

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

**Desenvolvimento e Análise de uma Matriz de Butler para
Operação em 26GHz em Sistemas de Comunicação 5G**

Leiry Gabrielle Marques Luz Pinto

Campina Grande - PB

Outubro de 2024

Leiry Gabrielle Marques Luz Pinto

Desenvolvimento e Análise de uma Matriz de Butler para Operação em 26GHz em Sistemas de Comunicação 5G

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenaria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Engenharia Eletricista.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Alexandre Jean René Serres, Dr.
(Orientador)

Campina Grande - PB
Outubro de 2024

Leiry Gabrielle Marques Luz Pinto

Desenvolvimento e Análise de uma Matriz de Butler para Operação em 26GHz em Sistemas de Comunicação 5G

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenaria de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do Grau de Engenheira Ele-
tricista.*

Aprovado em ____ / ____ / ____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Alexandre Jean René Serres

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande - PB

Outubro de 2024

"Dedico este trabalho à minha mãe, Genilda Marques Luz Pinto. Tudo sempre foi e sempre será por ela."

Agradecimentos

Dedico este trabalho à minha mãe, Genilda Marques Luz Pinto, cujo suor, sangue e lágrimas foram derramados para que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui. Tudo sempre foi e sempre será por ela. Sua coragem e seus sacrifícios permitiram que aquela menina ousasse sonhar e, apesar de todas as probabilidades, estivesse aqui hoje testemunhando esses sonhos se transformarem em realidade.

Ao meu pai, Luiz Carlos Pinto da Silva, que debaixo de sol, permitiu que hoje eu pudesse estar aqui, na sombra. Sua labuta tornou esta jornada possível.

Aos meus avós, Cícero Marques Luz, Helena Vilarins Luz, Maria José Pinto e Luiz Ciríaco da Silva (in memoriam), que foram colo e lar, um porto seguro quando o mundo ao redor oferecia caos. Vocês me trouxeram paz, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha madrinha, que incentivou e apoiou minha educação desde a infância, sendo uma referência de força, independência e bravura em um campo em que as mulheres, especialmente em áreas como matemática, ainda não eram bem aceitas. Seu exemplo abriu portas, não só para mim, mas para muitas outras que, como eu, continuam lutando pelo seu espaço nas exatas.

Ao meu namorado, Lucas de Oliveira Lobo, que foi meu norte quando as inseguranças e a ansiedade me tiraram o rumo, o prumo. Com você, descobri que a vida pode ser leve, não importa quantas batalhas ela traga, pois estamos sempre lado a lado para enfrentá-las. Seu amor e paciência me deram forças e coragem para que a conclusão desta jornada fosse possível. Você foi, e é, minha fortaleza.

Ao meu professor, Alexandre Jean René Serres, que hoje chamo de amigo, cuja orientação e paciência foram essenciais nesta caminhada. As oportunidades que me confiou fizeram toda a diferença nos momentos em que precisei que alguém acreditasse em mim.

Aos meus amigos, Lucila, Lara, Thamyris, Rafaella, Caio, Dhara, João Felipe, Larissa, Leticia, Ícaro, Hortência, Juliana, Nivia, companheiros incansáveis de jornadas sem fim durante todos estes longos anos de graduação, a quem ousou dizer que se tornaram uma parte de mim. Vocês restauraram minha força nos dias de cansaço. Nos momentos em que parecia impossível seguir, fomos irmãos, pais, cuidadores uns dos outros. Sem vocês, não sei se teria chegado até aqui.

E assim, com o coração cheio de gratidão e orgulho, dedico por fim este trabalho à todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional ao longo da minha vida. Graças à educação, me tornei a pessoa que eu sou hoje, e tive oportunidades que sequer imaginei serem possíveis. A educação salva. A

educação transforma. A educação liberta.

*“Somando todas
As coisas, é claro, nossa pequena agonia é
Estúpida
E fútil
Mas sinto que os nossos
Sonhos não
São.
E nós não estamos sós”,
(Charles Bukowski)*

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de uma matriz de Butler projetada para operar na frequência de 26 GHz, visando aplicações em sistemas de comunicação 5G. Utilizando ferramentas de simulação eletromagnética, como *Ansys HFSS* e *Keysight ADS*, o projeto foi modelado com o objetivo de otimizar parâmetros críticos como perda de inserção, ganho de antena e comportamento de fase. Os componentes da matriz, incluindo acopladores híbridos, cruzadores e defasadores, foram ajustados para garantir a formação de feixes ortogonais com alta precisão. A análise dos resultados demonstrou a necessidade de ajustes no design para minimizar os erros de fase e perdas de inserção, assegurando a eficiência da matriz em redes de alta frequência. Este estudo contribui para o avanço das tecnologias de *beamforming* aplicadas ao 5G, destacando a importância de uma abordagem otimizada para operar em ondas milimétricas.

Palavras-chave: Matriz de Butler, 5G, Ondas Milimétricas, (*Beamforming*), Simulação Eletromagnética.

Abstract

This work presents the development and analysis of a Butler matrix designed to operate at 26 GHz, targeting applications in 5G communication systems. Using electromagnetic simulation tools such as Ansys HFSS and Keysight ADS, the project was modeled with the aim of optimizing critical parameters like insertion loss, antenna gain, and phase behavior. The matrix components, including hybrid couplers, crossovers, and phase shifters, were adjusted to ensure the formation of orthogonal beams with high precision. The analysis of results highlighted the need for design adjustments to minimize phase errors and insertion losses, ensuring matrix efficiency in high-frequency networks. This study contributes to the advancement of beamforming technologies applied to 5G, emphasizing the importance of an optimized approach for millimeter-wave operation.

Keywords: Butler Matrix, 5G, Millimeter Waves, Beamforming, Electromagnetic Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de blocos da Matriz de Butler	9
Figura 2 – Estrutura do Acoplador Híbrido de 90°	11
Figura 3 – Esquemático do <i>Crossover</i>	12
Figura 4 – Design da Linha de Transmissão para 10 GHz.	19
Figura 5 – Parâmetros S do <i>Crossover</i> ressoando em 10 GHz no <i>Software</i> HFSS <i>Ansys</i>	20
Figura 6 – Design do Acoplador Híbrido de 90° no <i>Software Keysight ADS</i>	22
Figura 7 – Design do Acoplador Híbrido de 90° no <i>Software Keysight ADS</i>	22
Figura 8 – Design do <i>Crossover</i> no <i>Software Ansys HFSS</i>	23
Figura 9 – <i>Phase Shifter</i> no <i>Software Ansys HFSS</i>	23
Figura 10 – Design de Matriz de Butler no <i>Software Ansys HFSS</i> para 26GHz	24
Figura 11 – Ganho do Acoplador Híbrido na Faixa de 22 a 30 GHz.	27
Figura 12 – Fase do Acoplador Híbrido para Frequências entre 24 e 28 GHz.	27
Figura 13 – Ganho do <i>Crossover</i> com Excitação da Porta 1.	28
Figura 14 – Ganho do <i>crossover</i> com Excitação da Porta 4.	29
Figura 15 – Fase na Segunda Saída da Matriz de Butler para Diferentes Comprimentos do <i>Phase Shifter</i>	29
Figura 16 – Fase na Primeira Saída da Matriz de Butler para Diferentes Comprimentos do <i>Phase Shifter</i>	30
Figura 17 – Ganho da Matriz de Butler para Frequências entre 24 e 28 GHz.	31
Figura 18 – Fase da Matriz de Butler para Frequências entre 24 e 28 GHz.	31

Lista de abreviaturas e siglas

1G	Primeira Geração de Redes Móveis
2G	Segunda Geração de Redes Móveis
3G	Terceira Geração de Redes Móveis
4G	Quarta Geração de Redes Móveis
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
ADS	<i>Keysight Advanced Design System</i>
BLC)	Branch Line Coupler
BM	<i>Butler Matrix</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HFSS	<i>High-Frequency Structure Simulator</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
SIW	<i>Substrate Integrated Waveguid</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Organização do Trabalho	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Introdução à Comunicação 5G	4
2.1.1	Evolução das Redes Móveis	4
2.1.2	Especificações Técnicas do 5G	5
2.2	Ondas Milimétricas e Redes 5G	5
2.2.1	Características das Ondas Milimétricas	5
2.2.2	Aplicações das Ondas Milimétricas no 5G	6
2.3	Formação de Feixes (<i>Beamforming</i>) em Arranjos (<i>Arrays</i>) de Antenas	7
2.3.1	Conceito de Formação de Feixes	7
2.3.2	Comparação de Técnicas de <i>Beamforming</i>	7
2.4	Matriz de Butler	8
2.4.1	Histórico e Aplicações da Matriz de Butler	8
2.4.2	Estrutura e Funcionamento da Matriz de Butler	8
2.4.3	Vantagens da Matriz de Butler para Aplicações em 5G	15
2.4.4	Desafios da Implementação de Matrizes de Butler em 26 GHz	15
3	METODOLOGIA	17
3.1	Simulação Eletromagnética	17
3.1.1	Ferramentas de Simulação	17
3.2	Simulação Experimental da Matriz de Butler de 10 GHz	18
3.3	Simulação da Matriz de Butler 26 GHz	20
3.3.1	Validação dos Resultados	24
3.3.2	Otimização do Projeto	24
4	RESULTADOS	26
4.1	Análise do Acoplador Híbrido	26
4.2	Análise do <i>Crossover</i>	27
4.3	Análise do <i>Phase Shifter</i>	29
4.4	Análise da Matriz de Butler	30
5	CONCLUSÕES	33

5.1	Trabalhos Futuros	33
------------	------------------------------------	-----------

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
--	---	-----------

1 Introdução

A quinta geração de redes móveis (5G) está revolucionando as telecomunicações ao permitir velocidades de dados sem precedentes, baixa latência e conectividade massiva. Para suportar esses avanços, é necessário explorar bandas de frequências mais altas, como as ondas milimétricas, que cobrem o espectro de 30 GHz a 300 GHz. Essas frequências oferecem grande capacidade de transmissão e são essenciais para atender à crescente demanda por largura de banda em aplicações como automação industrial, Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) e veículos autônomos (WU et al., 2018). No entanto, o emprego de ondas milimétricas apresenta desafios significativos, como a alta atenuação e a menor capacidade de penetração em obstáculos, o que requer tecnologias avançadas para garantir o desempenho das redes de 5G (HO et al., 2017).

Entre as várias tecnologias de formação de feixes (*beamforming*) disponíveis para lidar com esses desafios, a Matriz de Butler (*Butler Matrix* - BM) se destaca por sua capacidade de gerar múltiplos feixes ortogonais, oferecendo uma solução eficaz para melhorar a cobertura e a eficiência espectral em sistemas de comunicação. A Matriz de Butler, originalmente desenvolvida para sistemas de radar, tem sido adaptada para operar em altas frequências, incluindo as ondas milimétricas, devido à sua simplicidade de implementação e à capacidade de direcionar sinais de forma precisa (DEY; KIRAN; DEY, 2020).

O funcionamento da Matriz de Butler baseia-se em circuitos passivos que, por meio de componentes como acopladores híbridos de 90 graus, *crossover* e defasadores, permitem dividir os sinais de entrada e formá-los em diferentes direções. Essa característica de formação de feixes em múltiplos ângulos é altamente promissora para redes 5G, que precisam otimizar a alocação de espectro e melhorar o desempenho em ambientes densamente povoados (DALL'OMO et al., 2003). A Matriz de Butler facilita a gestão de múltiplos usuários e dispositivos simultaneamente, aumentando a capacidade da rede e a eficiência do uso do espectro (DALL'OMO et al., 2003).

Embora a Matriz de Butler tenha sido projetada inicialmente para frequências mais baixas, seu uso em ondas milimétricas apresenta desafios técnicos que precisam ser abordados. Em frequências como 26 GHz, utilizadas pelas redes 5G, surgem dificuldades como perdas de inserção, erros de fase e maiores exigências de precisão na formação dos feixes. Portanto, a implementação dessa tecnologia requer a otimização dos componentes e a adoção de técnicas avançadas de projeto para garantir um desempenho adequado (HO et al., 2017).

Uma das principais inovações tecnológicas que vêm sendo exploradas para contornar

esses desafios é o uso do Guia de Onda Integrado ao Substrato (*Substrate Integrated Waveguid* SIW), que oferece maior controle sobre a propagação dos sinais em altas frequências. A tecnologia SIW permite reduzir as perdas de inserção e a interferência entre feixes, ao mesmo tempo que mantém a Matriz de Butler compacta e de baixo custo. Estudos recentes indicam que a aplicação da tecnologia SIW em Matrizes de Butler é promissora para otimizar o desempenho de redes 5G operando em ondas milimétricas (HO et al., 2017).

