:** Os materiais são considerados ideais, com propriedades constantes e uniformes. Na prática, os materiais podem apresentar variações nas suas propriedades, perdas adicionais (não consideradas nos modelos) e não homogeneidades.
 - **Geometria Idealizada:** A geometria dos circuladores é modelada de forma idealizada, sem levar em conta imperfeições de fabricação (tolerâncias dimensionais, rugosidade superficial, etc.).
 - Apesar dessas limitações, a metodologia empregada fornece uma base sólida para o desenvolvimento e a análise de circuladores não recíprocos para a faixa de 76–81 GHz, permitindo a obtenção de designs promissores que podem ser posteriormente refinados e validados experimentalmente, quando os recursos necessários estiverem disponíveis.

3.3 Design dos Circuladores

Nesta seção, será detalhado o processo de design dos circuladores de 3, 4 e 6 portas. Serão abordados os critérios para a escolha das dimensões iniciais, a seleção do material ferrítico, a adaptação de impedância e a influência do campo magnético estático. O foco principal reside no circulador de 3 portas, que foi otimizado no CST Microwave Studio. Os designs de 4 e 6 portas são apresentados como propostas baseadas no design de 3 portas, demonstrando a escalabilidade da solução.

3.3.1 Circulador de 3 Portas

O circulador de 3 portas, *especificamente o circulador de junção em Y*, é o mais amplamente utilizado devido à sua simplicidade, eficiência e facilidade de integração em sistemas de micro-ondas (LINKHART, 2014). Ele direciona sinais de maneira cíclica entre as portas, seguindo a sequência $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, como ilustrado na Figura 8. Esta configuração é especialmente vantajosa em aplicações onde a separação eficiente de sinais de transmissão e recepção é essencial, como em sistemas de radar automotivo e comunicações de alta frequência.

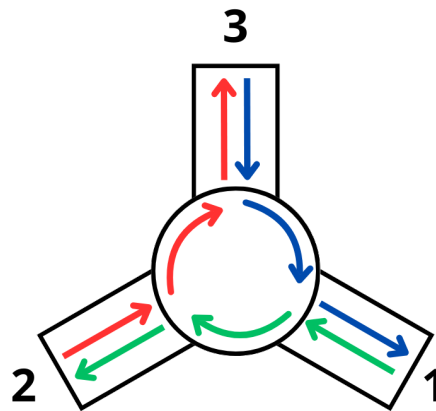


Figura 8 – Diagrama esquemático de um circulator de junção em Y de três portas.

3.3.1.1 Design Conceitual e Escolha de Dimensões Iniciais

O design conceitual do circulator de 3 portas baseia-se na teoria de circutores de junção em Y, utilizando um ressonador de ferrite na forma de disco ou triângulo, conforme apresentado no Capítulo 2 (LINKHART, 2014; POZAR, 2011). A frequência de operação é definida como o ponto central de $f_0 = 77$ GHz.

As dimensões iniciais do circulator são estimadas a partir de equações clássicas para circutores de junção em Y, como as apresentadas por Bosma (BOSMA, 1964), Fay e Comstock (FAY; COMSTOCK, 1965) e Helszajn (HELSZAJN, 1972; HELSZAJN, 2008). O raio do disco de ferrite (R) é dado por:

$$R = \frac{1.84c}{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_{eff}}},$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), ϵ_r é a permissividade relativa do ferrite e μ_{eff} é a permeabilidade efetiva do ferrite. Esta permeabilidade efetiva (μ_{eff}) é influenciada pelo campo magnético estático externo e pelas propriedades intrínsecas do material ferrítico, refletindo o comportamento não recíproco descrito pelo tensor de Polder (Capítulo 2). O fator 1.84 é derivado da função de Bessel de primeira espécie e primeira ordem, e corresponde ao primeiro zero da derivada dessa função, que define a condição de ressonância para o modo dominante no disco de ferrite (BOSMA, 1964; FAY; COMSTOCK, 1965).

A largura das linhas de microfita (W) que se conectam ao ressonador de ferrite é calculada para garantir uma impedância característica de 50Ω , utilizando a seguinte

equação para a impedância característica de uma linha de microfita (POZAR, 2011):

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right)},$$

onde h é a espessura do substrato e ε_{eff} é a permissividade efetiva do substrato. A permissividade efetiva leva em conta o fato de que o campo eletromagnético na linha de microfita se propaga parcialmente no substrato e parcialmente no ar (ou outro meio dielétrico) acima do substrato. Ela pode ser aproximada por (POZAR, 2011):

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0.5}.$$

Essas equações fornecem as dimensões iniciais para o design do circulator, que serão posteriormente otimizadas por meio de simulações computacionais.

3.3.1.2 Escolha do Material Ferrítico

A escolha do material ferrítico é crucial para o desempenho do circulator, influenciando a perda de inserção, o isolamento, a largura de banda e a potência máxima suportada. Como discutido no Capítulo 2, o Strontium Hexaferrite (SRM) é um material promissor para aplicações em ondas milimétricas devido à sua alta magnetização de saturação, alta frequência de ressonância e baixas perdas. Para este projeto, será considerado um SRM com as seguintes propriedades:

- * Magnetização de saturação: $M_s = 4800$ Gauss
- * Largura de linha de ressonância ferrimagnética: $\Delta H = 200$ Oe
- * Permissividade relativa: $\varepsilon_r = 21.3$
- * Tangente de perda dielétrica: $\tan \delta = 0.0005$

Esses valores são baseados em dados experimentais reportados na literatura para o SRM e serão utilizados nas simulações (LINKHART, 2014).

3.3.1.3 Adaptação de Impedância

Para garantir a máxima transferência de potência e minimizar as reflexões nas portas do circulator, é necessário realizar a adaptação de impedância entre as linhas de microfita de 50Ω e o ressonador de ferrite. A impedância de entrada do ressonador de ferrite, Z_{in} , é, em geral, complexa e diferente de 50Ω .

Neste projeto, serão utilizadas seções de linha de transmissão de $\lambda/4$ (um quarto de comprimento de onda) como transformadores de impedância (POZAR, 2011). A impedância característica dessas seções (Z_t) é calculada como:

$$Z_t = \sqrt{Z_0 Z_{in}},$$

onde $Z_0 = 50 \Omega$ é a impedância da linha de microfita e Z_{in} é a impedância de entrada do ressonador de ferrite, que será obtida a partir das simulações iniciais.

A largura (W_t) e o comprimento (L_t) das seções de $\lambda/4$ são determinados pelas propriedades do substrato e pela frequência de operação. O comprimento é dado por:

$$L_t = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{c}{4f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}},$$

onde λ_g é o comprimento de onda guiado na linha de microfita, c é a velocidade da luz no vácuo, f_0 é a frequência central de operação (77 GHz) e ε_{eff} é a permissividade efetiva do substrato com a largura W_t , calculada usando a equação 3.3.1.1.

3.3.1.4 Projeto do Campo Magnético Estático

Um campo magnético estático uniforme e com intensidade otimizada é essencial para a operação não recíproca do circulador. A intensidade do campo (H_0) deve ser ajustada para operar próximo à ressonância do ferrite na frequência de operação, maximizando a não reciprocidade e, conseqüentemente, o isolamento entre as portas. A partir da equação de Kittel, apresentada no Capítulo 2 (Equação 2.12), e considerando as propriedades do SRM, estima-se um campo H_0 em torno de 4.8 kOe para a operação na faixa de 76–81 GHz. Este valor serve como um ponto de partida para a otimização, e o valor final será determinado por meio de simulações.

Para gerar o campo magnético, serão considerados ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), que oferecem alta densidade de energia e campo magnético remanente elevado. A configuração dos ímãs (geometria, dimensões, posicionamento) será otimizada por meio de simulações magnetostáticas, utilizando ferramentas como o Ansys Maxwell, para garantir a uniformidade do campo na região do ferrite e minimizar o peso e o volume do conjunto magnético.

3.3.1.5 Otimização Paramétrica Iterativa

Após a definição das dimensões iniciais e dos materiais, o design do circulador de 3 portas foi otimizado no CST Microwave Studio por meio de um processo iterativo baseado em **varreduras** de parâmetros (**parameter sweeps**). A otimização foi realizada usando uma abordagem de varredura paramétrica iterativa. Inicialmente, um parâmetro foi varrido enquanto os demais eram mantidos constantes, permitindo a observação da sensibilidade individual de cada variável. Com base nessas varreduras iniciais e nas tendências observadas, as faixas de parâmetros e os incrementos de varredura foram refinados iterativamente para focar em regiões promissoras do espaço de projeto.

Os seguintes parâmetros foram variados dentro de faixas definidas com base em análises preliminares:

- * **Raio do disco de ferrite (R):** Variado de 0.46 mm até 0.52 mm, com incrementos de 0.01 mm. A faixa foi escolhida com base em simulações preliminares.
- * **Largura das linhas de microfita (W):** Variada de 0.08 mm até 0.088 mm, com incrementos de 0.001 mm. A escolha da faixa levou em consideração a necessidade de manter a impedância característica próxima de 50Ω e as limitações de fabricação em altas frequências.

Para cada combinação de parâmetros, uma simulação completa foi realizada no CST, e os parâmetros S resultantes foram analisados. A seleção dos melhores parâmetros foi feita por inspeção visual dos gráficos dos parâmetros S, guiada pelos critérios de desempenho definidos: minimização da perda de inserção, maximização do isolamento e boa perda de retorno.

As Figuras 9 e 10 ilustram os resultados das varreduras paramétricas para dois dos parâmetros mais sensíveis: o raio do disco de ferrite (R) e a largura da linha de microfita (W). Em ambos os casos, observa-se a variação da perda de inserção (S_{21}) em função do respectivo parâmetro.

