



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Desenvolvimento de antena inteligente utilizando varredura de
feixe para aplicação WiMax a 5,8 GHz

Rafael dos Santos do Nascimento

Campina Grande, PB
2019

Rafael dos Santos do Nascimento

Desenvolvimento de antena inteligente utilizando varredura de feixe para aplicação WiMax a 5,8 GHz

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Alexandre Jean René Serres

Campina Grande, PB
Junho de 2019

Rafael dos Santos do Nascimento

Desenvolvimento de antena inteligente utilizando varredura de feixe para aplicação WiMax a 5,8 GHz

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em ___/___/___

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Alexandre Jean René Serres

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Dedico ao meu querido avô Manoel.

Agradecimentos

Gratidão primeiramente a Deus por ter me conduzido durante toda minha trajetória até aqui.

Agradeço também à minha mãe por ter me guiado, me orientado e me apoiado em todas as etapas da minha vida pessoal e acadêmica.

Agradeço à minha noiva, Carolina Pedrosa, por ter sido inúmeras vezes companheira de estudos e também incentivadora do meu sucesso, nunca permitindo que eu me abalasse diante as dificuldades encontradas.

Agradeço aos meus amigos de curso por terem sido meu suporte para as disciplinas desafiadoras e terem participado dos momentos bons e também os difíceis dessa graduação, principalmente aos colegas do 2013.1, do laboratório de radiometria e em especial para Marcus Vinicius e Yuri Loia.

Agradeço também a equipe administrativa do DEE, aos professores e colaboradores do curso de engenharia elétrica na UFCG.

Persistência é o caminho do êxito - Charles Chaplin

Resumo

O WiMax é uma tecnologia de comunicação sem fio para longas distâncias e alta taxa de transferência de dados, que atua em faixas de frequências de micro-ondas e permite a utilização de técnicas para aumento da performance como os sistemas de antenas adaptativas (AAS). Esses sistemas podem atuar de diversas maneiras, dentre elas tem-se a alteração da diretividade de uma antena de acordo com o sinal de entrada, que permite fornecer uma potência máxima em determinada direção de propagação (varredura de feixes). Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto de uma antena inteligente com operação em 5,8 GHz composta por uma Matriz de Butler 4x4 e antena planar impressas em substrato FR4 para a realização da varredura de feixes.

Palavras chave: Radiofrequência, Antenas inteligentes, varredura de feixes, WiMax.

Abstract

WiMax is a long distance, high data rate wireless communications technology that operates in millimeter wave frequency bands and allows the use of some performance enhancement techniques such as Adaptive Antenna Systems (AAS). These systems can act in several possible ways, among them is the change in the directivity of an antenna according to the input signal, which allows to provide a maximum power in a certain direction of propagation (beamforming). This work presents the development of the design of a smart antenna with operation in 5.8 GHz composed of a Butler Matrix 4x4 and planar antenna printed on substrate FR4 for the accomplishment of the beamforming technology.