A eficiência da Matriz de Butler em redes 5G está diretamente relacionada à sua capacidade de formar múltiplos feixes simultaneamente, com alta direcionalidade e baixo impacto em termos de perda de sinal. Isso a torna uma solução valiosa para ambientes urbanos densos, onde a alta densidade de usuários exige maior eficiência na gestão do espectro. Além disso, a flexibilidade da Matriz de Butler permite seu uso em diversos cenários de comunicação, desde estações base até aplicações em IoT e sistemas de radar (WU et al., 2018).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar uma Matriz de Butler projetada para operar na frequência de 26 GHz, com aplicação em sistemas de comunicação 5G. A proposta inclui a simulação da matriz e a avaliação de parâmetros como ganho, perdas de inserção, largura de banda e capacidade de formação de feixes, utilizando ferramentas de simulação eletromagnética para garantir que o projeto atenda às exigências das redes 5G. A construção de um protótipo também será realizada para validar os resultados teóricos e verificar o desempenho prático da matriz em ambientes reais

A análise e otimização de uma Matriz de Butler para operação em ondas milimétricas, especialmente na faixa de 26 GHz, são essenciais para garantir que as redes 5G alcancem seu pleno potencial. As inovações tecnológicas necessárias para superar os desafios das frequências mais altas tornam este estudo relevante tanto para a academia quanto para a indústria, contribuindo para o avanço das comunicações sem fio e o desenvolvimento de soluções mais eficientes e confiáveis para a conectividade global (DALL'OMO et al., 2003).

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa Desenvolver e analisar uma Matriz de Butler operando na frequência de 26 GHz, visando sua aplicação em sistemas de comunicação 5G, com foco na eficiência espectral, ganho de sinal e viabilidade prática.

1.2 Objetivos Específicos

Como forma de mapear e organizar as etapas necessárias para atingir o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e simular uma Matriz de Butler para a frequência de 26 GHz;
- Avaliar o desempenho da matriz em termos de ganho, perdas de inserção e largura de banda;
- Testar a viabilidade da matriz em um ambiente de comunicação 5G simulado;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura existente com modelos teóricos.

1.3 Organização do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, que visam organizar o desenvolvimento do projeto de maneira clara e coerente.

No Capítulo 1 é apresentada uma visão geral do trabalho, destacando a motivação, os objetivos e a relevância do desenvolvimento de uma Matriz de Butler para aplicação em sistemas de comunicação 5G operando na frequência de 26 GHz. Também são abordados o problema de pesquisa e a justificativa para a escolha do tema.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre os principais conceitos e tecnologias relacionados ao tema. São discutidos tópicos como a evolução das redes móveis, características das ondas milimétricas e princípios de formação de feixes, além de uma descrição detalhada sobre a Matriz de Butler, seu funcionamento e suas aplicações.

No Capítulo 3 é detalha a metodologia adotada para a concepção e simulação da Matriz de Butler, com foco nas etapas de design, simulação eletromagnética e análise dos resultados obtidos. São descritas as ferramentas de simulação utilizadas, os parâmetros analisados e os processos de otimização aplicados para garantir o desempenho desejado.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações. Os resultados são comparados com os objetivos estabelecidos no projeto, e são discutidos os ajustes realizados para otimizar o desempenho da BM. Também são realizadas comparações com estudos anteriores para validar a eficiência da matriz.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições e os avanços alcançados. Além disso, são discutidas as limitações encontradas e propostas direções futuras para aprimoramento do projeto e expansão das pesquisas, considerando a implementação prática e testes experimentais.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos e tecnologias fundamentais para o desenvolvimento de uma BM em redes 5G operando a 26 GHz. Inicialmente, discute-se a evolução das redes móveis e os desafios que impulsionaram o 5G, abordando as especificações técnicas dessa tecnologia, como o uso de ondas milimétricas. Em seguida, são explorados os princípios de formação de feixes e as características da Matriz de Butler, justificando sua escolha para essa aplicação. Por fim, são discutidos os desafios e estudos relevantes para a implementação e simulação da matriz em altas frequências, fornecendo a base teórica necessária para o projeto.

2.1 Introdução à Comunicação 5G

2.1.1 Evolução das Redes Móveis

A evolução das redes móveis é marcada por avanços tecnológicos significativos, com cada geração oferecendo melhorias em termos de capacidade, velocidade e cobertura. A primeira geração (1G), lançada nos anos 1980, focava exclusivamente em comunicações analógicas de voz. A segunda geração (2G), introduzida no início dos anos 1990, trouxe a comunicação digital com o GSM (*Global System for Mobile Communications*), permitindo não apenas voz, mas também o envio de mensagens de texto com maior confiabilidade (KONG et al., 2022).

No início dos anos 2000, a terceira geração (3G) possibilitou a conectividade móvel com a Internet, proporcionando o uso de dados móveis para navegação e multimídia. A quarta geração (4G), que surgiu em 2010, aumentou drasticamente as taxas de dados por meio da tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), permitindo a transmissão de vídeo em alta definição e o uso de aplicativos intensivos em dados, com latência reduzida (ASLAN et al., 2021).

No entanto, com o crescente número de dispositivos conectados e a maior demanda por conectividade em tempo real, o 4G se mostrou insuficiente, motivando o desenvolvimento da quinta geração (5G). O 5G foi projetado para proporcionar maior capacidade de rede, menores latências e suporte para um número significativamente maior de dispositivos, com foco em novas aplicações, como veículos autônomos e IoT (ASLAN et al., 2021; KONG et al., 2022).

2.1.2 Especificações Técnicas do 5G

A arquitetura do 5G é projetada para operar em três bandas principais de frequência: sub-1 GHz, entre 1 e 6 GHz, e ondas milimétricas acima de 24 GHz. Cada uma dessas bandas oferece diferentes benefícios em termos de cobertura, capacidade e velocidade. A banda de sub-1 GHz oferece maior alcance e é ideal para áreas rurais, enquanto a faixa de 1 a 6 GHz, particularmente a banda de 3,5 GHz, equilibra cobertura e capacidade. Já as ondas milimétricas, como a banda de 26 GHz, oferecem larguras de banda significativamente maiores, mas enfrentam desafios em termos de penetração de sinal e atenuação (HO et al., 2017; WU et al., 2018).

As ondas milimétricas são essenciais para o 5G atingir suas promessas de alta velocidade de dados. Contudo, as frequências mais altas introduzem desafios relacionados à atenuação e à interferência, o que demanda o uso de tecnologias avançadas, como a formação de feixes *beamforming* e o MIMO massivo (*Multiple Input, Multiple Output*). Essas tecnologias permitem o direcionamento eficiente dos sinais, otimizando o uso do espectro e melhorando a cobertura em ambientes de alta densidade (KONG et al., 2022).

Com essas especificações, o 5G proporciona uma plataforma versátil para diversas aplicações, desde a conectividade em áreas urbanas densas até a automação industrial. Tecnologias como a Matriz de Butler desempenham um papel crucial na implementação eficiente do 5G em ondas milimétricas, melhorando a cobertura e a eficiência espectral ao permitir a formação de múltiplos feixes (WU et al., 2018; HO et al., 2017).

2.2 Ondas Milimétricas e Redes 5G

2.2.1 Características das Ondas Milimétricas

As ondas milimétricas cobrem o espectro entre 30 e 300 GHz, e, para aplicações em redes 5G, foram alocadas frequências acima de 24 GHz devido à semelhança em suas características de propagação com a banda EHF. Uma das principais vantagens dessa faixa de frequência é a largura de banda disponível, que permite uma maior taxa de transmissão de dados. Comparadas às frequências mais baixas usadas nas gerações anteriores de redes móveis, as ondas milimétricas podem suportar canais de comunicação mais amplos, proporcionando velocidades muito mais elevadas para os usuários finais. Essa maior capacidade de dados é um dos pilares para a implementação bem-sucedida das redes 5G em ambientes urbanos densos (KONG et al., 2022).

Entretanto, as ondas milimétricas apresentam desafios técnicos importantes. Um dos maiores problemas é a alta atenuação do sinal, o que significa que ele perde potência rapidamente à medida que se propaga. Além disso, essas frequências sofrem com a baixa penetração em obstáculos como paredes, árvores e até mesmo pessoas, o que limita sua

capacidade de fornecer cobertura em grandes áreas ou ambientes com muitos bloqueios físicos. Para mitigar esses efeitos, são necessárias soluções tecnológicas como o uso de antenas direcionais e *beamforming* para focar a transmissão e reduzir as perdas (WU et al., 2018).

Outro fator limitante é que as ondas milimétricas são mais suscetíveis às condições atmosféricas, como chuva e umidade, que podem causar uma degradação adicional do sinal. Devido a essas características, as redes 5G que utilizam ondas milimétricas geralmente têm um alcance menor, o que exige a instalação de mais células pequenas (*small cells*) para cobrir áreas maiores com eficiência (HO et al., 2017).

2.2.2 Aplicações das Ondas Milimétricas no 5G

As ondas milimétricas são fundamentais para que o 5G alcance seus objetivos em termos de alta capacidade e baixa latência, especialmente em ambientes urbanos densos. Essas frequências oferecem uma largura de banda muito maior do que as faixas abaixo de 6 GHz, permitindo que um número maior de dispositivos se conecte simultaneamente sem comprometer a qualidade do serviço. Esse aspecto é particularmente importante em locais com alta densidade de usuários, como centros urbanos, estádios e áreas industriais (ASLAN et al., 2021).

As redes 5G utilizam ondas milimétricas para fornecer serviços como transmissão de vídeo em ultra-alta definição, jogos em tempo real e realidade aumentada/virtual, que exigem grandes quantidades de dados e baixa latência. Além disso, as ondas milimétricas permitem a implementação de tecnologias emergentes como o MIMO massivo, que usa várias antenas para transmitir e receber sinais, aumentando a capacidade e a eficiência da rede (KONG et al., 2022).

Outro uso importante das ondas milimétricas no 5G é a capacidade de suportar comunicações em redes privadas e industriais, onde a confiabilidade e a segurança são críticas. Nesses ambientes, a baixa penetração das ondas milimétricas pode ser vista como uma vantagem, pois ajuda a reduzir a interferência entre redes vizinhas, aumentando a segurança e a privacidade das comunicações. Essa aplicação é especialmente relevante em fábricas inteligentes, instalações de saúde e outras áreas que exigem uma conectividade robusta e segura (HO et al., 2017).

2.3 Formação de Feixes (*Beamforming*) em Arranjos (*Arrays*) de Antenas

2.3.1 Conceito de Formação de Feixes

A formação de feixes, ou *beamforming*, é uma técnica utilizada em arranjos de antenas para direcionar sinais de rádio em ângulos específicos, melhorando a eficiência na transmissão de dados e reduzindo a interferência. Em redes de alta frequência, como as redes 5G que operam em ondas milimétricas, o *beamforming* é essencial para otimizar a comunicação, especialmente em ambientes urbanos densos, onde há alta concentração de dispositivos conectados. O princípio básico da formação de feixes envolve a combinação de sinais de diferentes elementos da antena com fases ajustadas para reforçar o sinal em certas direções e atenuá-lo em outras (SHARIFI et al., 2020).

No contexto das redes 5G, o *beamforming* é especialmente importante devido à alta atenuação e baixa penetração das ondas milimétricas. Ao direcionar o sinal de forma precisa para o dispositivo receptor, o *beamforming* maximiza a eficiência espectral e aumenta a capacidade da rede. Isso é fundamental para suportar a demanda crescente por largura de banda, latência reduzida e conexões confiáveis em áreas com alta densidade de usuários (WU et al., 2018).

Uma das principais vantagens do *beamforming* em redes 5G é a sua capacidade de formar múltiplos feixes simultâneos, permitindo que a mesma antena possa ser utilizada por vários dispositivos ao mesmo tempo, sem interferência mútua. Essa técnica melhora significativamente a eficiência do espectro e a qualidade do serviço, ao direcionar os feixes para os usuários individuais ou grupos específicos de dispositivos conectados (SHARIFI et al., 2020).

2.3.2 Comparação de Técnicas de *Beamforming*

Existem várias técnicas de *beamforming* que podem ser aplicadas em redes de alta frequência, cada uma com suas vantagens e limitações. As lentes de Rotman são um exemplo de tecnologia de formação de feixes utilizada para antenas de múltiplos feixes. As lentes de Rotman são dispositivos passivos que formam vários feixes em diferentes direções, ajustando a fase dos sinais recebidos por uma matriz de antenas. Elas são particularmente eficientes em aplicações que exigem feixes fixos, mas têm a desvantagem de serem volumosas e de difícil integração em sistemas compactos, como os necessários para o 5G (HO et al., 2017).