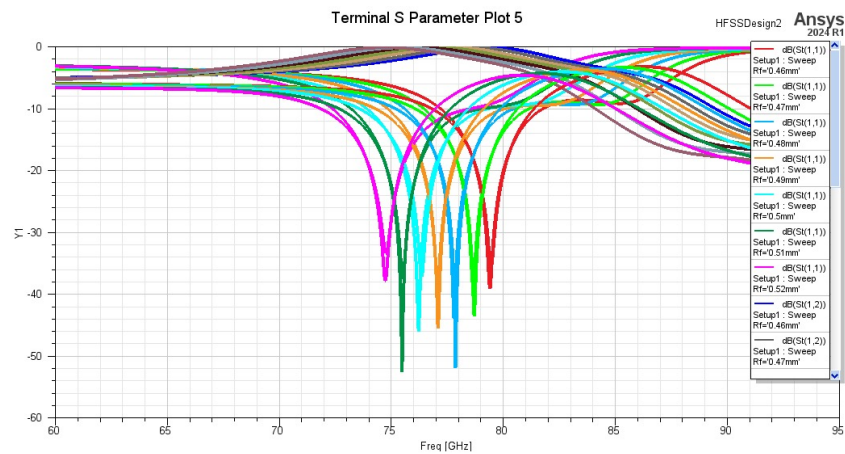


Figura 9 – Variação da matriz de espalhamento (S) em função do raio do disco de ferrite (R).

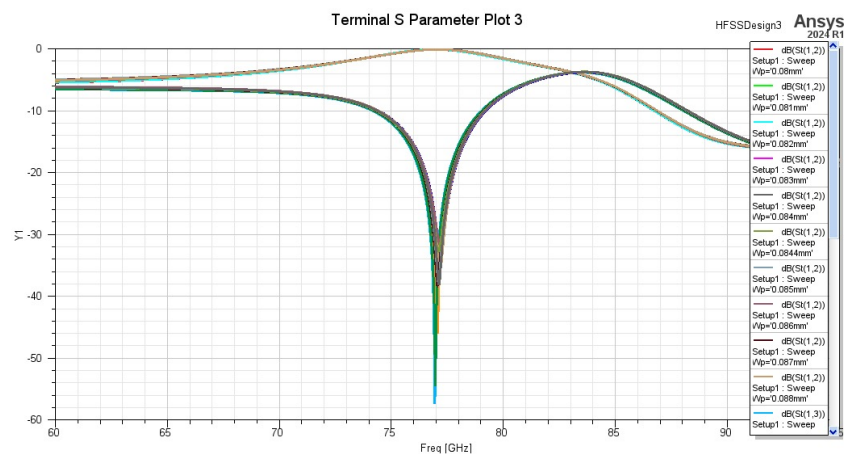


Figura 10 – Variação da matriz de espalhamento (S) em função da largura da linha de microfita (W).

Em iterações subseqüentes, as faixas de variação dos parâmetros foram frequentemente reduzidas para focar em regiões identificadas como promissoras em varreduras anteriores. Parâmetros que demonstraram maior sensibilidade em varreduras iniciais receberam incrementos de varredura mais finos em iterações posteriores para localizar valores ótimos com maior precisão. Esse processo iterativo permitiu convergir para um conjunto otimizado de parâmetros de design.

3.3.1.6 Design do circulator proposto

A Figura 11 ilustra a geometria do circulator proposto. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros adotados no projeto.

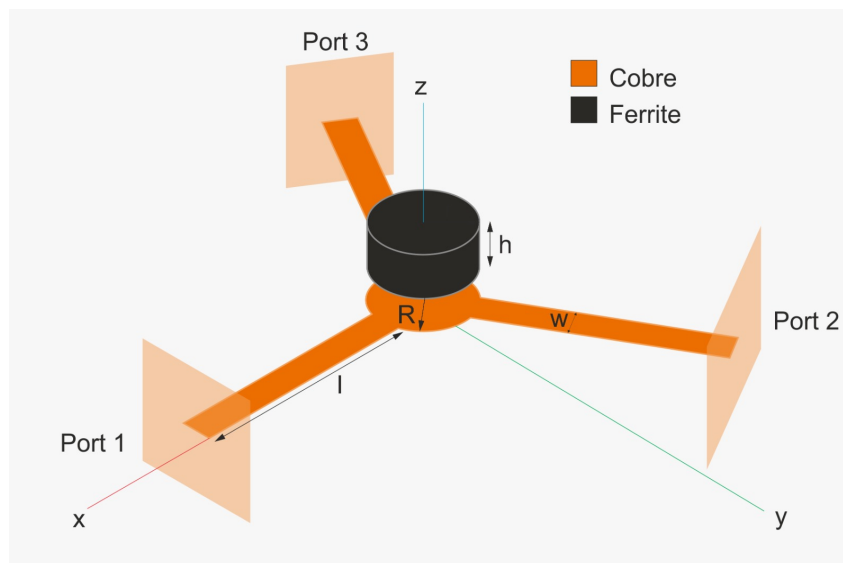


Figura 11 – Geometria do circulator proposto em microfita.

Tabela 1 – Parâmetros do circulator proposto.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Raio do disco de ferrite	R	0.49 mm
Altura do disco de ferrite	h	0.24 mm
Comprimento da linha de microfita	l	1.225 mm
Largura da linha de microfita	w	0.0844 mm
Frequência de operação	f_0	77 GHz

Embora o CST Microwave Studio ofereça um otimizador automático baseado no algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), optou-se por não utilizá-lo extensivamente neste trabalho. Em vez disso, o PSO foi empregado principalmente como uma ferramenta exploratória para identificar regiões promissoras no espaço de design. A otimização final foi realizada manualmente, por meio de varreduras paramétricas, devido à maior flexibilidade e controle que essa

abordagem oferece, e também devido à indisponibilidade, no software, de acesso direto aos hiperparâmetros do otimizador PSO.

3.3.2 Circuladores de 4 e 6 Portas

Devido à maior complexidade dessas estruturas e para manter o escopo da pesquisa focado na demonstração da escalabilidade do conceito, a otimização paramétrica por varreduras de parâmetros foi realizada de forma mais limitada em comparação com o circulador de 3 portas. Os resultados obtidos para esses circuladores foram comparados com os do circulador de 3 portas otimizado, a fim de avaliar a viabilidade de expansão do design.

A ideia para a construção do circulador de 4 portas surgiu a partir da junção de dois circuladores de 3 portas previamente otimizados. Essa configuração resultou em uma estrutura com dois discos de ferrite e quatro portas de microfita dispostas em cruz, interligadas por uma linha de transmissão comum entre os dois núcleos. A geometria foi ajustada de modo a manter a continuidade eletromagnética entre os dois módulos, respeitando os parâmetros físicos otimizados para o circulador de 3 portas. Os resultados de simulação indicaram que a estrutura apresentou desempenho satisfatório, com boa direção de circulação e perdas de inserção moderadas.

Para a configuração de 6 portas, foi adotado um arranjo hexagonal formado pela junção de seis circuladores de 3 portas, interconectados de forma a criar uma estrutura contínua com seis discos de ferrite distribuídos radialmente em torno de um centro comum. A topologia resultante apresenta uma simetria hexagonal clara, com cada disco contribuindo para a condução do sinal entre portas adjacentes. Essa abordagem permitiu verificar o comportamento escalável da estrutura ao aumentar o número de portas, mantendo o princípio de operação circulatória entre as conexões.

Ambos os modelos foram simulados no CST Microwave Studio, utilizando os mesmos parâmetros de material e frequências de operação adotados no circulador de 3 portas. Não foi realizada uma reotimização completa dos parâmetros geométricos para esses casos, de modo que os resultados representam uma análise preliminar da escalabilidade do projeto.

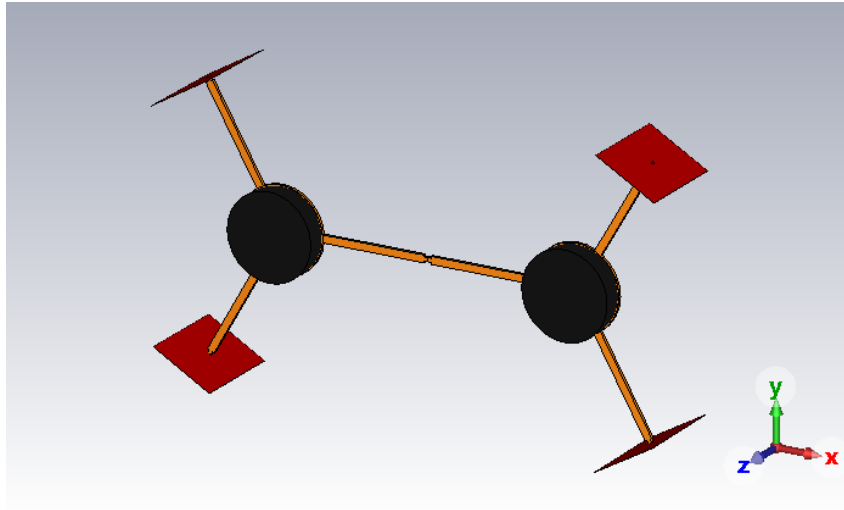


Figura 12 – Geometria do circulator de 4 portas, construído a partir da junção de dois circuladores de 3 portas.