Keywords: Radiofrequency, Smart antennas, beamforming, WiMax

Lista de Figuras

1	OFDM	17
2	Relação entre velocidade de transmissão e mobilidade.	18
3	Topologia genérica de uma rede WiMax.	18
4	Exemplos de antenas	19
5	Exemplo de diagrama de irradiação bidimensional	20
6	Largura de feixes de um diagrama de irradiação	20
7	Diagramas de irradiação de antenas diretivas	21
8	Dispositivo sob testes - Ondas incidentes e refletidas	23
10	Matriz de Butler 4x4	25
11	Acoplador híbrido de 3dB	25
12	<i>Crossover</i>	26
13	Defasador de 45°	26
14	Antena de microfita	27
15	Acoplador híbrido 3 dB simulado	28
16	Acoplador Híbrido - parâmetros S	29
17	Acoplador Híbrido - defasagem entre as portas de saída	29
18	<i>Crossover</i> simulado	30
19	<i>Crossover</i> - Parâmetros S	31
20	Defasador de fase 45°	31
21	Defasador de fase 45° - Coeficiente de transmissão	32
22	Defasador de fase de 45° em 5,8 GHz	32
23	Dimensões da linha de transmissão sem defasagem	32
24	Linha de transmissão sem defasagem em 5,8 GHz	33
25	Antena planar projetada para 5,8 GHz	34
26	Antena planar - Coeficiente de reflexão	34
27	Antena planar - Diagrama de irradiação	34
28	Matriz de Butler desenvolvida	35
29	Matriz de Butler - Parâmetros de espalhamento das entradas	36
30	Matriz de Butler - Parâmetros de espalhamento das saídas	36
31	Defasagens de cada saída com referência na porta de entrada	37
32	Gráfico polar das defasagens de cada saída com referência na porta de entrada	37
33	Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 1 alimentada	38
34	Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 2 alimentada	39
35	Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 3 alimentada	39
36	Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 4 alimentada	40
37	Primeiro passo para modificação de porta alimentada	42
38	Segundo passo para modificação de porta alimentada	42

Lista de Tabelas

1	Alocação mundial das faixas licenciadas e isentas de licença.	16
2	Diferenças de fases entre saídas para uma matriz de Butler 4x4	24
3	Diferenças de fases entre saídas com a entrada 1 alimentada para uma matriz de Butler 4x4	38

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Metodologia	14
2	Revisão bibliográfica	15
2.1	Redes WiMax móveis	15
2.1.1	Histórico da tecnologia	15
2.1.2	Visão geral do WiMax	15
2.1.3	Camada física	16
2.1.4	Recursos avançados para aprimoramentos de desempenho	16
2.1.5	Aplicações	17
2.2	Teoria de antenas	18
2.2.1	Diagrama de irradiação	19
2.2.2	Diretividade	20
2.2.3	Eficiência da antena	21
2.2.4	Ganho	22
2.2.5	Parâmetros de espalhamento (S)	22
2.3	Técnica de varredura de feixes	23
2.4	Matriz de Butler	24
2.5	Componentes da Matriz de Butler 4x4	24
2.5.1	Acoplador Híbrido de 3dB	24
2.5.2	Crossover	25
2.5.3	Defasador de 45°	26
2.6	Antena planar	26
3	Projeto da antena inteligente	28
3.0.1	Acoplador Híbrido de 3dB	28
3.0.2	Crossover	30
3.0.3	Defasador 45°	30
3.1	Antena planar	33
3.2	Conjunto para realização da varredura de feixes (<i>beamforming</i>)	35
4	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	41
5	Anexos	41
5.1	Modificação da porta alimentada no HFSS	41

1 Introdução

Antenas planares são largamente utilizadas em sistemas de comunicações sem fio por conta das suas características de baixo custo, fácil modelagem e boas características de ganho e diretividade [1]. Embora em grande parte das aplicações a utilização desse tipo de antenas seja promissora, existem determinados sistemas em que há a necessidade de estruturas mais robustas e com características específicas, como, por exemplo, características de antena inteligente.

O conceito de antena inteligente define estruturas que possuem características mais específicas e inovadoras, muitas vezes configuráveis, além da propriedade de irradiação eletromagnética de uma antena comum. Na literatura existem diversos tipos de antenas inteligentes, tais como a matriz de antena com regulagem de fase dinâmica (*Phased Array*), Processamento Espacial (*Spacial Processing*), varredura de feixes (*Beamforming*), sistemas de Antenas Adaptativas (*Adaptive Antenna Systems*), dentre outras [12].

O sistema de comunicação WiMax é uma tecnologia que atua em diferentes faixas de frequência e possui aplicações diversas por conta da capacidade de comunicação sem fio em grandes distâncias e com altas taxas de transmissão. Dentre as suas características, existem alguns recursos avançados para aprimoramento do desempenho do WiMax e dentre esses recursos está a possibilidade de adaptação das antenas para execução de varredura de feixes, ou seja, há a possibilidade de utilização de antenas inteligentes nesses protocolos de comunicação [8].