Outra técnica relevante é a matriz de Nolen, que também é uma rede de alimentação passiva usada para criar múltiplos feixes a partir de uma antena. Assim como a lente de Rotman, a matriz de Nolen é capaz de gerar feixes direcionados, mas apresenta

complexidade em sua implementação e limitações em termos de escalabilidade. Além disso, como em outras técnicas de *beamforming* passivo, a matriz de Nolen é limitada pela quantidade de feixes que pode formar simultaneamente, o que pode ser uma desvantagem em redes com alta densidade de dispositivos, como as redes 5G (WU et al., 2018).

Em comparação com as lentes de Rotman e a matriz de Nolen, a Matriz de Butler se destaca por sua simplicidade de implementação, escalabilidade e capacidade de formar múltiplos feixes ortogonais simultaneamente. A Matriz de Butler é amplamente utilizada em redes 5G devido à sua eficiência em termos de formação de feixes, minimizando as interferências entre eles e otimizando a cobertura em ambientes densamente povoados. Além disso, sua configuração relativamente simples permite que ela seja integrada em sistemas compactos, tornando-a uma solução ideal para redes que operam em frequências elevadas, como as ondas milimétricas (SHARIFI et al., 2020).

2.4 Matriz de Butler

2.4.1 Histórico e Aplicações da Matriz de Butler

A Matriz de Butler foi introduzida por Jesse Butler e Ralph Lowe na década de 1960 como uma rede de formação de feixes para antenas. Originalmente desenvolvida para sistemas de radar, a Matriz de Butler foi rapidamente adotada em outras áreas de comunicações devido à sua capacidade de gerar múltiplos feixes de forma eficiente, sem a necessidade de mover fisicamente a antena. Nas primeiras aplicações, a Matriz de Butler foi usada para melhorar a precisão dos sistemas de radar, permitindo a cobertura de uma ampla gama de direções de forma simultânea e precisa (SHARIFI et al., 2020; HO et al., 2017).

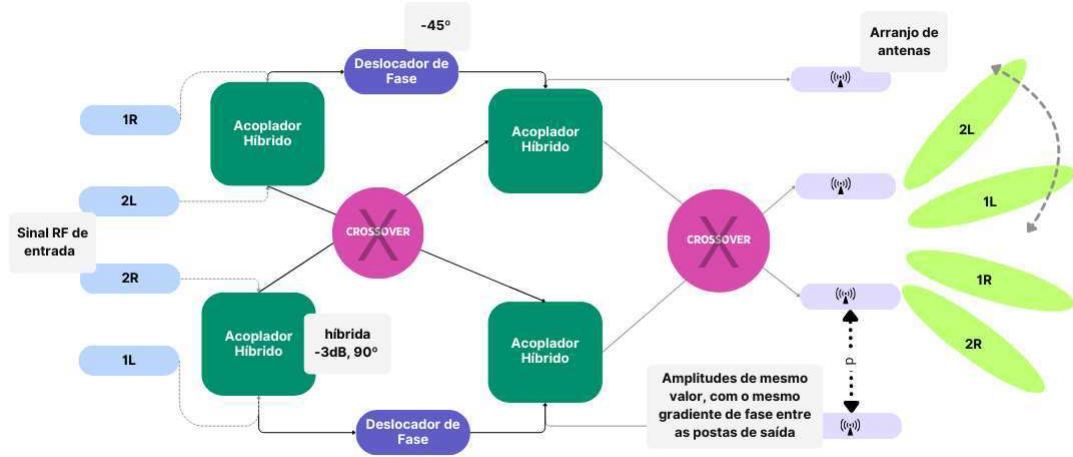
À medida que as comunicações sem fio evoluíram, a Matriz de Butler passou a ser utilizada em sistemas de antenas para satélites, e mais recentemente, em redes de comunicação de alta frequência, como o 5G. Seu comportamento baseado na divisão de um sinal de entrada em vários sinais de saída, cada um com uma fase diferente, permite a formação de múltiplos feixes ortogonais. Assim, essa tecnologia torna-se crucial para otimizar o uso do espectro e melhorar a eficiência espectral em ambientes com alta densidade de dispositivos, como grandes cidades e áreas industriais, devido à sua capacidade de lidar com as altas frequências e a demandas por alta capacidade de dados dessas redes (HO et al., 2017; WU et al., 2018).

2.4.2 Estrutura e Funcionamento da Matriz de Butler

A Matriz de Butler é composta por três componentes principais: acopladores híbridos, *crossovers* e defasadores. A combinação desses elementos permite que a matriz

direcione os sinais em diferentes ângulos, formando múltiplos feixes que podem cobrir uma grande área, como é ilustrado no diagrama de blocos da BM na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de blocos da Matriz de Butler



Fonte: Autoria Própria.

O acoplador híbrido (*Branch Line Coupler* - BLC), também conhecido como acoplador de 3 dB, é um dos principais componentes na Matriz de Butler uma vez que exerce a função de dividir a potência do sinal de entrada em duas saídas com a mesma amplitude, introduzindo uma diferença de fase de 90°. Quando utilizado na BM, ele garante que os sinais sejam distribuídos de maneira uniforme e que os feixes formados tenham direções bem definidas. Em uma Matriz de Butler, os acopladores híbridos não apenas dividem a potência, mas também introduzem as diferenças de fase necessárias para a formação de feixes ortogonais, que é uma característica essencial para a operação em sistemas 5G e de ondas milimétricas. Assim, para uma matriz $N \times N$, o número de acopladores híbridos necessários será dado por:

$$\frac{N}{2} \log_2 N \quad (2.1)$$

(SHARIFI et al., 2020; CAVALCANTE et al., 2022; XIANG et al., 2019; BHOWMIK; SRIVASTAVA; PRASAD, 2014).

O BLC é projetado para dividir a potência do sinal de entrada em duas saídas, mantendo uma diferença de fase de 90° entre elas. A estrutura básica do BLC é composta por linhas de transmissão em microfitas, dispostas de forma a conectar quatro portas, permitindo a transferência de sinal entre elas. A configuração das linhas de transmissão no BLC é definida para que a impedância característica e o comprimento das linhas garantam a divisão de potência desejada, assim como o comportamento de fase esperado (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023; ERRIFI et al., 2016). A configuração padrão

dos acopladores híbridos é projetada para minimizar as perdas de inserção, garantindo uma operação eficiente em frequências elevadas, como 26 GHz, utilizadas nas comunicações 5G. A eficiência dos acopladores híbridos é crítica para a Matriz de Butler, pois qualquer desequilíbrio na amplitude ou fase pode impactar negativamente o desempenho geral da matriz, resultando em degradação da formação de feixes e redução na eficiência da transmissão de sinal (WINCZA; STASZEK; GRUSZCZYNSKI, 2017; GUO; ANSARI; FONSECA, 2021).

A matriz de parâmetros S do BLC é usada para descrever o comportamento de transmissão e reflexão do dispositivo. A matriz é expressa da seguinte forma:

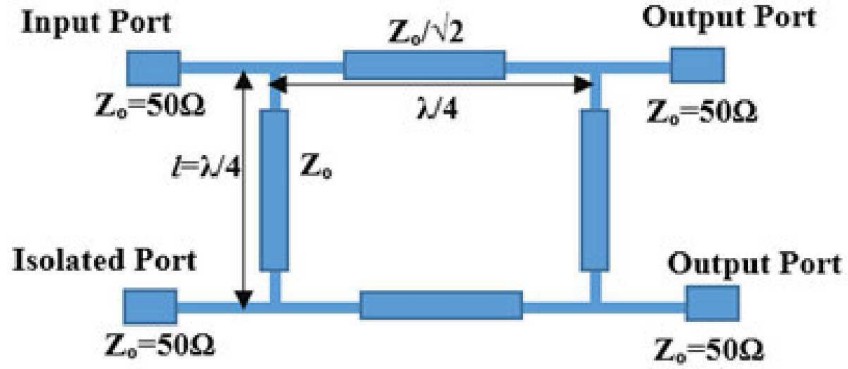
$$(2.2) \quad S = -1 \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix}$$

Essa matriz indica que, ao aplicar um sinal em uma porta de entrada, a potência será dividida igualmente entre as portas de saída, com uma diferença de fase de 90° entre elas, o que é fundamental para a formação de feixes ortogonais na Matriz de Butler (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023; VALLAPPIL et al., 2020).

Para o design do BLC, as linhas de transmissão são projetadas considerando a impedância característica Z_0 , geralmente 50 Ohms, e a impedância das linhas de quarto de onda ($\lambda/4$), como é mostrado na Figura 2. Assim:

$$\lambda_g Z_1 = Z_0/\sqrt{2} = 35.35 \text{ Ohms} \quad (2.3)$$

Figura 2 – Estrutura do Acoplador Híbrido de 90°



Fonte: (VALLAPPIL et al., 2020)

Os comprimentos das linhas de transmissão no BLC são determinados com base no comprimento de onda guiado λ_g . Assim, para determinar o comprimento e a largura:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2}, & \text{for } \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r + 1}{2\epsilon_r} \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right], & \text{for } \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (2.4)$$

onde,

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (2.5)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{w}}} \right) \quad (2.7)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.8)$$

onde ϵ_{eff} é a permissividade efetiva do substrato, obtida a partir da permissividade relativa ϵ_r , f é a frequência de operação e c é a velocidade da luz (CAO; LI; WANG, 2023; MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023).

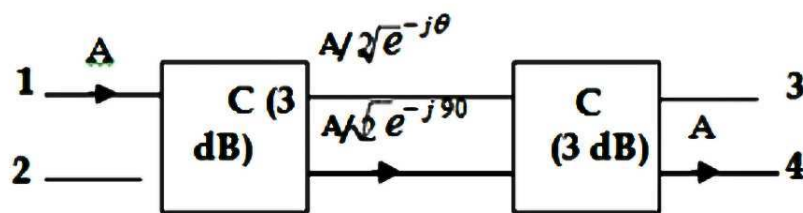
No design para a Matriz de Butler de 26 GHz, como abordado em diversos estudos, os acopladores híbridos são otimizados para operar de forma eficaz em altas frequências, assegurando um bom isolamento entre as portas de entrada e saída e um ajuste preciso das fases dos sinais. Essas otimizações incluem ajustes na geometria das linhas de microfitas

e na escolha de materiais de substrato adequados, como o substrato *Rogers 5880*, que oferece baixa constante dielétrica e perdas reduzidas, essenciais para manter a integridade do sinal em altas frequências (LETAVIN, 2019; GUO; ANSARI; FONSECA, 2021).

O *crossover* é um componente essencial na Matriz de Butler para garantir a passagem de sinais em pontos onde linhas de transmissão se cruzam, sem que ocorra interferência entre eles. Em termos de design, o *crossover* é projetado para permitir que dois sinais que trafegam em direções perpendiculares passem um pelo outro com o mínimo de acoplamento indesejado entre as linhas ou degradação do sinal. Essa característica é fundamental para assegurar a integridade do sinal dentro da Matriz de Butler, especialmente em frequências elevadas como 26 GHz, utilizadas em aplicações de 5G (WU et al., 2018; CAVALCANTE et al., 2022; ERRIFI et al., 2016; DENIDNI; LIBAR, 2003; VALLAPPIL et al., 2020).

O *crossover* é geralmente implementado utilizando uma combinação de acopladores híbridos de 3 dB dispostos em cascata, criando uma configuração que minimiza o acoplamento entre as portas de entrada e saída, ao mesmo tempo em que mantém o equilíbrio de fase e amplitude. Essa estrutura garante que os sinais não interfiram uns nos outros durante o cruzamento, permitindo uma operação eficiente da Matriz de Butler na formação de feixes. Quando utilizado na Matriz de Butler, o *crossover* contribui para a criação de feixes ortogonais, facilitando o direcionamento de múltiplos feixes em sistemas de antenas de comunicação (DENIDNI; LIBAR, 2003; LETAVIN, 2019).

Figura 3 – Esquemático do *Crossover*



Fonte: (LOUATI; OULD-ELHASSEN; CHOUBANI, 2018).

A matriz de parâmetros S do *crossover* de 0 dB é representada da seguinte maneira:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Essa matriz descreve o comportamento do *crossover*, como ilustra a Figura 3

indicando que o sinal aplicado em uma porta de entrada é transmitido para a porta oposta sem introduzir mudanças de fase significativas. Além disso, a matriz evidencia que não há acoplamento de potência para as portas adjacentes, garantindo que o sinal seja cruzado sem interferência entre as linhas de transmissão (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023).

Para o design do 0 dB *crossover*, as linhas de transmissão são configuradas para manter uma impedância característica Z_0 , que geralmente é 50 ohms. A distribuição de potência é mantida uniforme ao longo das linhas, garantindo que as propriedades de fase e amplitude não sejam alteradas durante o cruzamento. O comprimento das linhas de transmissão é determinado com base no comprimento de onda guiado λ_g , calculado conforme:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.10)$$

onde ε_{eff} é a permissividade efetiva do substrato, que depende da permissividade relativa ε_r do material utilizado, como o substrato *Rogers* 5880, adequado para frequências de 26 GHz devido às suas baixas perdas dielétricas (ERRIFI et al., 2016; MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023).