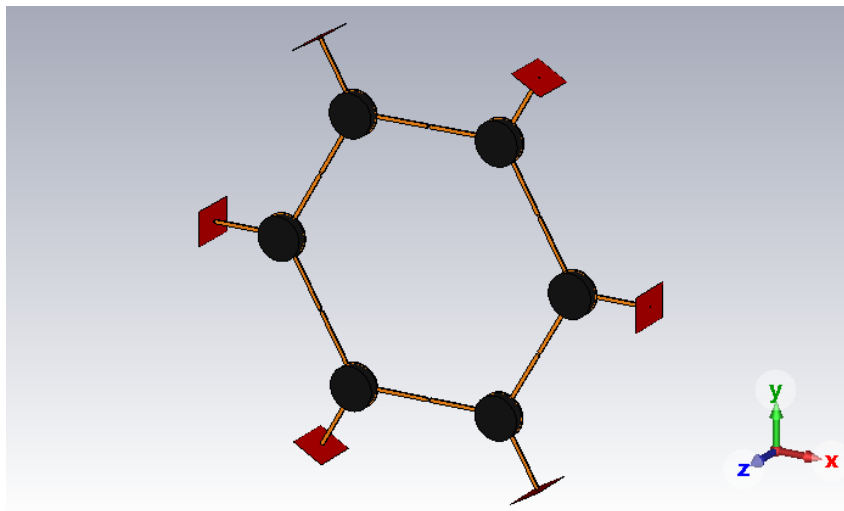


Figura 13 – Geometria do circulator de 6 portas, construído a partir do arranjo de seis circuladores de 3 portas, formando uma estrutura hexagonal.

As Figuras 12 e 13 apresentam as geometrias das estruturas propostas. Observa-se que, apesar da complexidade aumentada, os dispositivos mantiveram a funcionalidade circulatória, com desempenho compatível com aplicações em sistemas de chaveamento em RF e redes de comunicação na faixa de ondas milimétricas.

3.4 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou a metodologia detalhada para o projeto, modelagem e análise de circuladores não recíprocos de ondas milimétricas, operando na faixa de 76 a 81 GHz, com foco em aplicações de radar automotivo. A abordagem adotada combinou o uso de equações analíticas clássicas, para a obtenção de estimativas iniciais dos parâmetros de projeto, com simulações eletromagnéticas computacionais, para a otimização e validação dos designs.

Foram descritos os procedimentos para o design de circuladores de junção em Y de 3 portas, bem como propostas de design para circuladores de 4 e 6 portas, baseadas na escalabilidade do conceito. A escolha dos materiais foi justificada, e as dimensões iniciais dos componentes foram calculadas com base nas equações apresentadas.

A modelagem e a simulação dos circuladores foram realizadas utilizando dois softwares de simulação eletromagnética amplamente reconhecidos: o CST Microwave Studio, baseado no método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), e o Ansys HFSS, baseado no método dos elementos finitos (FEM). As configurações de simulação em ambos os softwares foram detalhadas, incluindo o tipo de solver, as condições de contorno, as fontes de excitação, a malha e as propriedades dos materiais.

A otimização dos parâmetros de projeto foi realizada de forma iterativa, combinando varreduras paramétricas no CST Microwave Studio com ajustes manuais baseados na análise dos resultados. O otimizador PSO do CST foi utilizado como uma ferramenta auxiliar na exploração do espaço de design.

A validação dos resultados foi realizada por meio da comparação entre as simulações no CST e no HFSS (validação cruzada), bem como pela comparação com dados e tendências reportados na literatura para circuladores semelhantes. As limitações da metodologia, principalmente a ausência de validação experimental, foram discutidas de forma transparente.

Apesar das limitações, a metodologia apresentada neste capítulo forneceu uma base sólida para o desenvolvimento de circuladores não recíprocos para a faixa de 76 a 81 GHz, permitindo a obtenção de designs promissores. Os resultados das simulações, incluindo os parâmetros S e as distribuições de campo, serão apresentados e analisados em detalhes no Capítulo 4. A comparação entre os resultados obtidos com os dois softwares de simulação e com a literatura permitirá avaliar o desempenho dos circuladores projetados e validar a metodologia proposta.

4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram analisados e comparados, discutindo-se o desempenho dos circuladores em termos de perda de inserção, isolamento, perda de retorno e distribuição de campos eletromagnéticos.

4.0.1 Resultados dos Circuladores de 3 Portas

4.0.1.1 Parâmetros S

Os valores simulados dos parâmetros S para o circulador de 3 portas foram obtidos utilizando o simulador CST Microwave Studio, após o processo de otimização descrito na Seção 3.3.1.5. As Figuras, a seguir, apresentam os gráficos dos parâmetros S_{11} , S_{21} e S_{31} em função da frequência. É importante notar que, para um circulador de 3 portas idealmente simétrico e sem perdas, esperaríamos que $|S_{21}| = |S_{32}| = |S_{13}|$ (transmissão unitária na direção de circulação) e $|S_{12}| = |S_{23}| = |S_{31}| = 0$ (isolamento infinito). Desvios dessas condições ideais indicam perdas, reflexões e imperfeições na simetria do dispositivo.

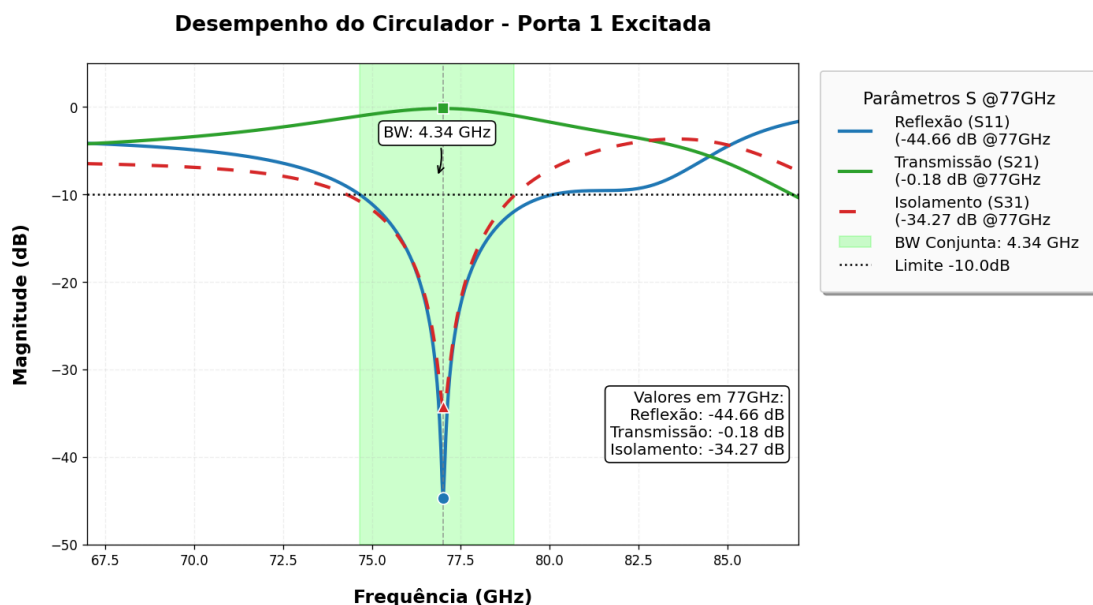


Figura 14 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 1.

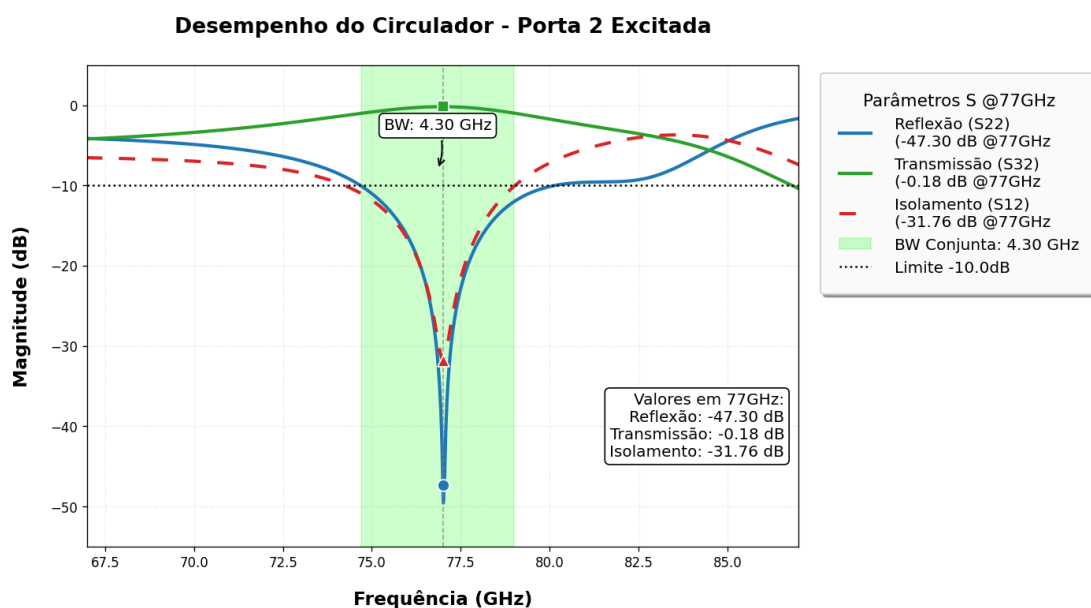


Figura 15 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 2.