A execução deste trabalho de conclusão de curso propõe um sistema de antena inteligente com varredura de feixes para aplicação no WiMax à 5,8 GHz. A metodologia utilizada, modelagens realizadas e resultados obtidos serão descritos neste relatório.

1.1 Motivação

A demanda por acesso a Internet sem fio cresce anualmente devido a diversos fatores, sendo alguns deles o crescimento das cidades e o processo de globalização. Sendo assim, cada vez mais são necessárias novas tecnologias de redes para suprir toda essa demanda.

O WiMax (Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas) é um sistema de comunicação sem fio para longas distâncias e alta taxa de transferência de dados. Essa tecnologia possui regulamentações que permitem a utilização de antenas inteligentes para que melhorias estruturais sejam realizadas, tais como aumento da taxa de transmissão, diminuição de erros de comunicação e aumento na distância de comunicação [1].

A motivação do projeto de conclusão de curso nessa área de comunicações sem fio é propor um sistema que contribua positivamente em determinadas características de sistemas de comunicações sem fio, tais como aumento do alcance do sistema, melhoria na comunicação, etc.

A tecnologia a ser desenvolvida é um sistema de antenas adaptativas (AAS) que realiza a varredura de feixes (*beamforming*) para fornecer uma potência máxima em determinada direção de propagação.

O sistema de varredura de feixes proposto pode ter aplicações em diversos tipos de comunicações sem fio, tais como o WiMax, Wi-Fi, redes móveis 3G, LTE, 5G.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O trabalho realizado tem como objetivo principal desenvolver um sistema de antena inteligente utilizando o *beamforming* para aumentar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio WiMax à 5,8 GHz.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisa bibliográfica sobre o a tecnologia WiMax e suas aplicações;
- Pesquisa bibliográfica sobre teoria de antenas e topologias que permitam a varredura de feixes e concepção de antenas;
- Simulação do sistema de uma antena inteligente e análise dos resultados;
- Validação dos resultados para a aplicação desejada.

1.3 Metodologia

As etapas metodológicas estão descritas a seguir, podendo algumas delas serem realizadas simultaneamente ou retomadas com o objetivo de validação teórica e/ou experimental. A metodologia a ser empregada neste trabalho envolve a realização de pesquisa e atualização bibliográfica sobre o tema proposto.

Inicialmente, serão investigadas as topologias que apresentam bons resultados para o *beamforming* presentes na literatura, como a matriz de Butler. Novas estruturas serão simuladas utilizando o software ANSYS[®] HFSS, adequando as topologias para a frequência desejada. Após isso, o projeto de uma antena com frequência de operação será realizado afim de aumentar o ganho do sistema.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Redes WiMax móveis

2.1.1 Histórico da tecnologia

A história do WiMAX começa nos anos 90 com a percepção de que haveria um aumento significativo no tráfego de dados nas redes de telecomunicações. Com redes cabeadas sendo muito caras, especialmente em áreas periféricas e não instaladas em muitos países, os métodos de fornecimento de banda larga sem fio foram investigados [1].

A evolução histórica da padronização do WiMax iniciou-se com a caracterização da norma 802.16 realizada pelo IEEE em 1999, sob o Comitê de Padrões IEEE 802 LAN / MAN. Em dezembro de 2001, o primeiro padrão 802.16a foi aprovado e foi seguido por duas alterações no padrão básico 802.16. Estas alterações abordaram questões relativas ao espectro de radiofrequências e à interoperabilidade e foram abrangidas pelas designações 802.16a e 802.16c [8].

Em setembro de 2003, um grande projeto de revisão foi iniciado com o objetivo de alinhar os padrões a nível mundial. Também se destinava a incorporar especificações de teste de conformidade dentro do padrão geral. O projeto foi concluído em 2004 e o padrão foi lançado como 802.16d.