Com esse design, o *crossover* de 0 dB é capaz de operar eficientemente em altas frequências, assegurando que os sinais cruzem sem degradação, o que é essencial para o desempenho da Matriz de Butler em sistemas de comunicação 5G.

Além disso, em frequências como 26 GHz, os (*crossovers*) são projetados para operar de forma ampla, ou seja, com um comportamento uniforme em uma faixa de frequência alargada, o que é crítico para aplicações em ondas milimétricas. Essa adaptação garante que a eficiência do *crossover* seja mantida mesmo em condições de operação extremas, como altas frequências e ambientes com alta densidade de sinais (WINCZA; STASZEK; GRUSZCZYNSKI, 2017).

O *phase shifter* é um componente essencial na Matriz de Butler, sendo responsável por introduzir defasagens controladas nos sinais transmitidos, o que está diretamente relacionado com a formação de feixes direcionais. Na prática, o *phase shifter* é usado para garantir que os sinais em cada porta de saída possuam a diferença de fase correta, permitindo que os feixes sejam formados de maneira precisa e com alta eficiência em sistemas de antenas de múltiplos feixes (ERRIFI et al., 2016; CAO; LI; WANG, 2023; CAVALCANTE et al., 2022; WU et al., 2018).

Os *phase shifters* operam alterando o comprimento efetivo do caminho de transmissão dos sinais, o que resulta em um deslocamento de fase proporcional ao comprimento adicional percorrido pelo sinal. Em termos de projeto, os *phase shifters* podem ser implementados de várias formas, incluindo linhas de transmissão de microfita ajustadas para

obter defasagens específicas, como 45° e 90° , necessárias na Matriz de Butler. O uso de linhas de microfita é comum devido à sua simplicidade de implementação e compatibilidade com frequências elevadas, como 26 GHz (CAO; LI; WANG, 2023; VALLAPPIL et al., 2020).

A matriz de parâmetros S do *phase shifter* ideal é usada para descrever a transmissão do sinal e a introdução de uma defasagem específica no sinal de saída. A matriz de parâmetros S para um *phase shifter* de defasagem ϕ é representada como:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{j\phi} \\ e^{j\phi} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Esta matriz indica que o sinal transmitido pela porta de entrada é transferido para a porta de saída com uma defasagem de ϕ , garantindo que o comportamento de fase esperado seja mantido na Matriz de Butler (VALLAPPIL et al., 2020; MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023).

Para o design de um *phase shifter* em frequências de 26 GHz, é essencial ajustar o comprimento das linhas de transmissão de microfita de modo que a defasagem desejada seja obtida. O comprimento da linha de transmissão é dado por:

$$L = \frac{\phi}{360^\circ} \cdot \lambda_g \quad (2.12)$$

onde λ_g é o comprimento de onda guiado, calculado como:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.13)$$

Neste cálculo, c é a velocidade da luz, f é a frequência de operação (26 GHz) e ε_{eff} é a permissividade efetiva do substrato. A precisão na escolha do comprimento das linhas de transmissão é crítica para garantir que o *phase shifter* funcione corretamente em altas frequências, minimizando perdas de inserção e garantindo a precisão na formação de feixes (VALLAPPIL et al., 2020; MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023).

Adicionalmente, para compensar efeitos de dispersão e perda dielétrica em frequências elevadas, podem ser incorporadas técnicas de ajuste de largura das linhas de transmissão ou o uso de materiais de substrato de baixa perda, como o *Rogers 5880*, que é comumente empregado em sistemas de alta frequência devido à sua baixa constante dielétrica e baixa tangente de perda (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023; ERRIFI et al., 2016).

Para aplicações em ondas milimétricas, como em sistemas 5G, os *phase shifters* precisam ser otimizados para minimizar perdas de inserção e distorções de fase, assegurando uma operação eficiente. Em frequências mais altas, as características de dispersão e as

perdas dielétricas podem afetar a precisão da defasagem, exigindo ajustes mais refinados no design dos *phase shifters*, como o uso de materiais de substrato de baixa perda e técnicas de compensação de fase para melhorar a linearidade (CAO; LI; WANG, 2023; ERRIFI et al., 2016).

2.4.3 Vantagens da Matriz de Butler para Aplicações em 5G

A Matriz de Butler tem várias vantagens que a tornam especialmente adequada para aplicações em sistemas 5G. Uma das principais vantagens é sua simplicidade em comparação com outras técnicas de *beamforming*, como lentes de Rotman ou matrizes de Nolen. A configuração relativamente simples da Matriz de Butler facilita sua implementação em sistemas compactos, o que é essencial para antenas de estações base e dispositivos móveis em redes 5G (CAVALCANTE et al., 2022; HO et al., 2017; VALLAPPIL et al., 2020).

Outra vantagem importante é a capacidade da Matriz de Butler de gerar múltiplos feixes simultâneos, com alta precisão direcional. Isso permite que uma única antena atenda a vários usuários ao mesmo tempo, maximizando a eficiência espectral. Além disso, como os feixes são ortogonais, há pouca ou nenhuma interferência entre eles, o que é crucial para manter a qualidade do serviço em ambientes urbanos densos, onde a interferência entre dispositivos pode ser um problema significativo (SHARIFI et al., 2020).

Além disso, a escalabilidade da Matriz de Butler, o que significa que é possível ajustá-la para operar em diferentes faixas de frequência, incluindo as ondas milimétricas usadas nas redes 5G. Sua capacidade de lidar com frequências elevadas e grandes larguras de banda faz com que seja uma escolha ideal para atender às demandas de dados das redes 5G, especialmente em áreas com alta concentração de usuários e dispositivos conectados, onde a precisão na formação de feixes e a capacidade de gerar múltiplos feixes simultâneos são essenciais (WU et al., 2018).

2.4.4 Desafios da Implementação de Matrizes de Butler em 26 GHz

A implementação de matrizes de Butler em frequências tão elevadas quanto 26 GHz apresenta desafios significativos, principalmente relacionados às perdas de inserção e aos erros de fase. As perdas de inserção são inerentes ao projeto de redes de alimentação passivas, como a Matriz de Butler, e ocorrem devido à dissipação de energia ao longo das linhas de transmissão e componentes. Em frequências elevadas, essas perdas tendem a ser maiores, o que pode afetar diretamente o desempenho da matriz e reduzir a eficiência da formação de feixes (WU et al., 2018).

Os erros de fase também são uma preocupação crítica em matrizes de Butler operando em altas frequências. Na Matriz de Butler, cada feixe gerado depende de uma

defasagem precisa entre os sinais de saída. Pequenos erros de fase podem resultar em direcionamento incorreto dos feixes ou em superposição indesejada de feixes, prejudicando a cobertura e a eficiência espectral da rede. Esses erros de fase se tornam mais pronunciados à medida que a frequência aumenta, tornando necessário um controle rigoroso sobre o design e a fabricação dos componentes, como defasadores e acopladores híbridos ([SHARIFI et al., 2020](#)).

Além disso, a alta sensibilidade das ondas milimétricas a irregularidades no substrato e nas interconexões de microfita pode introduzir variações indesejadas no comportamento do sinal, exacerbando as perdas e os erros de fase. Portanto, garantir a precisão dos componentes e otimizar o layout da matriz são medidas essenciais para minimizar os efeitos adversos em aplicações de 26 GHz ([CAVALCANTE et al., 2022](#)).

3 Metodologia

Após a revisão da literatura e a aquisição de conhecimento sobre o assunto, a metodologia deste trabalho foi estruturada para abordar a simulação e análise de matrizes de Butler em duas fases distintas, visando sua aplicação em sistemas de comunicação 5G. Inicialmente, foi realizada uma simulação de uma BM operando em 10 GHz, com base na reprodução de projetos já estabelecidos na literatura. Essa etapa preliminar teve como objetivo compreender o comportamento do dispositivo em frequências mais baixas e validar as técnicas de simulação adotadas.

Posteriormente, o foco foi direcionado para o desenvolvimento de uma Matriz de Butler projetada para operar na frequência de 26 GHz, que é o principal objetivo deste trabalho. Todas as etapas de simulação foram realizadas utilizando ferramentas avançadas de simulação eletromagnética, como o *Ansys HFSS (High-Frequency Structure Simulator)* e o *Keysight ADS (Advanced Design System)*, que possibilitaram a modelagem precisa dos componentes da matriz, incluindo acopladores híbridos, *crossover* e defasadores. Essas ferramentas também permitiram uma análise detalhada dos parâmetros de desempenho, como perdas de inserção, ganho de antena e comportamento de fase, em condições realistas de operação.

Assim, a metodologia deste trabalho abrange tanto a fase inicial de simulação em 10 GHz quanto o desenvolvimento da matriz em 26 GHz, proporcionando uma base sólida para o estudo e otimização de Matrizes de Butler para aplicações em ondas milimétricas.

3.1 Simulação Eletromagnética

3.1.1 Ferramentas de Simulação

Para o desenvolvimento e avaliação da BM, foram utilizadas duas ferramentas de *software* amplamente reconhecidas no campo da simulação eletromagnética: *Ansys HFSS* e *Keysight ADS*. Essas ferramentas permitem uma modelagem detalhada dos componentes da matriz e a avaliação precisa de seu desempenho em frequências elevadas, como 26 GHz.

- *Ansys HFSS*: É uma plataforma de simulação eletromagnética tridimensional que usa o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) para resolver equações de Maxwell. Ele foi usado para modelar a BM em sua totalidade, desde os acopladores híbridos até os *crossover* e defasadores. O HFSS é particularmente eficaz para calcular a distribuição de campos eletromagnéticos e as características de radiação, além de fornecer visualizações detalhadas dos campos próximos e distantes.

Isso é essencial para garantir que a matriz atenda aos requisitos de desempenho em 26 GHz, minimizando perdas de inserção e erros de fase.

- *Keysight ADS*: É uma plataforma especializada na simulação de circuitos de micro-ondas e alta frequência. No desenvolvimento deste projeto, o ADS foi fundamental para o design inicial dos componentes, utilizando a ferramenta *LineCalc* para validar as dimensões das linhas de transmissão, conforme estabelecido pela literatura. Após as estimativas iniciais de largura e comprimento das linhas, ajustes iterativos foram realizados ao longo do desenvolvimento, com o objetivo de alinhar os resultados aos presentes em estudos acadêmicos de referência.

Além de permitir o cálculo preciso de parâmetros S, como perda de retorno (S_{11}), perda de inserção (S_{12}) e desbalanceamento de fase entre as portas de saída, o *Keysight ADS* oferece uma abordagem otimizada para simulações rápidas de circuitos passivos. Essa capacidade de ajuste fino foi essencial para melhorar o design da matriz de Butler, assegurando a eficiência na formação de feixes e minimizando erros de fase. Juntamente com o HFSS, o ADS forneceu uma análise complementar detalhada das características dos circuitos e das linhas de transmissão, garantindo a precisão no desenvolvimento da matriz em 26 GHz.

Ambas as ferramentas foram usadas em conjunto para garantir que o projeto da BM seja otimizado, tanto no que diz respeito à interação eletromagnética quanto ao comportamento dos circuitos de micro-ondas, além de tornar possível a análise de alguns parâmetros de interesse como perdas de inserção, ganho de antena, comportamento de fase e eficiência na formação de feixes.