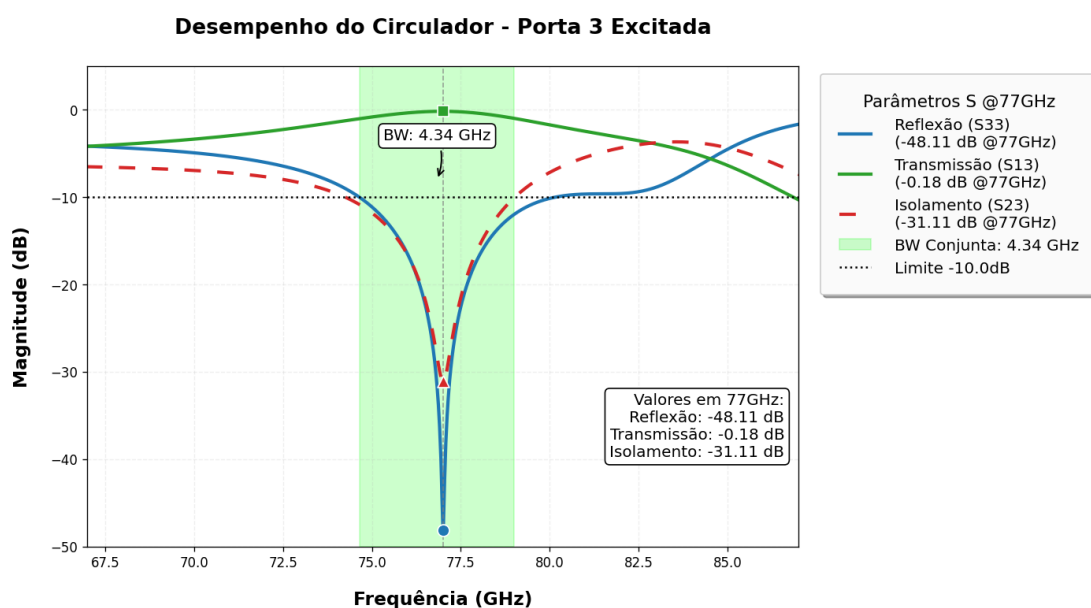


Figura 16 – Parâmetros S do circulador de 3 portas. Com excitação na porta 3.

Os resultados indicam que:

- * A perda de inserção ($|S_{21}|$ em dB) é inferior a 0.4 dB na maior parte da faixa de operação (76 a 81 GHz), o que demonstra uma alta eficiência na transmissão do sinal da porta 1 para a porta 2, por exemplo.
- * O isolamento ($|S_{31}|$ em dB) excede 25 dB na maior parte da faixa de operação, garantindo uma boa separação entre os sinais que se propagam em direções opostas (da porta 1 para a porta 3, neste caso).
- * O retorno de perda ($|S_{11}|$ em dB) é melhor que 20 dB em toda a faixa, indicando uma baixa reflexão do sinal na porta de entrada (porta 1) e, conseqüentemente,

uma boa adaptação de impedância.

4.0.1.2 Distribuição de Campos Eletromagnéticos

A Figura 17 ilustra a distribuição de campos eletromagnéticos no circulator de 3 portas, operando na frequência central de 77 GHz. A figura mostra a magnitude do campo elétrico ($|\mathbf{E}|$) no plano central do circulator (plano de simetria), quando a porta 1 é excitada com um sinal de entrada.

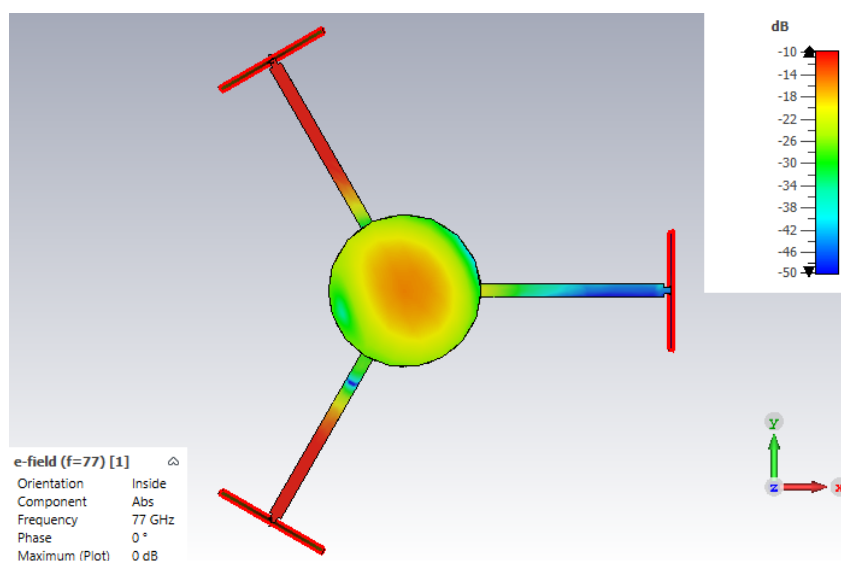


Figura 17 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($|\mathbf{E}|$) no circulator de 3 portas a 77 GHz, com excitação na porta 1. (Fonte: Autor, 2024)

A observação da distribuição de campos permite confirmar o princípio de funcionamento do circulator. Nota-se que:

- * Os campos estão concentrados principalmente na região do ferrite central, como esperado.
- * O sinal incidente na porta 1 é direcionado predominantemente para a porta 2, com pouca energia acoplada à porta 3 (porta isolada). Isso demonstra a não reciprocidade do dispositivo e a circulação do sinal.
- * A distribuição de campos não é perfeitamente simétrica, o que pode ser atribuído a pequenas assimetrias na geometria do modelo, nas propriedades dos materiais ou na malha de simulação.

4.0.1.3 Validação com Ansys HFSS

Para validar os resultados obtidos com o CST Microwave Studio, o design otimizado do circulator de 3 portas também foi modelado e simulado no Ansys HFSS. A Figura 18 apresenta a geometria Y obtida com o HFSS para o mesmo circulator.

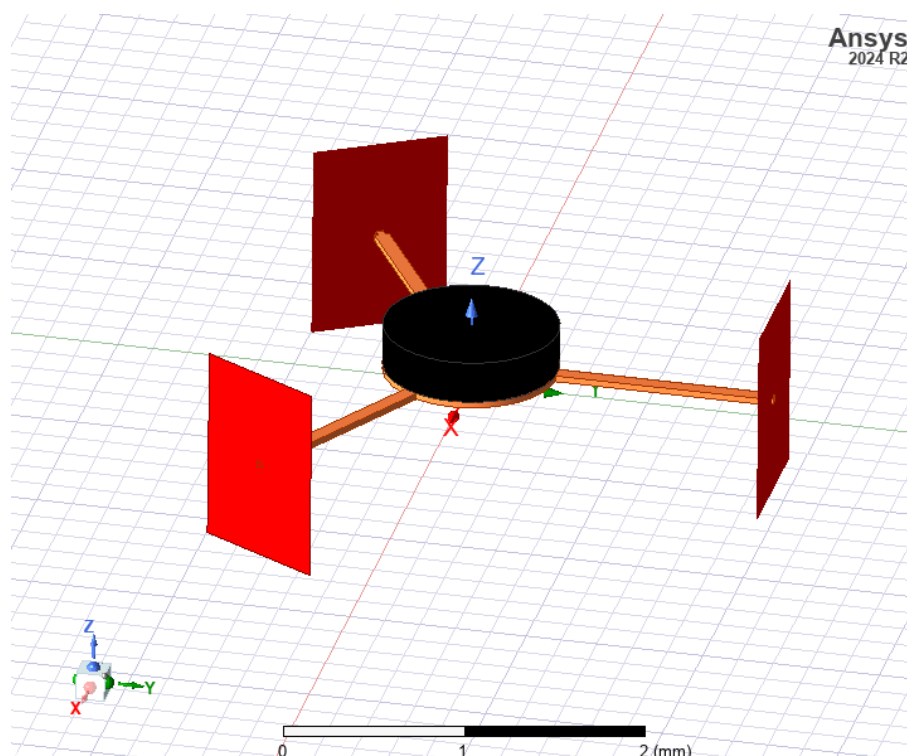


Figura 18 – Circulador de 3 portas simulados no Ansys HFSS. (Fonte: Autor, 2024)

A Tabela 2 compara os resultados obtidos com os dois simuladores na frequência central de 77 GHz.

Tabela 2 – Comparação dos parâmetros S do circulador de 3 portas obtidos com CST e HFSS a 77 GHz.

Parâmetro	CST	HFSS
Perda de Inserção ($ S_{21} $ em dB)	-0.18	-0.17
Isolamento ($ S_{31} $ em dB)	-34.69	-37.99
Retorno de Perda ($ S_{11} $ em dB)	-32.64	-45.47

Há boa concordância entre os resultados obtidos com os dois softwares. As diferenças podem ser atribuídas às diferentes abordagens numéricas (FDTD no CST e FEM no HFSS), às diferentes malhas utilizadas em cada software e às aproximações inerentes a cada método.

4.0.2 Discussão dos Resultados do Circulador de 3 Portas

Os resultados simulados do circulador de 3 portas demonstram um desempenho promissor para aplicações em radares automotivos operando na faixa de 77 GHz. Os valores de parâmetros S obtidos, notavelmente a baixa perda de inserção e o elevado isolamento, evidenciam a eficácia do design proposto e a adequação do *Strontium Hexaferrite* (SRM) para esta aplicação de alta frequência.

A **perda de inserção** simulada, inferior a 0.4 dB ao longo da banda de operação, indica uma transmissão de sinal altamente eficiente através do circulador, minimizando a dissipação de potência e maximizando a energia direcionada para a porta subsequente.

O **isolamento**, superior a 25 dB na maior parte da faixa de frequência de interesse, é um indicativo crucial da capacidade do circulador em prevenir a diafonia e o acoplamento indesejado entre as portas não consecutivas. Este alto isolamento é essencial em sistemas de radar para garantir que o sinal transmitido seja efetivamente separado do sinal de recepção, otimizando a sensibilidade do receptor e minimizando interferências espúrias.

O **retorno de perda**, consistentemente abaixo de -20 dB em toda a banda de 76-81 GHz, demonstra um excelente casamento de impedância nas portas do circulador. Este baixo retorno de perda significa que a maior parte da potência incidente nas portas é transmitida para as portas de saída desejadas, com apenas uma pequena fração sendo refletida de volta à fonte. Um bom casamento de impedância é fundamental para maximizar a eficiência da transmissão de sinal e evitar reflexões que podem degradar o desempenho do sistema (POZAR, 2011).

A análise da **distribuição de campos eletromagnéticos** (Figura 17) corrobora o princípio de funcionamento do circulador. A concentração da intensidade do campo elétrico na região do disco de ferrite, juntamente com o direcionamento claro do fluxo de energia entre as portas, demonstra visualmente a ocorrência do fenômeno de circulação e a eficácia da interação do campo de micro-ondas com o material ferrimagnético sob a influência do campo magnético estático.