Essa etapa do padrão do IEEE proporcionou ao sistema o suporte para antenas MIMO (*Multiple Inputs Multiple Outputs*), aumentando a confiabilidade do alcance de sinais, além do uso de sub canalização, suporte para antenas inteligentes, etc.

Em 2005, o padrão IEEE 802.16e surgiu para definir padrões específicos para a rede WiMax móvel, definindo faixas de frequências licenciadas e não licenciadas entre 2 e 6 GHz, mobilidade de até 60 km para as redes móveis e controle de potência, além da utilização de modulação S-OFDMA.

2.1.2 Visão geral do WiMax

A comunicação com altas taxas de dados e grande mobilidade é um dos grandes desafios para as redes sem fio, porém o WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* ou Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas) surge como uma opção para solucionar essa problemática nos produtos sem fio de banda larga. Nessa seção do relatório o objetivo é fornecer um estudo inicial a respeito das características do WiMax.

Em redes em áreas metropolitanas, o WiMax proporciona conectividade *wireless* para usuários fixos e móveis, oferecendo uma área de serviço que pode alcançar até dezenas de quilômetros, permitindo a conexão de banda larga sem necessidade de uma linha visada com a estação base, ofertando altas taxas de transferência de dados. [8]

Existem certas características que formam os diversos benefícios proporcionados por esse tipo de rede, dentre eles:

- Qualidade do Serviço;
- Suporte para antenas inteligentes;
- Diminuição dos custos de infra-estrutura de banda larga;
- Redução dos custos de tecnologia;
- Altas taxas de dados como a Wi-Fi e maior mobilidade como as redes móveis.

As restrições para a utilização das faixas de frequência são realizadas segundo os órgãos regulamentadores mundiais e, além disso, cada país é responsável de licenciar o uso dessa tecnologia. Na tabela 1 é possível verificar como cada região geográfica regulamenta e define o conjunto de faixas licenciadas e isentas de licenças.

País/Área Geográfica	Faixas utilizadas
América do Norte, México	2,5 GHz e 5,8 GHz
América Central e do Sul	2,5 GHz, 3,5 GHz e 5,8 GHz
Europa Ocidental e Oriental	3,5 GHz e 5,8 GHz
Oriente Médio e África	3,5 GHz e 5,8 GHz
Ásia e Pacífico	3,5 GHz e 5,8 GHz

Tabela 1: Alocação mundial das faixas licenciadas e isentas de licença.

Observa-se na tabela 1 que as faixas de frequências predominantes são correspondentes a 3,5 GHz e 5,8 GHz, onde a primeira trata-se de uma solução licenciada e a segunda não licenciada. Para as faixas licenciadas, o serviço possui melhor qualidade, maior recepção sem linha de visada, frequências mais baixas e maior controle de acesso, entretanto, a utilização para transmitir nessa banda é mais restrita devido a grande demanda. Já para as frequências mais altas, algumas das características citadas anteriormente perdem a eficiência, todavia, a utilização é livre e menos burocrática do que a faixa licenciada.

2.1.3 Camada física

A camada física do WiMax é baseada no OFDM e OFDMA (*Orthogonal frequency division multiplexing*) que é uma técnica de transmissão conhecida por atuar em diversas tecnologias que utilizam altas transmissões de dados. Isso acontece pois ela permite alta transferências de dados, vídeo e robustez na transmissão. Essa técnica de transmissão de dados utiliza sua banda de operação dividindo seu sinal em múltiplas bandas portadoras ortogonais, chamadas subportadoras e que realizam a modulação seja ela QAM, PSK, FSK [8].

As subportadoras são ortogonais pois não possuem sobreposição em frequência, melhorando a resistência do sinal a multipercursos, aumentando a transmissão de dados e diminuindo a taxa de erro de bits. O princípio básico da OFDM é a conversão de um fluxo de dados que seria transmitido em série em múltiplos sub-fluxos paralelos de taxa de transmissão baixa. Por exemplo, um conjunto de símbolos seriais é transformado em um símbolo OFDM, representando dados em paralelo. Após a conversão serial-paralelo, cada sub-fluxo de dados é modulado em uma subportadora. Esse processo é ilustrado na Figura 1.