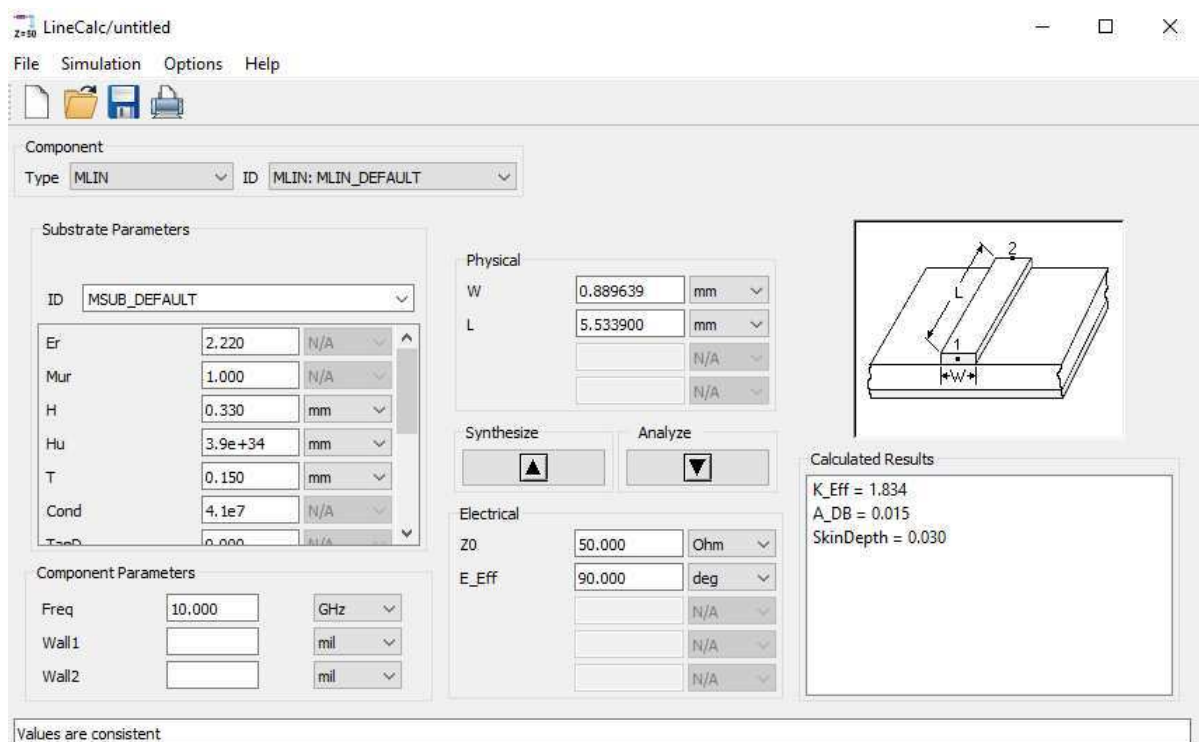
3.2 Simulação Experimental da Matriz de Butler de 10 GHz

Antes de avançar para o desenvolvimento da BM de 26 GHz, que é o principal objetivo deste trabalho, foi realizada uma simulação inicial de uma Matriz de Butler operando na frequência de 10 GHz. Essa etapa foi baseada em um projeto já estabelecido e bem documentado na literatura, desenvolvido por [Errifi et al. \(2016\)](#), sendo essencial para entender o comportamento do dispositivo em frequências mais baixas, o que fornece uma base sólida para o desenvolvimento subsequente em 26 GHz. A escolha da matriz de 10 GHz se justifica por ser uma frequência amplamente estudada e bem documentada, o que permite uma comparação direta entre os resultados obtidos neste estudo e os resultados presentes na literatura existente.

A simulação da BM de 10 GHz foi realizada utilizando as mesmas ferramentas de *software* eletromagnético aplicadas ao restante do projeto, como o *Ansys HFSS* e o *Keysight ADS*. A modelagem incluiu a utilização da ferramenta *LineCalc* para o cálculo

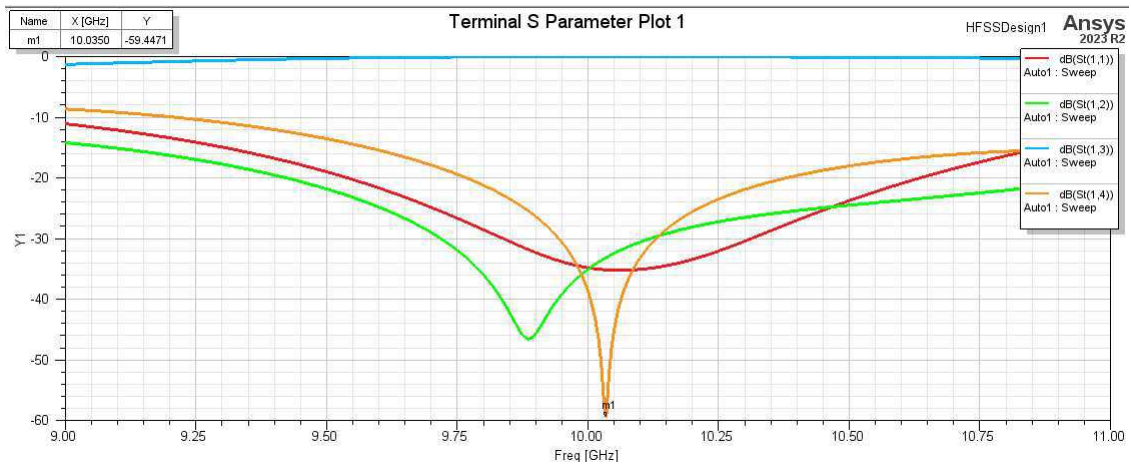
das dimensões das linhas de transmissão (como é apresentado na Figura 4), a configuração completa da matriz, composta por acopladores híbridos, *crossover* e defasadores, seguindo as especificações técnicas descritas no trabalho de referência. Foram analisados os parâmetros de desempenho da matriz, como perdas de inserção, comportamento de fase e ganho de antena, garantindo que o modelo reproduzido fosse fiel ao original. Essa etapa foi fundamental para validar as técnicas de simulação e garantir que os componentes e a rede de alimentação estivessem otimizados para as condições de operação na faixa de 10 GHz.

Figura 4 – Design da Linha de Transmissão para 10 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos com a simulação da BM de 10 GHz foram utilizados como um guia para o desenvolvimento da matriz de 26 GHz. Além disso, é possível averiguar um desses resultados presente na Figura 5, ilustrando como a análise dos parâmetros simulados permitiu identificar comportamentos críticos, como desequilíbrios de fase e perdas de inserção em componentes específicos. Além disso, o estudo inicial da matriz de 10 GHz ofereceu uma valiosa compreensão sobre as adaptações necessárias em frequências mais altas, como a escolha de materiais de substrato de baixa perda e ajustes de *layout* para melhorar o desempenho em ondas milimétricas.

Figura 5 – Parâmetros S do *Crossover* ressoando em 10 GHz no *Software HFSS Ansys*

Fonte: Autoria Própria.

Essa simulação inicial não apenas validou a metodologia utilizada no projeto, mas também forneceu uma compreensão mais profunda das características eletromagnéticas da Matriz de Butler, facilitando o desenvolvimento e otimização subsequente do modelo a 26 GHz, que é o foco principal deste trabalho.

3.3 Simulação da Matriz de Butler 26 GHz

A BM de 26 GHz foi projetada com 4 portas de entrada e 4 portas de saída, permitindo a formação de quatro feixes ortogonais simultâneos. Os parâmetros de desempenho esperados incluem baixa perda de inserção, alta precisão na formação de feixes e minimização de erros de fase, aspectos críticos para sistemas operando em frequências tão elevadas quanto 26 GHz. Para atender a esses requisitos, foi utilizado o substrato *Rogers 5880*, com espessura de 0,127 mm e permissividade relativa de 2,2. Este material foi escolhido devido à sua baixa constante dielétrica e baixa tangente de perda, características que favorecem a eficiência na operação em ondas milimétricas, minimizando as perdas de sinal e garantindo a estabilidade eletromagnética dos componentes. A BM foi simulada para operar na faixa de frequência de interesse, com comprimento de onda de aproximadamente 11,53 mm, valor utilizado para encontrar também as dimensões de comprimento e largura da linha de transmissão, que, inicialmente, foram de:

$$W = 0,39mm$$

$$L = 2,10mm$$

Os parâmetros S, como S_{11} (reflexão) e S_{12} (transmissão), foram monitorados para avaliar a qualidade da transmissão e a eficiência da matriz em minimizar as perdas de inserção e otimizar a formação de feixes ortogonais.

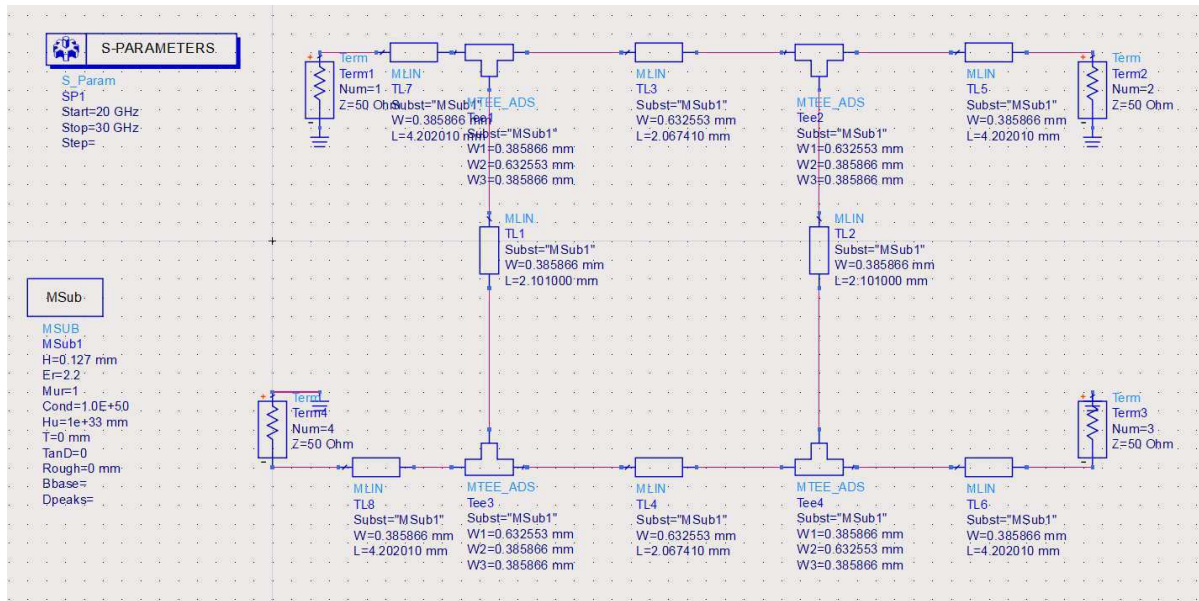
A configuração das simulações começa com a modelagem da Matriz de Butler no *software*. Uma vez que a modelagem e os parâmetros de entrada foram definidos, as simulações foram executadas de maneira que, inicialmente, uma varredura de frequências foi realizada, centrada na faixa de 26 GHz, com uma banda de varredura de aproximadamente 24 GHz a 28 GHz. Isso permitiu uma análise detalhada da resposta da BM em torno da frequência de operação pretendida. Foram ajustados pontos de frequência suficientes para garantir que os detalhes do comportamento dos parâmetros S fossem capturados adequadamente.

Já a malha de simulação foi definida com base nos requisitos de precisão, particularmente na frequência de interesse, 26 GHz. O *Ansys HFSS* permite a geração de malhas adaptativas, que refinam automaticamente as áreas críticas onde os campos eletromagnéticos variam mais intensamente, como nas interações dos acopladores híbridos.

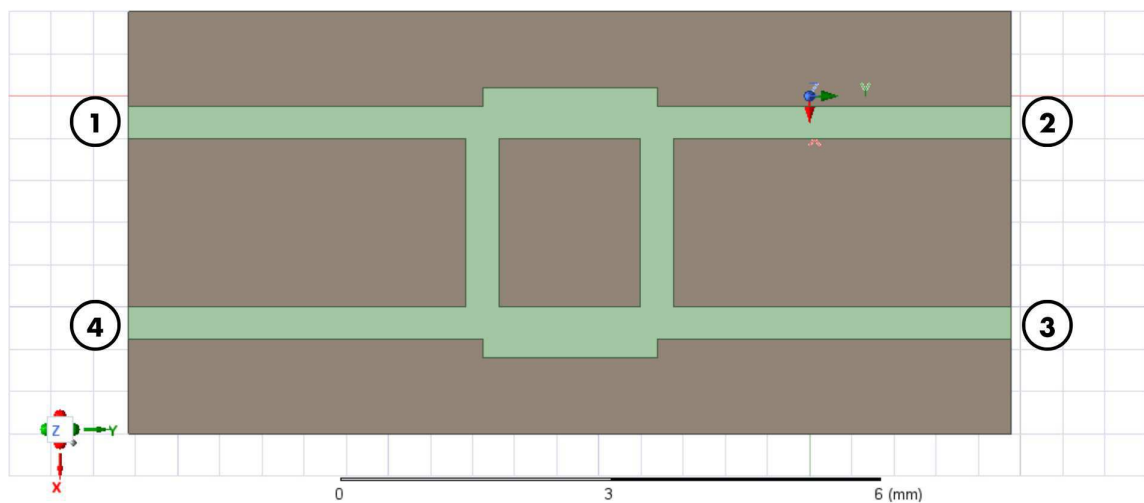
O principal foco da simulação foi a análise dos parâmetros S, que fornecem uma visão completa tanto da transmissão e reflexão de sinais na BM quanto o comportamento de fase, para garantir que os feixes formados tenham a defasagem correta, proporcionando um direcionamento preciso.

Antes de proceder com a simulação da BM totalmente integrada, foi necessário analisar o desempenho de cada um de seus componentes principais de forma individual. Essa abordagem permitiu identificar e corrigir possíveis problemas no comportamento de cada elemento antes da integração final. Os componentes analisados foram: o acoplador híbrido, o *crossover* e o *phase shifter*, todos modelados e simulados utilizando os softwares de simulação *Ansys HFSS* e *Keysight ADS*.