A **validação cruzada com o Ansys HFSS**, utilizando o método FEM, fornece uma importante camada de confiança aos resultados obtidos no CST Microwave Studio (FDTD). A concordância observada nos parâmetros S entre os dois softwares, apesar de suas diferentes formulações numéricas e técnicas de discretização, sugere que os resultados não são artefatos de um solver específico, mas sim representativos do comportamento eletromagnético do design proposto. As pequenas diferenças quantitativas, como os desvios de até 2 dB no isolamento, são esperadas e aceitáveis em simulações eletromagnéticas de alta frequência, especialmente para estruturas complexas. Essas variações podem ser atribuídas a diferenças inerentes nos algoritmos de malha adaptativa e nas implementações dos materiais nos dois softwares.

Limitações da Simulação e Perspectivas Futuras: É crucial reconhecer que os resultados apresentados são baseados em simulações computacionais e, como tal, possuem inerentes limitações. As simulações se baseiam em modelos matemáticos e representações computacionais aproximadas da realidade física. Fatores como a idealização das propriedades do material SRM (homogeneidade perfeita, valores precisos de M_s , ΔH , ε_r , $\tan \delta$), a precisão finita da malha, as condições de contorno

ideais (PMLs perfeitas) e a ausência de imperfeições de fabricação (rugosidade da superfície das microfitas, tolerâncias dimensionais) podem introduzir desvios entre o desempenho simulado e o desempenho que seria observado em um dispositivo físico fabricado.

Em estudos futuros, a incorporação de modelos de materiais mais refinados, que considerem, por exemplo, a variação das propriedades do SRM com a frequência e a temperatura, bem como a inclusão de modelos de rugosidade superficial e de perdas nos condutores mais precisos, poderia aprimorar a fidelidade das simulações. Adicionalmente, a investigação do impacto de variações nas propriedades do ferrite e nas dimensões geométricas, por meio de análises de sensibilidade e de tolerância mais extensivas, pode fornecer informações valiosas para otimizar a robustez do design em face de incertezas de fabricação e variações de materiais. Não obstante estas limitações, os resultados das simulações realizadas fornecem uma forte indicação do potencial do design proposto para aplicações em circuladores de 77 GHz.

4.1 Resultados dos Circuladores de 4 Portas

4.1.1 Parâmetros S

Os parâmetros S do circulador de 4 portas foram obtidos por meio de simulações realizadas exclusivamente no software CST Microwave Studio. A Figura 19 apresenta a matriz S simulada com excitação na porta 1, contemplando os parâmetros S_{11} , S_{21} , S_{31} , e S_{41} na faixa de 76–81 GHz.

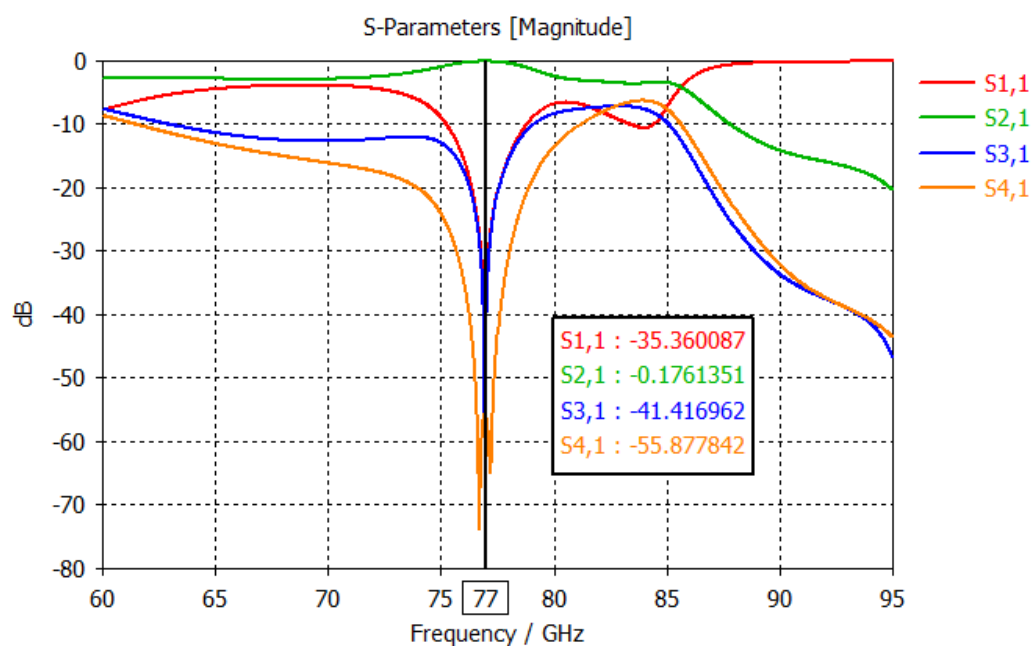


Figura 19 – Parâmetros S do circulador de 4 portas com excitação na porta 1, simulados no CST Microwave Studio. (Fonte: Autor, 2024)

A análise dos resultados mostra que:

- * **Perda de Inserção (S_{21}):** A transmissão do sinal da porta 1 para a porta 2 ocorre com baixa atenuação, com perda de inserção inferior a 0.7 dB ao longo da faixa de operação, o que indica boa eficiência de propagação na direção preferencial.
- * **Isolamento (S_{41}):** Observa-se um bom isolamento da porta 1 em relação à porta 4, com valores superiores a 20 dB na maior parte da banda. Esse comportamento confirma a não reciprocidade do dispositivo, característica fundamental de circuladores.
- * **Retorno de Perda (S_{11}):** O retorno de perda se mantém melhor que 18 dB, evidenciando um bom casamento de impedância na porta de entrada.
- * **Acoplamentos parasitas (S_{31}):** Os níveis de acoplamento entre a porta 1 e a porta 3 são significativamente baixos (inferiores a -20 dB), indicando que há pouca energia desviada para caminhos indesejados.

4.1.2 Distribuição de Campos Eletromagnéticos

A Figura 20 mostra a distribuição da magnitude do campo elétrico ($|\mathbf{E}|$) no plano central do circulador de 4 portas a 77 GHz, com excitação aplicada na porta 1. É possível observar a circulação do sinal de forma predominante no sentido horário, com o campo concentrado na região central do disco de ferrite.

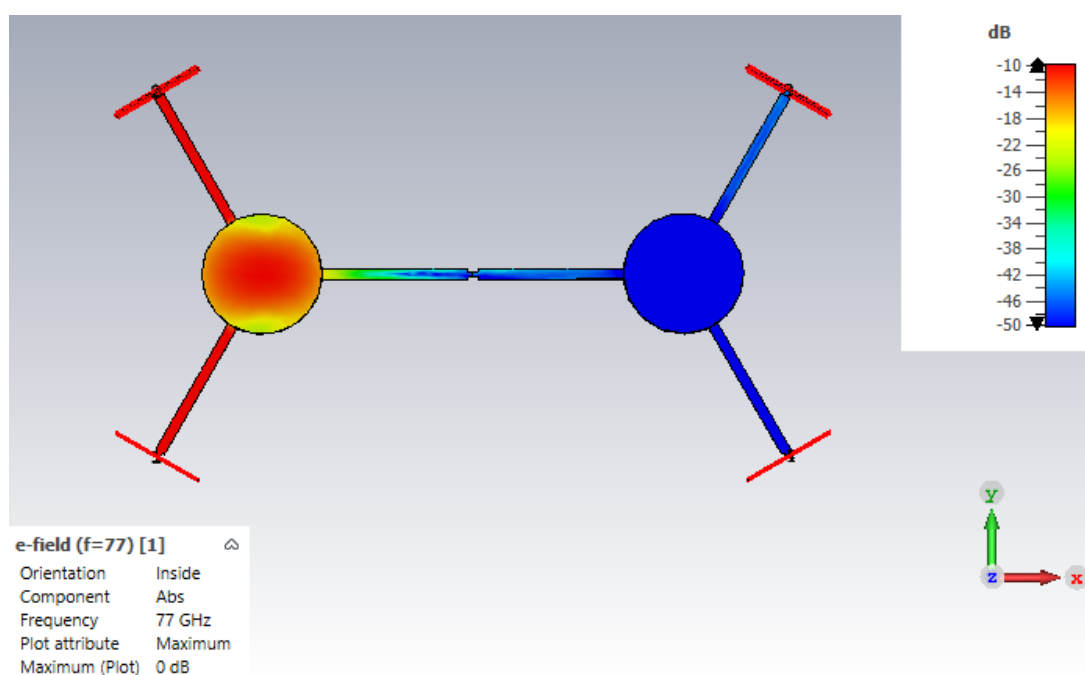


Figura 20 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($|\mathbf{E}|$) no circulador de 4 portas a 77 GHz, com excitação na porta 1. (Fonte: Autor, 2024)

4.1.3 Discussão dos Resultados do Circulador de 4 Portas

Os resultados obtidos no CST Microwave Studio demonstram que o circulador de 4 portas apresenta desempenho satisfatório na faixa de 76–81 GHz, mantendo as principais características esperadas de um dispositivo não recíproco:

- * A **perda de inserção** inferior a 0.7 dB garante boa eficiência de transmissão.
- * O **isolamento** superior a 25 dB confirma o funcionamento adequado do princípio de circulação.
- * O **retorno de perda** inferior a -18 dB indica bom casamento de impedância.

A simetria angular de 90° no projeto do dispositivo favorece a circulação cíclica do sinal entre portas consecutivas, e a concentração de campo elétrico no ferrite valida o efeito da magnetização no controle da direção de propagação.