Inicialmente a técnica de OFDM foi criada para combater os multipercursos, um grande problema encontrado nos diversos canais de comunicação. Todavia, também apresentou vantagens de aumento da transmissão de dados, maior resistência a condições do canal de transmissão, interferência entre símbolos, etc.

2.1.4 Recursos avançados para aprimoramentos de desempenho

A padronização IEEE 802.16 que define o WiMAX determina vários recursos avançados opcionais para a melhoria do desempenho do sistema. Entre os mais importantes desses recursos

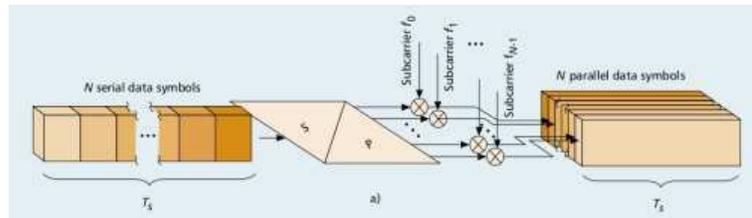


Figura 1: OFDM
 Fonte: [8]

avançados estão o suporte para técnicas de múltiplas antenas, aplicação de antenas inteligentes e reutilização de frequência aprimorada [8]. Com relação as técnicas de múltiplas antenas no qual o sistema WiMax suporta, pode-se destacar a diversidade de transmissão, varredura de feixes (*beamforming*) e a multiplexação espacial.

Dentre essas técnicas, destaca-se o *beamforming* que é baseado em uma antena inteligente que possibilita a formação de diferentes feixes defasados resultando em uma variação no diagrama de irradiação do sistema. Sendo assim, essa técnica pode melhorar o desempenho do sistema de comunicação com melhorias significativas na área de cobertura, maior capacidade e confiabilidade, tornando o sinal mais robusto e diretivo.

O WiMAX também suporta multiplexação espacial, onde múltiplos fluxos independentes são transmitidos através de múltiplas antenas. Em vez de aumentar a diversidade, neste caso, várias antenas são usadas para aumentar a taxa de dados e capacidade do sistema.

2.1.5 Aplicações

O objetivo do WiMax é fornecer uma conexão com alta velocidade em uma área de vários quilômetros. Em geral, essa tecnologia proporciona velocidades de transmissão de até 100 Mbits/s em áreas extensas de até 60 quilômetros [1].

A tecnologia de acesso sem fio WiMax é regulamentada pela IEEE 802.16 e oferece um acesso a banda larga e grandes distâncias, chegando a dezenas de quilômetros, sendo esse o grande diferencial dessa conexão para a Wi-Fi. Além disso, outro fator importante é a maior mobilidade presente no WiMax com possibilidade de aplicações em redes móveis e com maior alcance. A Figura 2 ilustra a relação entre velocidade e mobilidade para Wi-Fi, WiMax e redes móveis GSM.

Uma das aplicações possíveis do WiMax está em cobrir a área do 'último quilômetro' (*last mile*), atendendo demandas que não são cumpridas com as tecnologias sem fio clássicas, justamente por conta do seu alto alcance [8]. Esse exemplo ilustra a necessidade da comunicação possuir o maior alcance possível para garantir a integridade do sinal na comunicação e por isso que nas literaturas normalmente se desenvolvem antenas com a tecnologia do *beamforming* pois permite aumentar a diretividade da antena, como será explicado na seção seguinte. A Figura 3 ilustra um ambiente que utiliza a tecnologia WiMax.