O acoplador híbrido, elucidado nas Figuras 6 e 7, é responsável por dividir a potência do sinal em duas saídas com uma diferença de fase de 90° , foi avaliado segundo parâmetros críticos como perdas de inserção, equilíbrio de amplitude entre as saídas e precisão da defasagem. Essa análise foi fundamental para garantir que o acoplador pudesse distribuir os sinais de forma uniforme dentro da Matriz de Butler, sem introduzir desequilíbrios que comprometessem a formação de feixes ortogonais.

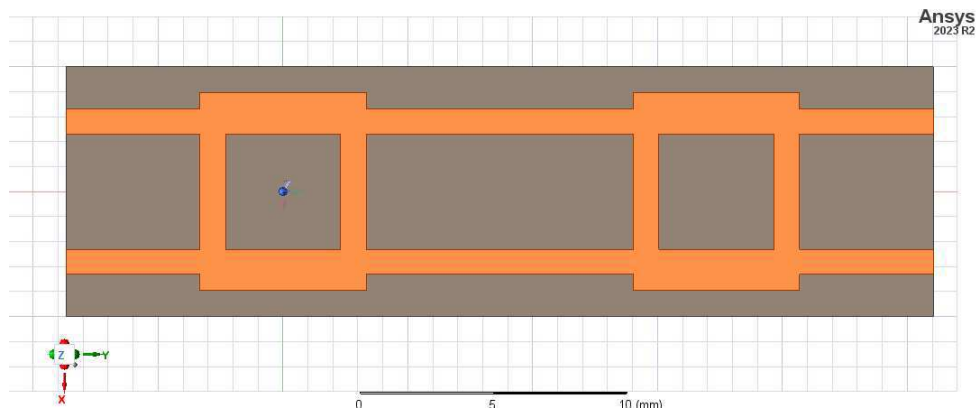
Figura 6 – Design do Acoplador Híbrido de 90° no *Software Keysight ADS*

Fonte: Autoria Própria.

Figura 7 – Design do Acoplador Híbrido de 90° no *Software Keysight ADS*

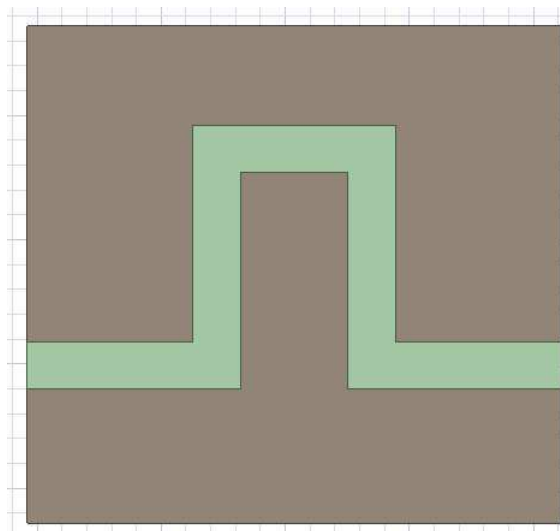
Fonte: Autoria Própria.

O *crossover*, por sua vez, também foi projetado e simulado de forma individual, para permitir a transmissão de sinais nas linhas de transmissão sem interferência significativa. A modelagem no *Ansys HFSS*, mostrada na Figura 8 focou na minimização de acoplamentos indesejados e perdas de sinal durante o cruzamento de sinais perpendiculares. A eficiência do *crossover* foi avaliada em termos de perdas de inserção e isolamento entre portas. Os resultados dessas simulações permitiram ajustes no design do *crossover* para assegurar um desempenho consistente dentro da BM, na frequência de interesse, 26 GHz.

Figura 8 – Design do *Crossover* no *Software Ansys HFSS*

Fonte: Autoria Própria.

Para o *phase shifter*, o qual é apresentado na Figura 9, foi identificado que seu comportamento não poderia ser completamente analisado de forma isolada, uma vez que o mesmo deve ser ajustado para otimizar o desempenho da Matriz de Butler completa. Portanto, a simulação do *phase shifter* foi realizada de modo a garantir que as defasagens nos sinais de saída apresentassem o comportamento esperado para a formação de feixes direcionais.

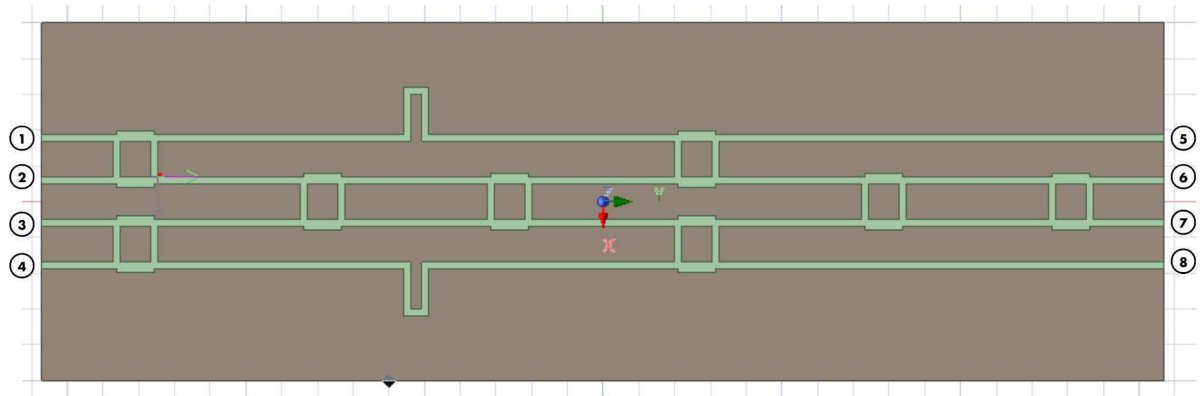
Figura 9 – *Phase Shifter* no *Software Ansys HFSS*

Fonte: Autoria Própria.

A análise individual desses componentes foi essencial para assegurar que cada elemento estivesse otimizado antes da integração completa na Matriz de Butler. Após a validação de cada componente, a BM foi modelada e simulada em sua configuração total, incluindo todos os componentes descritos acima, de forma a garantir um desempenho eficiente em 26 GHz.

Por fim, as simulações com a estrutura integrada, ilustrada na Figura 10, foram realizadas iterativamente, de modo a obter sinais de saída que fossem coerentes com valores encontrados na literatura do tema. Dessa forma, no contexto da matriz completa, foi obtida a seguinte estrutura:

Figura 10 – Design de Matriz de Butler no *Software Ansys HFSS* para 26GHz



Fonte: Autoria Própria.

3.3.1 Validação dos Resultados

A validação dos resultados simulados foi realizada por meio de uma comparação com estudos anteriores encontrados na literatura sobre o uso de Matrizes de Butler em redes 5G, assegurando que os resultados estejam alinhados com as melhores práticas e expectativas para sistemas de alta frequência. Os valores simulados de perda de inserção, ganho de antena e comportamento de fase foram comparados com estudos publicados em revistas científicas e conferências, como em [Ho et al. \(2017\)](#) e [Sharifi et al. \(2020\)](#), que investigam Matrizes de Butler em bandas milimétricas, e serviram de base para avaliar se o desempenho está em linha com os resultados obtidos por outros pesquisadores. Essa validação não apenas confirma a precisão dos resultados, mas também oferece *insights* sobre possíveis melhorias no design, destacando áreas em que a BM pode ser ainda mais otimizada para maximizar sua aplicabilidade em redes de alta frequência.

3.3.2 Otimização do Projeto

Com base nos resultados obtidos nas simulações, foram realizados ajustes no projeto da Matriz de Butler para garantir seu desempenho ideal. Primeiramente, o ajuste de componentes foi realizado com base nos resultados de perdas de inserção e comportamento de fase, ajustando-se as dimensões e o espaçamento dos componentes da matriz, como os acopladores híbridos e os defasadores. A otimização do espaçamento entre os elementos contribuiu para reduzir as perdas de inserção e erros de fase.

Em seguida, considerou-se a modificação de materiais. Dependendo dos resultados das simulações, o substrato utilizado, *Rogers 5880*, pode ter sua espessura variada, visando alterar as dimensões das linhas de transmissão. Para tornar as dimensões dos dispositivos compatíveis com 26 GHz, foi necessário definir a espessura do substrato em 0,127 mm.

O processo de otimização seguiu com iterações da geometria dos dispositivos. Após cada ajuste, novas simulações foram realizadas para verificar se as mudanças na estrutura resultaram em melhorias de desempenho. Esse processo iterativo garantiu que o design final da BM fosse otimizado para operar de maneira eficiente em 26 GHz, com o mínimo de perdas e máxima precisão na formação de feixes.

4 Resultados

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos para os dispositivos isolados da a Matriz de Butler otimizados para 26 GHz, assim como os resultados finais do dispositivo completo.

Após as simulações, os resultados foram coletados e analisados de maneira sistemática, tornando possível obter valores conclusivos de comprimento e largura da linha de transmissão, sendo eles

$$W = 0,39mm$$

$$L = 2,39mm$$

Os quais podem ser analisados como deveras próximos dos resultados calculados por meio da ferramenta *LineCalc*, presente no *Keysight ADS*. Assim, após seguir este processo iterativo, foi possível avaliar alguns dos parâmetros de interesse.

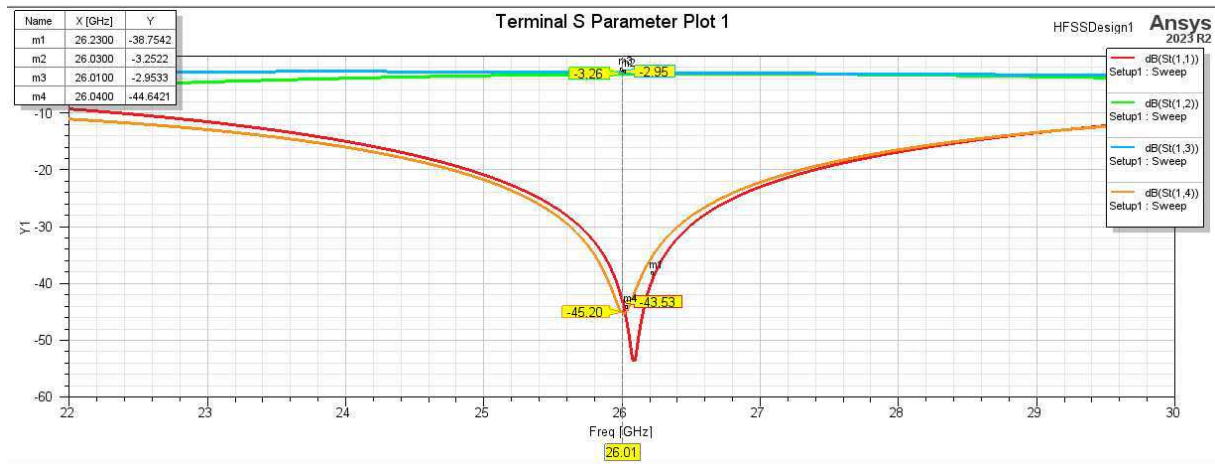
Ademais, foram obtidos os resultados das simulações computacionais necessárias para avaliar o desempenho do acoplador híbrido e do *crossover* isoladamente, considerando parâmetros de interesse. As respostas dos sinais de saída dos parâmetros de interesse serão apresentadas a seguir.

4.1 Análise do Acoplador Híbrido

Na análise de resultados do acoplador híbrido obtido por meio das simulações, observou-se um desempenho consistente na faixa de operação em torno de 26 GHz, conforme exibido nos gráficos do ganho da estrutura e do comportamento de fase.

No gráfico do ganho, apresentado na Figura 11, é possível identificar uma reflexão mínima na porta de entrada, representada pelo parâmetro S_{11} , com valores inferiores a -40 dB na frequência central, indicando uma excelente correspondência de impedância e baixa perda de retorno. Os parâmetros S_{12} e S_{13} , que representam a transmissão do dispositivo, apresentam valores em torno de -3 dB, conforme esperado para um acoplador híbrido ideal, confirmando a divisão de potência uniforme entre as portas de saída. As perdas de inserção também se mantiveram dentro dos limites aceitáveis, o que valida a eficiência do design em alta frequência.