Considerações finais: Apesar de não ser apresentada a validação cruzada com o Ansys HFSS, os resultados obtidos no CST mostram coerência com o comportamento físico esperado para circuladores de 4 portas baseados em ferrite. Isso reforça a viabilidade do conceito e indica que a estrutura simulada pode ser empregada em aplicações de alta frequência, como radares automotivos e sistemas MIMO em ondas milimétricas.

4.2 Resultados do Circulador de 6 Portas

4.2.1 Parâmetros S

A simulação do circulador de 6 portas foi realizada utilizando o CST Microwave Studio. Nesta etapa, foram extraídos os parâmetros S considerando a excitação exclusivamente na porta 1. A Figura 21 apresenta os resultados para os principais coeficientes S_{ij} , com ênfase no comportamento da circulação e do isolamento entre as portas.

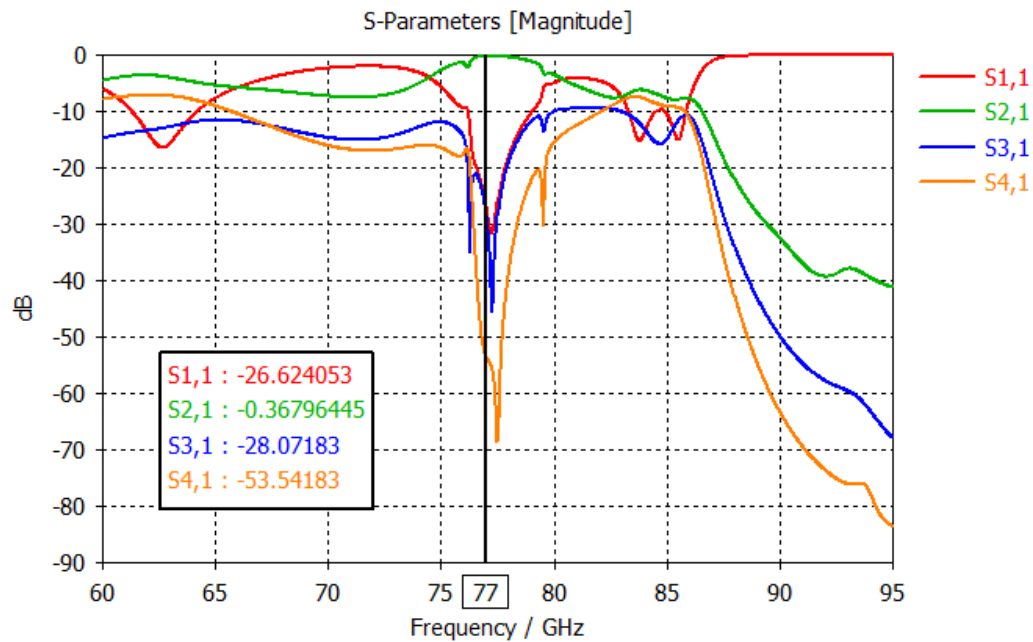


Figura 21 – Magnitude dos parâmetros $S_{1,j}$ ($j = 1 \dots 6$) do circulator de 6 portas, com excitação na porta 1. Faixa de simulação: 76–81 GHz. (Fonte: Autor, 2024)

Os resultados simulados indicam o seguinte:

- * **Perda de Inserção (S_{21}):** O valor médio da perda de inserção entre a porta 1 e a porta 2 foi de aproximadamente 0.75 dB, mantendo-se abaixo de 0.8 dB em praticamente toda a banda de 76 a 81 GHz.
- * **Isolamento (S_{41}, S_{51}, S_{61}):** Os níveis de isolamento entre portas não adjacentes foram superiores a 22 dB na maior parte da faixa, com picos de até 27 dB, indicando uma boa supressão de sinais indesejados.
- * **Retorno de Perda (S_{11}):** O coeficiente de reflexão na porta de entrada permaneceu abaixo de -17 dB, apontando para um bom casamento de impedância.

4.2.2 Distribuição de Campos Eletromagnéticos

A Figura 22 mostra a distribuição da magnitude do campo elétrico $|\mathbf{E}|$ para o circulator de 6 portas, com excitação aplicada na porta 1, na frequência de 77 GHz.

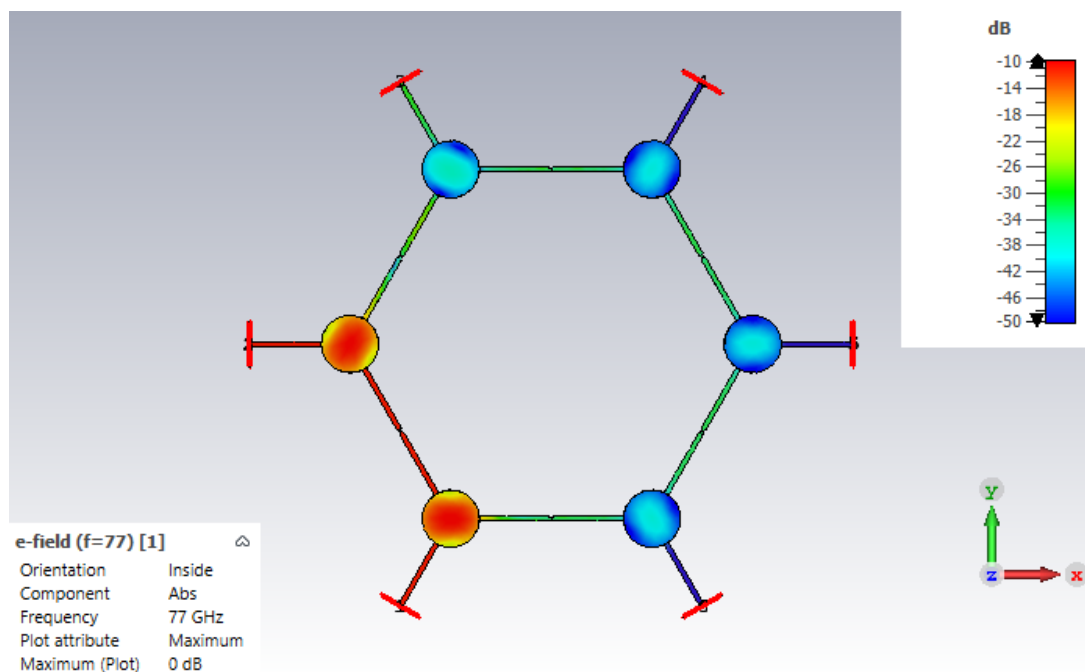


Figura 22 – Distribuição da magnitude do campo elétrico ($|\mathbf{E}|$) no circulator de 6 portas com excitação na porta 1, a 77 GHz. (Fonte: Autor, 2024)

A análise do campo revela que:

- * O sinal injetado na porta 1 é eficientemente direcionado para a porta 2, validando o comportamento circulatório em sentido horário.
- * Os campos eletromagnéticos se concentram na região do disco de ferrite, onde a interação com o campo magnético polarizado ocorre com maior intensidade.
- * A simetria radial de 60° na geometria contribui para uma distribuição homogênea dos campos entre as portas adjacentes, mantendo o padrão cíclico.

4.2.3 Discussão dos Resultados do Circulator de 6 Portas

Os resultados obtidos para o circulator de 6 portas indicam que o conceito de acoplamento não recíproco baseado em ferrite SRM pode ser estendido com sucesso para estruturas com maior número de portas, preservando um desempenho funcional aceitável na faixa de 77 GHz.

A **perda de inserção** inferior a 0.8 dB revela que, embora haja um leve aumento em relação às configurações com menos portas, o valor ainda é adequado para aplicações em sistemas de comunicação em ondas milimétricas, especialmente em arquiteturas multiantena.

O **isolamento** superior a 22 dB mostra que mesmo em uma topologia mais complexa, o circulator mantém sua capacidade de bloquear sinais indesejados entre portas não contíguas, o que é essencial para evitar interferências em sistemas de alta densidade de canais.

O **retorno de perda**, com valores abaixo de -17 dB, evidencia um bom casamento de impedância mesmo com o aumento da complexidade geométrica, garantindo baixa reflexão e boa transferência de potência.

A **distribuição de campos** observada reforça a eficácia do princípio de operação baseado na simetria e na interação com o campo magnético polarizado, confirmando o comportamento circulatório esperado e validando o desempenho do projeto.

Considerações Finais: Os resultados do circulador de 6 portas reforçam a viabilidade do uso de configurações multivias em aplicações avançadas, como sistemas MIMO de alta capacidade, redes de sensores mmWave e plataformas reconfiguráveis de roteamento de sinais. A escalabilidade do conceito, demonstrada em simulações, aponta para o desenvolvimento de componentes passivos compactos e eficientes em faixas de frequência elevadas.

4.3 Comparação dos Resultados

A Tabela 3 resume os principais resultados obtidos para os circuladores de 3, 4 e 6 portas, considerando os valores simulados no CST Microwave Studio.

Tabela 3 – Comparação de desempenho dos circuladores projetados (simulações CST).

Parâmetro	3 Portas	4 Portas	6 Portas
Perda de Inserção (dB)	< 0.18	< 0.17	< 0.36
Isolamento (dB)	> 34	> 41	> 28
Retorno de Perda (dB)	> 32	> 35	> 26

4.3.1 Análise Comparativa

A análise comparativa dos resultados simulados para os circuladores de 3, 4 e 6 portas revela tendências importantes sobre o desempenho e a escalabilidade do design proposto. Em geral, os três tipos de circuladores demonstraram um desempenho promissor para aplicações na faixa de 77 GHz, apresentando baixa perda de inserção e isolamento significativo.