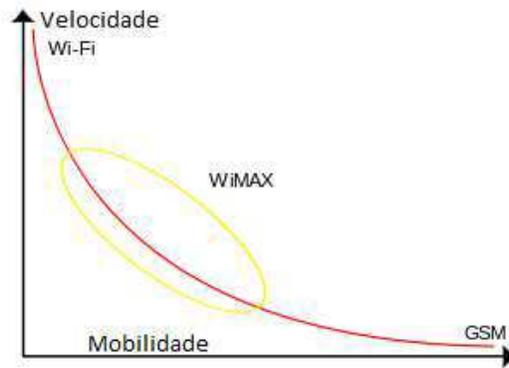


Figura 2: Relação entre velocidade de transmissão e mobilidade.

Fonte: **Autor**

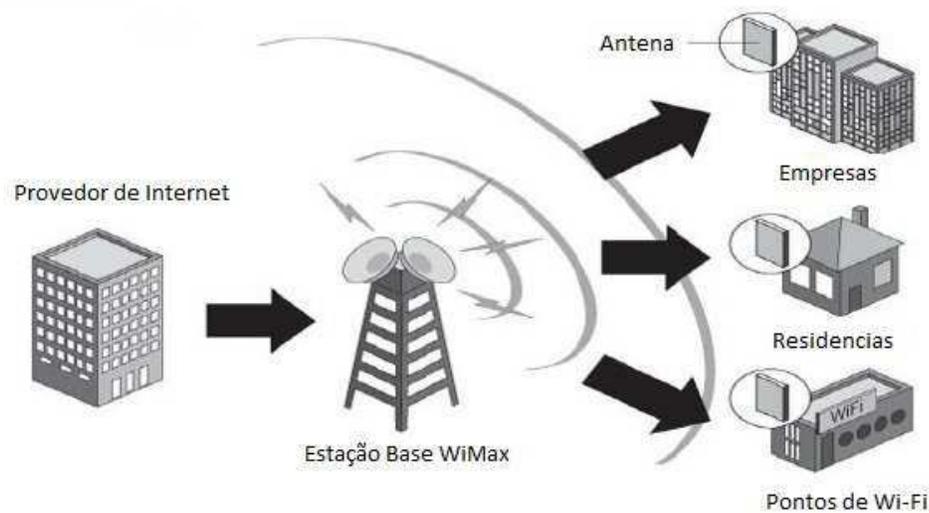


Figura 3: Topologia genérica de uma rede WiMax.

Fonte: **[8] (Adaptado)**

2.2 Teoria de antenas

Uma antena pode ser definida como um dispositivo metálico que permite a irradiação e recepção de ondas de rádio [2], ou seja, esses dispositivos representam a transição entre uma estrutura física e o espaço livre em uma transmissão de informação.

Existem, na indústria, inúmeros tipos de antenas para diferentes aplicações, dependendo das características de funcionamento de cada uma. Dentre elas, pode-se citar, por exemplo, as antenas de fio (dipolo, monopolo), de abertura (cornetas piramidais, cônicas e retangulares), refletoras e as antenas planares (microfita) [2]. A Figura 4 ilustra alguns tipos de antenas.

Neste trabalho será realizado o estudo e utilização das antenas planares pois possuem características vantajosas como a facilidade de fabricação, baixo custo e fácil modelagem [14], além de características de ganho e diretividade que servirá para a aplicação em uma rede WiMax.

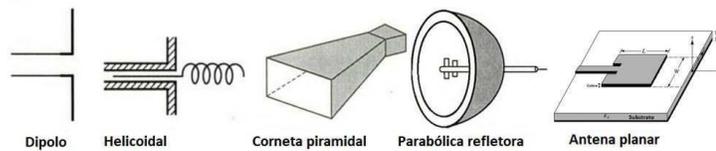


Figura 4: Exemplos de antenas

Fonte: www.electronicshub.org (Adaptado)

2.2.1 Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena é uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de irradiação eletromagnética de uma antena [2]. Para representar essas propriedades é necessário realizar os cálculos a partir uma distância mínima para a antena, chamada de campo distante que depende das dimensões e tipo de antena utilizada.