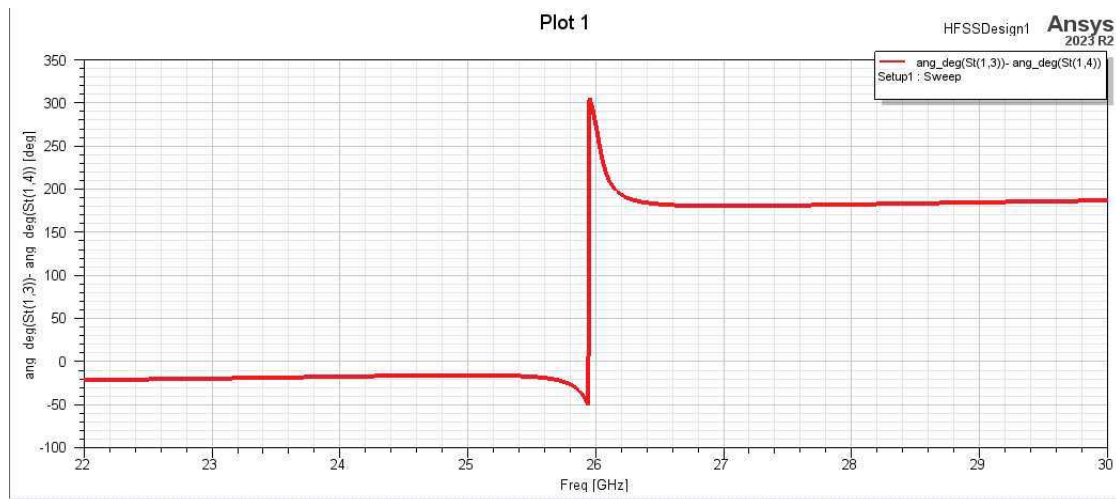
Figura 11 – Ganho do Acoplador Híbrido na Faixa de 22 a 30 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Já no gráfico de fase, ilustrado na Figura 12, foi possível verificar a diferença de fase de 90° entre as saídas, característica essencial para o correto funcionamento do acoplador. Essa defasagem é bem definida na faixa de 26 GHz, com um desvio mínimo fora dessa frequência. A precisão da defasagem contribui diretamente para a formação de feixes ortogonais na matriz completa, demonstrando que o acoplador híbrido foi corretamente projetado.

Figura 12 – Fase do Acoplador Híbrido para Frequências entre 24 e 28 GHz.



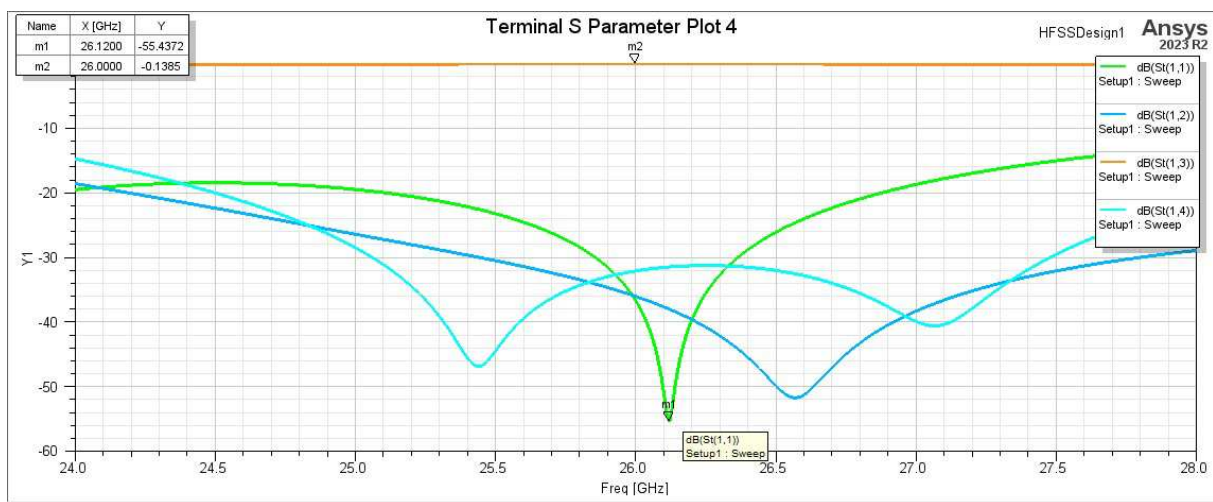
Fonte: Autoria Própria.

4.2 Análise do Crossover

Para a análise do *crossover*, os gráficos do ganho dos parâmetros S fornecem uma visão abrangente do comportamento do dispositivo em termos de transmissão e reflexão de sinal, analisando principalmente o *cross-talk* entre as portas.

No gráfico da Figura 13, que apresenta os parâmetros S com a primeira porta excitada, observou-se que a maior parte da potência do sinal de entrada na porta 1 foi transferida para a porta 3, conforme indicado pelo valor elevado de S_{13} . Esse comportamento é característico de um *crossover* ideal, onde o sinal é transmitido de forma eficaz para a porta de saída perpendicular. Ao mesmo tempo, os valores de S_{11} e S_{14} permaneceram baixos, indicando uma reflexão mínima na porta de entrada e um acoplamento indesejado insignificante para a porta oposta. O parâmetro S_{12} , que representa a transmissão para a porta adjacente, também apresentou valores baixos, reforçando o bom isolamento e a eficiência na separação de sinais.

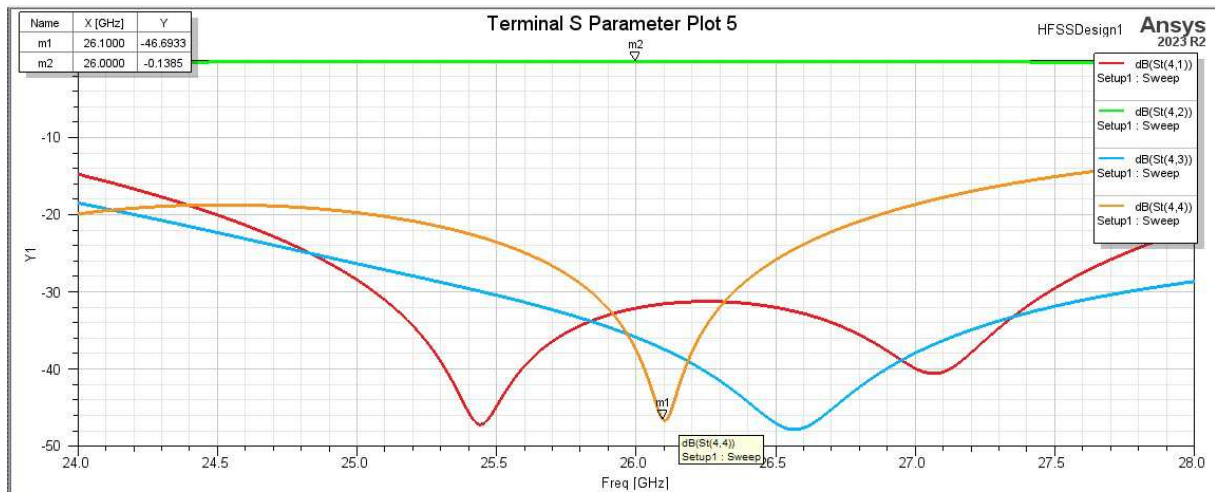
Figura 13 – Ganho do *Crossover* com Excitação da Porta 1.



Fonte: Autoria Própria.

Já o gráfico da Figura 14, que inclui os parâmetros S com a segunda porta de entrada sendo excitada, revelou um comportamento semelhante. A potência injetada na porta 4 foi direcionada predominantemente para a porta 2, como indicado pelo valor elevado de S_{42} , o que confirma a eficiência do *crossover* em permitir o cruzamento de sinais sem acoplamento significativo para as outras portas. Assim como no caso do sinal injetado na porta 1, os valores de S_{41} e S_{44} foram baixos, indicando uma boa correspondência de impedância e baixas reflexões, enquanto o parâmetro S_{43} também apresentou valores baixos, indicando bom isolamento.

Figura 14 – Ganho do *crossover* com Excitação da Porta 4.

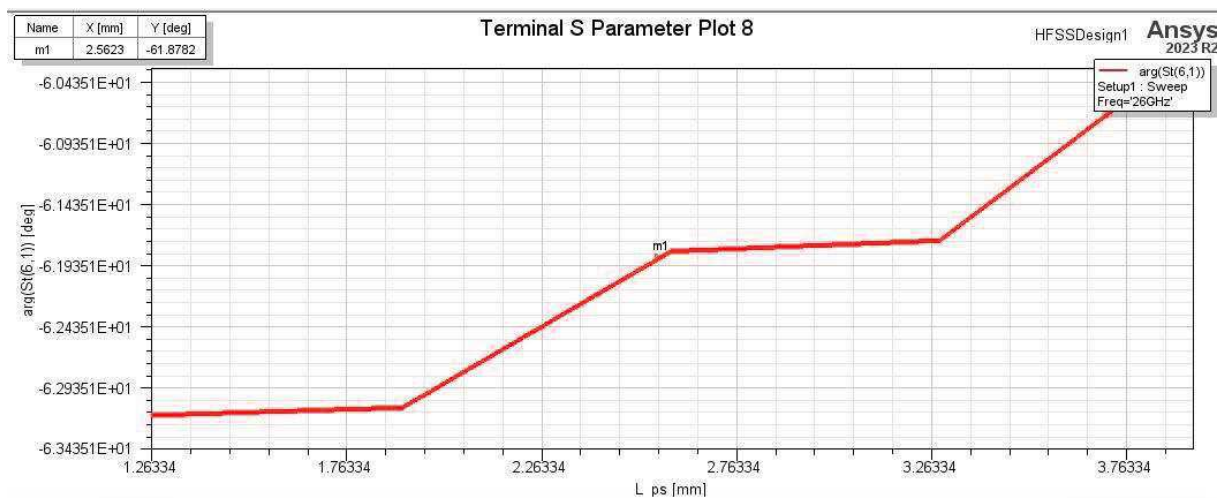


Fonte: Autoria Própria.

4.3 Análise do *Phase Shifter*

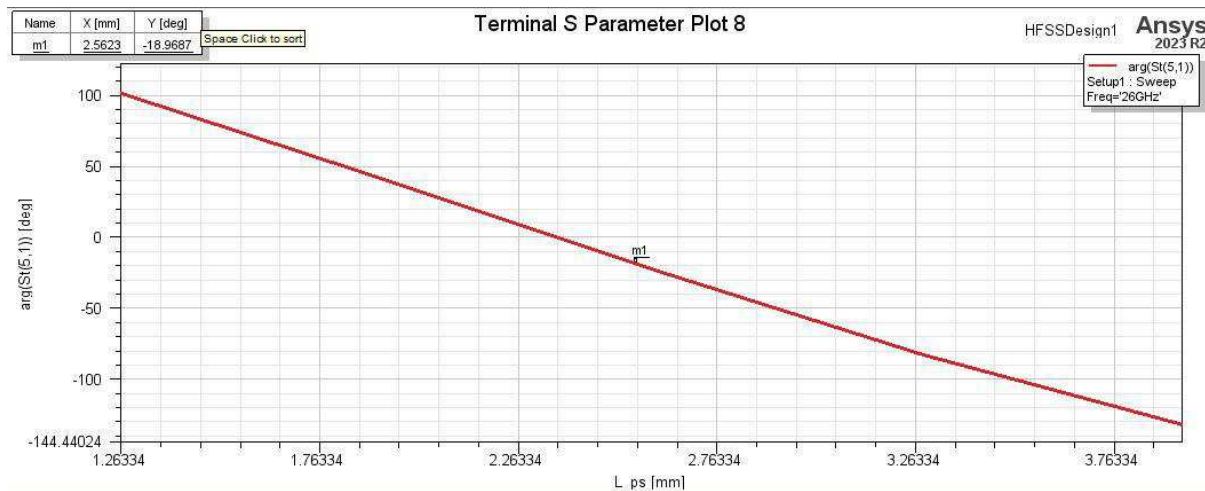
Para a otimização do *phase shifter*, foi necessário simular a Matriz de Butler completa variando o comprimento do *phase shifter*, representado pelo parâmetro L_{ps} , o que tornou possível analisar o comportamento de fase na saída do dispositivo. Por fim, foi escolhido um comprimento final de 2,54 mm para o *phase shifter* para que a diferença de fase entre as portas de saída 5 e 6 fossem de aproximadamente -45° , que pôde ser obtida a partir do valor do ângulo apresentado na Figura 15 subtraído do valor do ângulo ilustrado na Figura 16.

Figura 15 – Fase na Segunda Saída da Matriz de Butler para Diferentes Comprimentos do *Phase Shifter*.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Fase na Primeira Saída da Matriz de Butler para Diferentes Comprimentos do *Phase Shifter*.