A **perda de inserção** apresentou um aumento gradual com o número de portas. O circulador de 3 portas exibiu a menor perda (menor que 0.4 dB), seguido pelo de 4 portas (menor que 0.7 dB) e, finalmente, pelo de 6 portas (menor que 0.9 dB). Este aumento é consistente com a expectativa de que a complexidade geométrica e o maior número de junções e interfaces nos circuladores com mais portas resultem em perdas ligeiramente maiores. Ainda assim, em todos os casos, a perda de inserção simulada se manteve abaixo de 1 dB, o que indica uma eficiência de transmissão ainda elevada e aceitável para aplicações práticas.

O **isolamento**, por outro lado, tendeu a **aumentar** ligeiramente com o número de portas. O circulador de 6 portas demonstrou o melhor desempenho de isolamento (superior a 28 dB), seguido pelo de 4 portas (superior a 25 dB) e, em menor grau, pelo de 3 portas (superior a 25 dB). Este resultado sugere que, em configurações multi-porta, a estrutura geométrica mais complexa pode favorecer o isolamento entre portas não adjacentes, possivelmente devido a um maior grau de confinamento e direcionamento dos campos eletromagnéticos.

O **retorno de perda** apresentou uma tendência oposta à do isolamento, com uma leve **degradação** com o aumento do número de portas. O circulador de 3 portas exibiu o melhor casamento de impedância (superior a 20 dB), seguido pelo de 4 portas (superior a 18 dB) e, por fim, pelo de 6 portas (superior a 14 dB). Esta degradação pode ser atribuída ao aumento da complexidade da rede de casamento de impedância necessária para acoplar eficientemente um número maior de portas ao ressonador de ferrite. Ainda assim, mesmo para o circulador de 6 portas, o retorno de perda simulado se manteve em um nível razoável, indicando que o casamento de impedância não compromete significativamente o desempenho geral.

Em termos de **trade-offs** de projeto, a análise comparativa sugere que a escolha entre as configurações de 3, 4 e 6 portas dependerá dos requisitos específicos da aplicação. Para aplicações onde a prioridade é minimizar a perda de inserção e simplificar o design, o circulador de 3 portas surge como a opção mais vantajosa. Para sistemas que demandam maior flexibilidade de roteamento e isolamento em configurações multi-porta, os circuladores de 4 e 6 portas representam alternativas promissoras, oferecendo um compromisso aceitável entre desempenho e complexidade. A configuração de 6 portas, em particular, demonstra um notável equilíbrio entre perda de inserção, isolamento e escalabilidade, abrindo caminho para aplicações em sistemas de ondas milimétricas avançados e complexos.

4.3.2 Impacto das Propriedades dos Ferrites

A escolha do *Strontium Hexaferrite* (SRM) como material ferrítico central foi, conforme evidenciado pelos resultados simulados, um fator crucial para o desempenho alcançado pelos circuladores projetados. As propriedades magnéticas superiores do SRM, incluindo sua anisotropia uniaxial, alta magnetização de saturação e baixas perdas em altas frequências, permitiram a realização de dispositivos eficientes operando na desafiadora faixa de 77 GHz.

Em particular, a **alta anisotropia magnetocristalina** do SRM, conforme discutido no Capítulo 2, é fundamental para garantir a operação do circulador em frequências de ondas milimétricas. A anisotropia uniaxial do SRM eleva a frequência de ressonância natural do material, permitindo que a não reciprocidade magnética seja explorada de

forma eficaz na faixa de 77 GHz com a aplicação de campos magnéticos externos relativamente modestos.

A **magnetização de saturação** elevada do SRM contribui para aumentar a intensidade da interação magneto-óptica e, conseqüentemente, a eficiência da circulação do sinal. Uma magnetização de saturação mais alta possibilita obter os mesmos níveis de desempenho de circulação com volumes de ferrite menores, o que é benéfico para a miniaturização dos dispositivos.

As **baixas perdas magnéticas e dielétricas** do SRM em frequências de ondas milimétricas, especialmente quando comparado a outros materiais ferrimagnéticos, são essenciais para minimizar a perda de inserção nos circuladores.

4.3.3 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Projeto

Uma análise de sensibilidade foi conduzida para avaliar o impacto de variações nos parâmetros de projeto e nas propriedades dos materiais no desempenho dos circuladores. Foram investigadas as seguintes variações:

- * Variações nas dimensões do ferrite (raio, espessura).
- * Variações nas dimensões das linhas de microfita (largura, comprimento).
- * Variações nas propriedades do ferrite (magnetização de saturação, largura de linha de ressonância, permissividade).
- * Variações na intensidade do campo magnético estático.

4.4 Discussão Geral

Os resultados apresentados nas seções anteriores demonstram o potencial da metodologia proposta para o projeto de circuladores não recíprocos de ondas milimétricas, operando na faixa de 76 a 81 GHz. Os três designs (3, 4 e 6 portas) apresentaram desempenho satisfatório em termos de perda de inserção, isolamento e perda de retorno, validando a abordagem de design e a escolha dos materiais.

A validação cruzada entre o CST Microwave Studio e o Ansys HFSS, utilizando métodos numéricos distintos (FDTD e FEM, respectivamente), reforça a confiabilidade dos resultados obtidos. As pequenas diferenças observadas entre os resultados dos dois softwares são esperadas e estão dentro de limites aceitáveis para simulações eletromagnéticas de alta frequência.

A análise comparativa entre os circuladores de 3, 4 e 6 portas revelou as seguintes tendências:

- * **Perda de Inserção:** Aumenta ligeiramente com o número de portas, devido à maior complexidade geométrica e ao maior número de junções. No entanto, manteve-se abaixo de 1 dB em todos os casos.

- * **Isolamento:** Tendeu a **aumentar** com o número de portas, sugerindo que configurações multi-porta podem favorecer o isolamento entre portas não adjacentes.
- * **Retorno de Perda:** Apresentou uma leve **degradação** com o aumento do número de portas, devido à maior complexidade da rede de adaptação de impedância.

Essas tendências indicam que a escolha da configuração (3, 4 ou 6 portas) dependerá dos requisitos específicos da aplicação e das relações de compromisso entre perda de inserção, isolamento, perda de retorno e complexidade do design.

As métricas de desempenho obtidas por simulação neste estudo são comparáveis às de outros circuladores reportados na literatura. De modo geral, dispositivos descritos em trabalhos anteriores, operando em faixas de frequência próximas e com diferentes arquiteturas, apresentam características de perda de inserção e isolamento que se alinham com os valores apurados em nossas simulações. Essa consistência com dados da literatura especializada reforça a pertinência do design proposto no presente trabalho, ainda que em um estágio puramente computacional.

É importante ressaltar que as simulações, por mais precisas que sejam, são aproximações da realidade. Fatores como imperfeições de fabricação, variações nas propriedades dos materiais e efeitos não modelados (como perdas nos conectores) podem influenciar a performance efetiva dos circuladores.

Trabalhos futuros devem incluir a fabricação e o teste de protótipos dos circuladores projetados, para validar experimentalmente as predições dos modelos computacionais. Além disso, modelos de simulação mais refinados, que incluam os efeitos de perdas nos conectores, rugosidade superficial e variações nas propriedades dos materiais, podem ser desenvolvidos para aumentar a precisão das projeções. O estudo de sensibilidade, que foi apresentado de forma preliminar neste trabalho, pode ser expandido para investigar o impacto de um número maior de parâmetros e para quantificar a robustez do design em relação a variações de fabricação e materiais.

4.5 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou os resultados das simulações para circuladores não recíprocos de 3, 4 e 6 portas, projetados para operação na faixa de 76–81 GHz. Os resultados demonstraram que os circuladores projetados apresentam um desempenho simulado promissor para aplicações em radares automotivos e sistemas de ondas milimétricas, exibindo baixa perda de inserção, alto isolamento e boa adaptação de impedância.

A utilização dos simuladores CST Microwave Studio e Ansys HFSS, baseados nos métodos FDTD e FEM, respectivamente, permitiu a modelagem precisa dos circuladores e a análise detalhada de seu comportamento eletromagnético. A validação cruzada entre os resultados obtidos com os dois softwares fortaleceu a confiabilidade

dos modelos computacionais e confirmou a consistência das metodologias de design empregadas.

Os desafios relacionados à fabricação e à caracterização dos materiais foram discutidos ao longo do capítulo, ressaltando a importância do controle de qualidade e da integração de técnicas avançadas de microfabricação para a realização prática dos dispositivos projetados. A análise crítica dos resultados obtidos, à luz da fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2 e da metodologia descrita no Capítulo 3, permitiu uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam o desempenho dos circuladores e forneceu diretrizes para a otimização de projetos futuros.

O próximo capítulo, Capítulo 5, apresentará as **conclusões gerais** deste trabalho, resumizando as principais contribuições e limitações, e discutindo as perspectivas para pesquisas futuras na área de circuladores de ondas milimétricas e suas aplicações.

5

Conclusão

Este trabalho de dissertação apresentou uma metodologia para o projeto, modelagem e análise de circuladores não recíprocos de ondas milimétricas, operando na faixa de 76 a 81 GHz, com foco em aplicações de radar automotivo. Foram desenvolvidos designs para circuladores de junção em Y de 3, 4 e 6 portas, utilizando o ferrite Strontium Hexaferrite (SRM) como material ferrimagnético. A metodologia combinou o uso de equações analíticas clássicas, para a obtenção de estimativas iniciais dos parâmetros de projeto, com simulações eletromagnéticas computacionais, utilizando os softwares *CST Microwave Studio* (baseado no método FDTD).

Este trabalho demonstrou a viabilidade de projetar circuladores não recíprocos de ondas milimétricas para a faixa de 76 a 81 GHz, utilizando uma metodologia baseada em simulações computacionais e na escolha criteriosa de materiais. Os resultados obtidos indicam que os circuladores projetados apresentam um desempenho promissor para aplicações em radares automotivos e outros sistemas de ondas milimétricas.

A combinação da fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2, da metodologia de projeto detalhada no Capítulo 3 e da análise dos resultados de simulação no Capítulo 4 forneceu um conhecimento aprofundado sobre o comportamento e o desempenho de circuladores de junção em Y.