Normalmente, o espaço que envolve uma antena qualquer é dividido em três regiões: região do campo próximo reativo, região de campo próximo radiante e região de campo distante da antena (região de Fraunhofer) [1]. Os principais estudos com antenas são realizados na região de campo distante pois é nesta zona que as distribuições de campo são transversais e a sua distribuição de fase independe das distâncias em que as medições são realizadas [10].

Com os cálculos realizados em campo distante é possível representar um diagrama de irradiação da antena em coordenadas polares que pode ser representado em 2D ou 3D, dependendo das características em que desejam-se analisar. A partir desse diagrama, é possível observar, por exemplo, a distribuição de potência no espaço, a formação de lóbulos de irradiação e a diretividade de uma antena, parâmetro importante que será discutido nas próximas seções. A Figura 5 ilustra um diagrama de irradiação bidimensional.

A distribuição de potência de uma antena é indicada pela formação de lóbulos de diferentes tamanhos: os lóbulos principais e laterais. O primeiro é aquele que contém a direção de máxima irradiação da antena e normalmente abriga a maior parte da potência transmitida pela antena. Os lóbulos laterais apresentam valores de potência irradiada menores e podem ou não ser desejados em um diagrama de irradiação a depender da aplicação envolvida. Para o diagrama da Figura 5, observa-se um diagrama de irradiação bidimensional com lóbulo principal em 0° , lóbulos laterais nos ângulos de 90° , 180° e 270° .

Outro parâmetro importante encontrado no diagrama de irradiação é a largura de feixes, definido como a distância angular entre dois pontos com o mesmo valor de potência e em lados opostos do diagrama [6]. Essa distância permite analisar dois tipos de largura de feixe específicas que determinam certas características da antena: Largura de Feixe de Meia Potência (LFMP) e Largura de Feixe Entre Nulos (LFEN).

Pode-se observar que a **LFMP** é definida como a distância angular entre os dois pontos em que a intensidade de radiação é igual a metade da intensidade máxima, no lóbulo principal. Já a **LFEN** indica a distância angular do lóbulo principal, uma vez que representa o ângulo entre os dois primeiros nulos do diagrama [10]. Esses parâmetros são importantes na determinação da característica de diretividade que será exposta a seguir. As duas características citadas estão expostas na Figura 6.