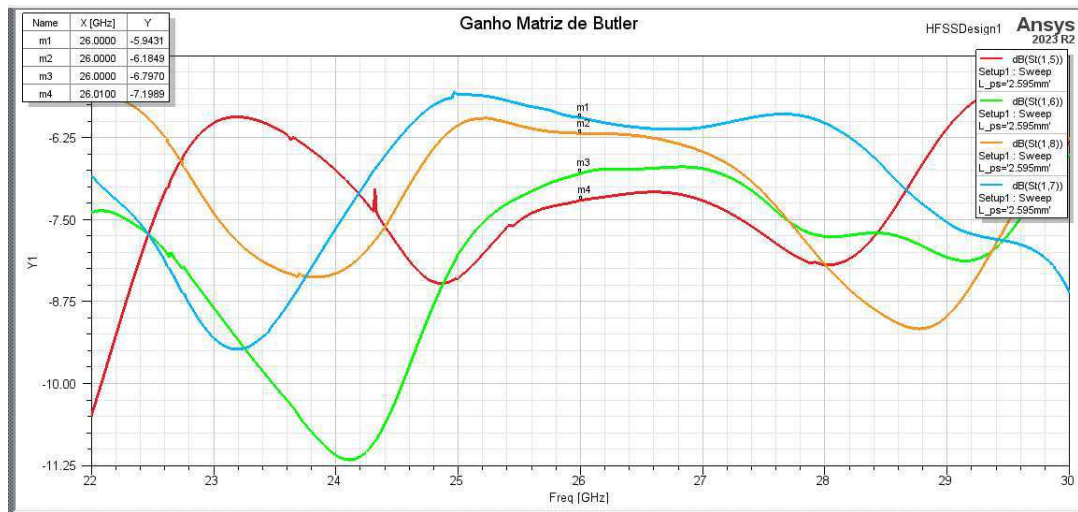
Fonte: Autoria Própria.

4.4 Análise da Matriz de Butler

Por fim, foi realizada a análise da estrutura completa da Matriz de Butler projetada para operar em 26 GHz, com o objetivo de verificar seu desempenho em termos de ganho de transmissão, comportamento de fase e formação de feixes. Essa etapa foi essencial para avaliar a capacidade da Matriz de atingir os requisitos de operação para aplicações em redes 5G, considerando tanto a eficiência do *beamforming* quanto a integridade do sinal. As simulações foram realizadas abrangendo uma faixa de frequências de 24 a 28 GHz, permitindo uma avaliação abrangente do comportamento da matriz em condições realistas de operação.

O gráfico do ganho, apresentado na Figura 17 mostrou que o comportamento de transmissão de potência entre as portas não foi totalmente uniforme. O ganho nas saídas variou mais do que o esperado, com discrepâncias entre as portas, o que pode indicar perdas de inserção desbalanceadas ou problemas de acoplamento dentro da matriz. A variação observada pode estar relacionada à dispersão no substrato, perdas resistivas nos condutores de microfita ou à interação entre os componentes ao longo da matriz, como o *crossover* e o *phase shifter*. (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023; CAO; LI; WANG, 2023).

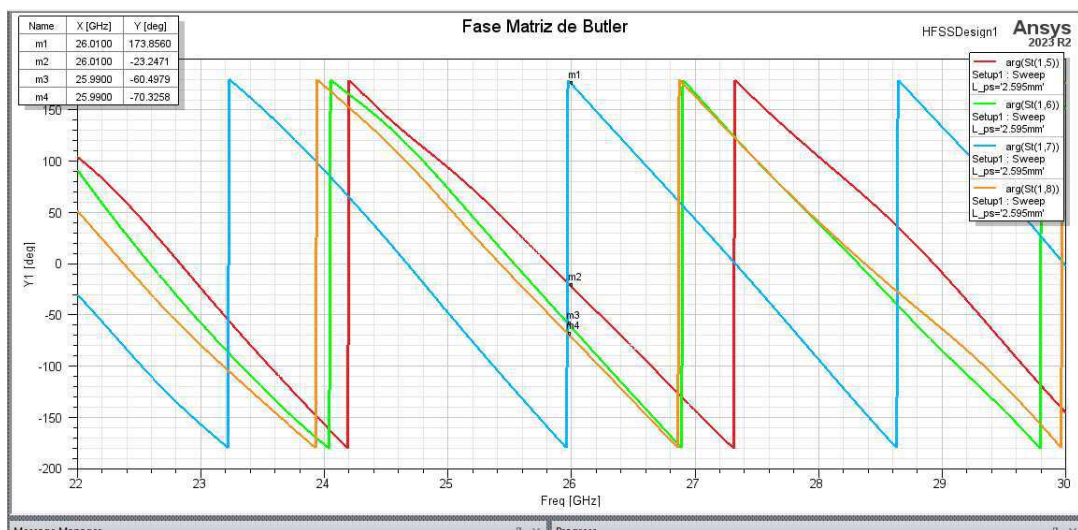
Figura 17 – Ganho da Matriz de Butler para Frequências entre 24 e 28 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Já o gráfico da fase do ganho, apresentado na Figura 18 indica que apenas uma das saídas da Matriz de Butler apresentou a defasagem esperada de -45° , o que é essencial para a formação de feixes ortogonais em sistemas de comunicação 5G. As outras saídas exibiram discrepâncias em relação à defasagem ideal, com variações significativas fora dos parâmetros esperados. Essas inconsistências na fase podem resultar em desvios no direcionamento dos feixes, comprometendo a eficiência do *beamforming*.

Figura 18 – Fase da Matriz de Butler para Frequências entre 24 e 28 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Essa diferença pode ser causada por fatores como desequilíbrios de amplitude nos componentes internos (acopladores e defasadores) e variações na geometria das linhas de transmissão. Ajustes no design, como o refinamento das linhas de microfita ou a inclusão

de técnicas de compensação de fase, podem ser necessários para corrigir esses desvios e garantir que todas as saídas da matriz apresentem defasagens corretas (MANJUNATH; SHARMA; SHANTHI, 2023; ERRIFI et al., 2016).

Os resultados indicam que a Matriz de Butler projetada ainda precisa de otimizações adicionais para atender aos requisitos de formação de feixes ortogonais e de uniformidade de ganho em 26 GHz. Melhorias no design dos componentes individuais podem ajudar a corrigir os desvios de fase e equilibrar as potências entre as saídas, garantindo a formação correta dos feixes e aumentando a eficiência da matriz.

5 Conclusões

O desenvolvimento e a análise de uma matriz de Butler para operação em 26 GHz, com foco em sistemas de comunicação 5G, demonstraram a viabilidade e os desafios envolvidos na implementação desse tipo de estrutura em frequências de ondas milimétricas. A metodologia adotada, baseada exclusivamente em simulações eletromagnéticas utilizando o *Ansys HFSS* e o *Keysight ADS*, permitiu avaliar o desempenho da matriz e ajustar os componentes para otimizar parâmetros de formação de feixes, perdas de inserção e comportamento de fase.

Os resultados obtidos indicaram que, embora o design inicial tenha sido capaz de formar feixes direcionais conforme esperado, ainda foram observadas discrepâncias em termos de precisão de fase e ganho entre as portas de saída. O acoplador híbrido apresentou um comportamento satisfatório em termos de divisão de potência e precisão de fase, enquanto o *crossover* e o *phase shifter* mostraram desafios adicionais, como perdas de inserção e variações de fase que impactaram a eficiência na formação de feixes ortogonais.

Além disso, a simulação inicial da matriz de Butler em 10 GHz forneceu uma base sólida para o desenvolvimento em 26 GHz, permitindo identificar problemas potenciais e otimizar o projeto antes de migrar para frequências mais altas. A escolha do substrato *Rogers 5880* foi validada, apresentando boas características dielétricas e baixas perdas, essenciais para minimizar os efeitos de dispersão e manter a estabilidade do sinal.

5.1 Trabalhos Futuros

Embora os resultados tenham sido promissores, o projeto da matriz de Butler para 26 GHz ainda pode ser aprimorado em futuras investigações. Algumas das possíveis direções para o desenvolvimento futuro incluem:

- **Otimização de Componentes:** Melhorias no design dos componentes individuais, como o *crossover* e o *phase shifter*, podem reduzir ainda mais as perdas de inserção e melhorar o equilíbrio de fase.
- **Integração de Técnicas de Compensação de Fase:** A implementação de técnicas de compensação de fase pode corrigir os desvios observados na defasagem dos sinais de saída, permitindo uma formação de feixes mais precisa.
- **Simulações em Substratos Alternativos:** O uso de substratos com características dielétricas e de perda ainda mais baixas pode ser explorado para melhorar o desempenho em frequências de ondas milimétricas.

-
- **Implementação Experimental:** A construção e teste de um protótipo físico da matriz de Butler são passos importantes para validar os resultados das simulações e ajustar o design com base em medições práticas.
 - **Aplicação em Redes MIMO Massivas:** Expandir o estudo para a aplicação de matrizes de Butler em sistemas MIMO massivos pode potencializar a capacidade das redes 5G e melhorar a eficiência espectral em ambientes urbanos densos.

Referências Bibliográficas

ASLAN, Y. et al. Orthogonal versus zero-forced beamforming in multibeam antenna systems: Review and challenges for future wireless networks. *IEEE Journal of Microwaves*, IEEE, v. 1, n. 4, p. 879–901, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.

BHOWMIK, W.; SRIVASTAVA, S.; PRASAD, L. Design of a low cost 4×4 butler matrix fed antenna array partially loaded with substrate integrated waveguide (siw). *International Journal of Microwave and Optical Technology*, v. 9, n. 3, p. 227–236, 2014. Citado na página 9.

CAO, D.; LI, Y.; WANG, J. Ka-band multibeam patch antenna array fed by spoof-surface-plasmon-polariton butler matrix. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 71, n. 3, p. 2385–2395, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 11, 13, 14, 15 e 30.

CAVALCANTE, C. C. et al. Efficient hybrid a/d beamforming for millimeter-wave systems using butler matrices. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 1001–1013, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 9, 12, 13, 15 e 16.

DALL'OMO, C. et al. Design and realization of a 4×4 microstrip butler matrix without any crossing in millimeter waves. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, v. 38, n. 6, p. 462–465, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

DENIDNI, T. A.; LIBAR, T. E. Wide band four-port butler matrix for switched multibeam antenna arrays. In: IEEE. *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003*. [S.l.], 2003. v. 3, p. 2461–2464. Citado na página 12.

DEY, S.; KIRAN, N. S.; DEY, S. Siw butler matrix driven beam scanning array for millimeter wave 5g communication. In: IEEE. *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. [S.l.], 2020. p. 709–711. Citado na página 1.

ERRIFI, H. et al. Design and simulation of a planar topology butler matrix for 10 ghz switched multibeam antenna. In: *Conference: Congrès Méditerranéen des Télécommunications CMT-2016*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas 9, 12, 13, 14, 15, 18 e 32.

GUO, Y. J.; ANSARI, M.; FONSECA, N. J. Circuit type multiple beamforming networks for antenna arrays in 5g and 6g terrestrial and non-terrestrial networks. *IEEE Journal of Microwaves*, IEEE, v. 1, n. 3, p. 704–722, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 12.

HO, C.-Y. et al. Integrated antenna-in-package on low-cost organic substrate for millimeter-wave wireless communication applications. In: IEEE. *2017 IEEE 67th electronic components and technology conference (ECTC)*. [S.l.], 2017. p. 242–247. Citado 8 vezes nas páginas 1, 2, 5, 6, 7, 8, 15 e 24.

KONG, W. et al. 2-d orthogonal multibeam antenna arrays for 5g millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, IEEE, v. 70, n. 5, p. 2815–2824, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 6.

- LETAVIN, D. A. Planar butler matrix based on compact taps. In: IEEE. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. [S.l.], 2019. p. 1–3. Citado na página 12.
- LOUATI, S.; OULD-ELHASSEN, M.; CHOUBANI, F. Design and performance evaluation of a 4* 4 butler matrix feeding network antennas with 26 ghz. In: IEEE. *2018 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 12.
- MANJUNATH, P.; SHARMA, D.; SHANTHI, P. Design of 4× 4 butler matrix for 5g high band of 26 ghz. In: SPRINGER. *International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering 2018*. [S.l.], 2023. p. 21–36. Citado 7 vezes nas páginas 9, 10, 11, 13, 14, 30 e 32.
- SHARIFI, G. et al. A high gain pattern stabilized array antenna fed by modified butler matrix for 5g applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier, v. 122, p. 153237, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 7, 8, 9, 15, 16 e 24.
- VALLAPPIL, A. K. et al. Butler matrix based beamforming networks for phased array antenna systems: A comprehensive review and future directions for 5g applications. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 3970–3987, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 10, 11, 12, 14 e 15.
- WINCZA, K.; STASZEK, K.; GRUSZCZYNSKI, S. Broadband multibeam antenna arrays fed by frequency-dependent butler matrices. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 65, n. 9, p. 4539–4547, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 13.
- WU, Q. et al. Millimeter-wave broadband multi-beam end-fire dual circularly polarized antenna array. In: IEEE. *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. [S.l.], 2018. p. 823–824. Citado 9 vezes nas páginas 1, 2, 5, 6, 7, 8, 12, 13 e 15.
- XIANG, K.-R. et al. A broadband 3× 4 butler matrix and its application in multibeam antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 67, n. 12, p. 7622–7627, 2019. Citado na página 9.