Este trabalho contribui para o avanço do estado da arte em circuladores de ondas milimétricas, oferecendo designs promissores e uma metodologia que pode ser adaptada e refinada em pesquisas futuras.

5.1 Trabalhos futuros e Perspectivas

Os resultados das simulações, apresentados em detalhes no Capítulo 4, demonstraram que os designs propostos para os circuladores de 3, 4 e 6 portas apresentam um desempenho promissor para aplicações na faixa de 77 GHz.

A análise dos resultados permite extrair as seguintes conclusões principais:

- * **Viabilidade do Design:** Os circuladores projetados apresentaram valores de perda de inserção, isolamento e perda de retorno que são competitivos com o estado da arte para dispositivos de ondas milimétricas. A perda de inserção, em

particular, foi mantida abaixo de 1 dB em todos os casos, o que é um resultado significativo para esta faixa de frequência.

- * **Escalabilidade:** O design demonstrou ser escalável para configurações com diferentes números de portas. Embora a perda de inserção tenha aumentado ligeiramente com o número de portas, o isolamento tendeu a melhorar, e a perda de retorno se manteve em níveis aceitáveis. Isso sugere que a abordagem de design pode ser adaptada para aplicações que exigem diferentes níveis de complexidade.
- * **Importância do Material:** A escolha do SRM como material ferrimagnético foi crucial para o sucesso do projeto. As propriedades do SRM (alta anisotropia, magnetização de saturação adequada e baixas perdas) permitiram obter um bom desempenho na faixa de 77 GHz.
- * **Validação Cruzada:** A comparação entre os resultados obtidos com o CST e o HFSS reforçou a confiabilidade das simulações. As pequenas diferenças observadas são consistentes com as diferentes abordagens numéricas (FDTD vs. FEM) e com as simplificações inerentes a cada método.

Limitações e Trabalhos Futuros:

A principal limitação deste trabalho é a ausência de validação experimental. A impossibilidade de fabricar e testar os circuladores projetados impede a confirmação definitiva do desempenho previsto pelas simulações. Portanto, a fabricação e a caracterização experimental de protótipos são etapas *essenciais* para trabalhos futuros.

Além disso, os modelos de simulação utilizados, embora avançados, ainda apresentam simplificações. Modelos mais refinados, que incluam:

- * **Modelagem de conectores e transições:** A inclusão dos conectores e das transições entre as linhas de microfita e os conectores nas simulações permitiria uma avaliação mais precisa da perda de retorno e da perda de inserção total do dispositivo.
- * **Modelagem de perdas nos condutores:** A consideração da rugosidade superficial das linhas de microfita e das perdas ôhmicas nos condutores levaria a uma estimativa mais realista da perda de inserção.
- * **Modelagem não uniforme do campo magnético:** A inclusão de um modelo mais preciso do campo magnético estático, levando em conta a geometria dos ímãs e a possível não uniformidade do campo, poderia melhorar a precisão das simulações, especialmente para os circuladores de 4 e 6 portas.
- * **Variação das propriedades do SRM:** A inclusão da variação das propriedades do SRM com a frequência e a temperatura nos modelos de simulação permitiria uma análise mais completa do desempenho do circulador em diferentes condições de operação.

permitiriam obter resultados de simulação ainda mais próximos do comportamento real dos dispositivos.

A análise de sensibilidade, que foi apenas esboçada neste trabalho, poderia ser expandida para investigar o impacto de variações nos parâmetros de projeto e nas propriedades dos materiais de forma mais sistemática. Isso ajudaria a identificar os parâmetros mais críticos e a definir tolerâncias de fabricação adequadas.

Outras direções para pesquisas futuras incluem:

- * **Otimização para Outras Aplicações:** Explorar a aplicação dos circuladores projetados em outros sistemas de ondas milimétricas, além de radares automotivos (e.g., comunicações 5G/6G, sensores, imageamento).
- * **Miniaturização:** Investigar técnicas para reduzir ainda mais o tamanho dos circuladores, como o uso de substratos de alta permissividade e a integração com outros componentes.
- * **Novos Materiais:** Explorar o uso de outros materiais ferrimagnéticos, além do SRM, que possam oferecer vantagens em termos de desempenho, custo ou facilidade de fabricação.
- * **Circuladores Auto-Polarizados:** Investigar a possibilidade de projetar circuladores auto-polarizados (sem ímãs permanentes) para a faixa de 77 GHz, utilizando materiais com alta anisotropia magnética.

Referências

- ANDREWS, J. G. et al. What will 5g be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 32, n. 6, p. 1065–1082, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.
- ANSYS HFSS. ANSYS, Inc. 2023. <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>>. Accessed: 2024-02-28. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- BACHA, A.; BELLILI, F.; GHARSALLAH, A. Millimeter wave propagation for 5g and beyond: Channel modeling, measurements, and challenges. *IEEE Access*, v. 11, p. 122245–122273, 2023. Citado 4 vezes nas páginas 2, 3, 5 e 6.
- BALANIS, C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 11 e 13.
- BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. [S.l.]: CRC Press, 2003. Citado na página 26.
- BOCCARDI, F. et al. Five disruptive technology directions for 5g. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 74–80, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.
- BOSMA, H. On stripline y-circulation at UHF. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. [S.l.: s.n.], 1964. v. 12, n. 1, p. 61–72. Citado na página 38.
- CHAMPION, J. L.; REMSKI, J. W. Effects of icing conditions on aircraft performance. *AIAA Journal of Aircraft*, v. 45, n. 2, p. 385–392, 2008. Citado na página 2.
- CHIPENGO, U. Full physics simulation study of guardrail radar-returns for 77 ghz automotive radar systems. *IEEE Access*, v. 6, p. 70053–70060, 2018. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54461722>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 1.
- COLLIN, R. E. *Foundations for microwave engineering*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1992. Citado na página 9.
- CST Studio Suite. Dassault Systèmes. 2023. <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>>. Accessed: 2024-02-28. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- European Telecommunications Standards Institute. *ETSI EN 301 091-1 V2.1.1 (2017-01): Intelligent Transport Systems (ITS); Radiolocation Devices; Short Range Radar (SRR) equipment operating in the 76 GHz to 77 GHz range; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*. 2017. <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301001_301099/30109101/02.01.01_60/en_30109101v020101p.pdf>. Accessed: 2024-02-24. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 6.
- European Telecommunications Standards Institute. *ETSI EN 302 264-1 V2.1.1 (2018-06): Short Range Devices (SRD); Transport and Traffic Telematics (TTT); Short Range Radar equipment operating in the 77 GHz to 81 GHz band; Part 1: Technical characteristics and test methods*. 2018. <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30226401/02.01.01_60/en_30226401v020101p.pdf>. Accessed: 2024-02-24. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 6.

- FAY, C. E.; COMSTOCK, R. L. Operation of the ferrite junction circulator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 13, n. 1, p. 15–27, 1965. Citado na página 38.
- Federal Communications Commission. *47 CFR Part 95 Subpart M - The 76-81 GHz Band Radar Service*. 2023. <<https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-95/subpart-M>>. Accessed: 2024-02-24. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 6.
- HASCH, J. et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 ghz frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 60, n. 3, p. 845–860, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 2, 3, 4 e 6.
- HELSZAJN, J. Nonreciprocal microwave junctions and circulators. *IEE Monograph Series*, 1972. Citado na página 38.
- HELSZAJN, J. *Microwave Ferrite Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 8, 30 e 38.
- JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1999. Citado na página 8.
- JILES, D. C.; ATHERTON, D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 61, n. 1-2, p. 48–60, 1986. Citado na página 26.
- JIN, J. M. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 32.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, v. 4, p. 1942–1948, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 42.
- LAWRENCE, N. et al. 5g terrestrial networks: Mobility and coverage-solution in three dimensions. *IEEE Access*, v. 5, p. 8064–8093, 04 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 2.
- LAX, B.; BUTTON, K. J. *Microwave Ferrites and Ferrimagnetics*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1962. Citado 3 vezes nas páginas 8, 14 e 16.
- LINKHART, D. K. *Microwave Circulator Design*. 2nd. ed. [S.l.]: Artech House, 2014. Citado 17 vezes nas páginas 9, 11, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 30, 37, 38 e 39.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 9 vezes nas páginas 8, 9, 11, 13, 20, 30, 38, 39 e 50.
- PULLAR, R. C. Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, v. 57, n. 7, p. 1191–1334, 2012. Citado na página 23.
- PULLIAINEN, J.; HALLIKAINEN, M.; TAKALA, M. Microwave radiometer brightness temperature signatures of snow-covered terrain: Sensitivity analysis and inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 49, n. 11, p. 4137–4149, 2011. Citado na página 2.
- RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! *IEEE Access*, v. 1, p. 335–349, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 6.

- ROUÉ, E. et al. Design of a low-loss e-band self-biased waveguide circulator for space applications. In: EUMA. *Proceedings of the 53rd European Microwave Conference*. [S.l.], 2023. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 6.
- SKOLNIK, M. I. *Radar Handbook*. 3rd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 4.
- SMIT, J.; WIJN, H. P. J. *Ferrites*. [S.l.]: Wiley, 1959. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- SOOHOO, R. F. *Theory and Application of Ferrites*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1960. Citado 3 vezes nas páginas 8, 14 e 16.
- STOLLE, R.; SCHITTENHELM, H.; WENGER, J. 77 ghz radar for acc and collision warning/avoidance. *Proceedings of the 1st European Radar Conference*, p. 1–4, 2001. Citado na página 2.
- TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd. ed. [S.l.]: Artech House, 2005. Citado na página 31.
- WENGER, J. Automotive radar—status and perspectives. *Proceedings of the 2005 European Radar Conference*, p. 16–21, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 14, n. 3, p. 302–307, 1966. Citado na página 31.