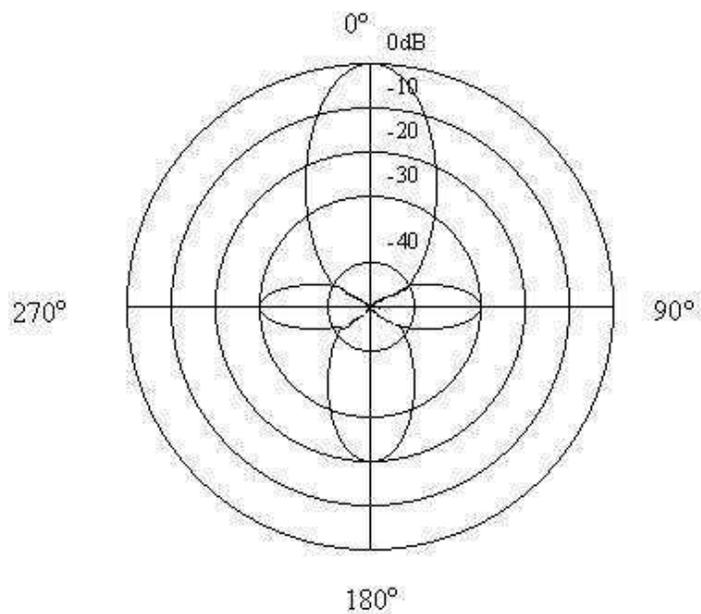


Figura 5: Exemplo de diagrama de irradiação bidimensional

Fonte: www.gta.ufrj.br

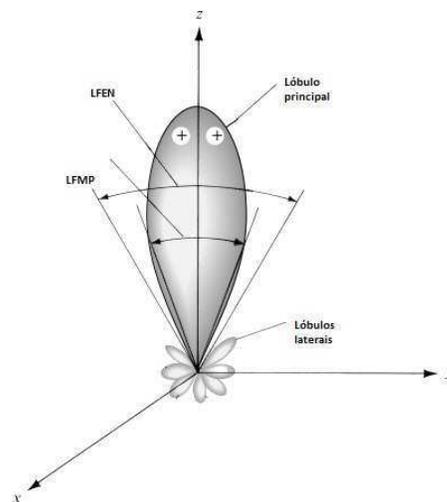


Figura 6: Largura de feixes de um diagrama de irradiação

Fonte: [2] (Adaptado)

2.2.2 Diretividade

Segundo o IEC (*International Electrotechnical Commission*), diretividade é definida como a razão entre a intensidade de irradiação de uma antena em uma dada direção da antena e a intensidade de irradiação média, onde a intensidade de irradiação média é igual a potência total irradiada pela antena dividida por 4π . Matematicamente, temos que:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

A diretividade é um parâmetro importante para a caracterização das antenas com relação a sua Largura de Feixe entre Nulos (LFEN), ou seja, a direção em que a antena está irradiando com o maior intensidade de potência. Existem basicamente três classificações gerais com relação aos diagramas de irradiação para diferentes antenas: isotrópicas, direcionais e omnidirecionais.

Um irradiador isotrópico é uma antena teórica (pois não é possível ser realizada), sem perdas e que possui a mesma intensidade de irradiação em todas as direções, diretividade igual a 1 ou 0 dB. Uma antena direcional tem a propriedade de irradiar sinais de rádio mais eficientemente em determinada direção de propagação, já a antena omnidirecional possui diagrama não direcional em um dado plano e um diagrama diretivo no plano ortogonal àquele [2].

A Figura 7 exemplifica 3 diagramas de irradiação, percebe-se que a curva vermelha é proveniente de uma antena mais diretiva do que as demais, pois apresenta um lóbulo principal com distância angular menor. Uma das aplicações para antenas direcionais é a comunicação para longas distâncias como a tecnologia WiMax abordada anteriormente.

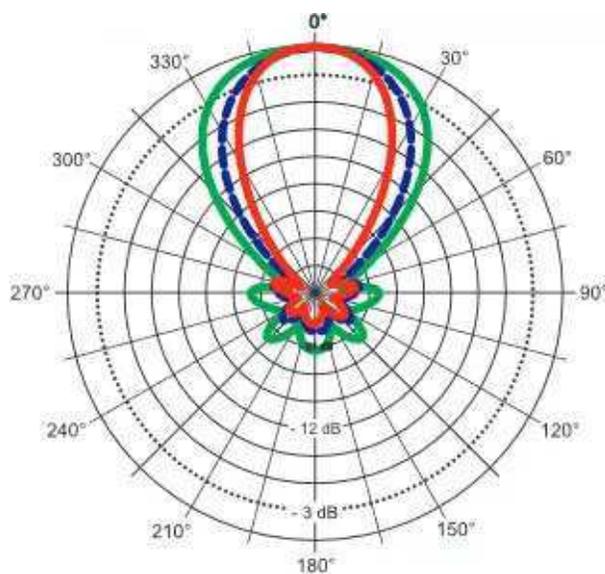


Figura 7: Diagramas de irradiação de antenas diretivas

Fonte: www.editorsean.com

2.2.3 Eficiência da antena

As antenas não são sistemas ideais e possuem perdas que normalmente são ocasionadas ainda na sua estrutura, proveniente de diferentes razões: perdas ôhmicas, dielétricas, por reflexão. Essas perdas são estimadas a partir de diferentes tipos de eficiência, listados a seguir:

- Reflexões causadas por descasamento de impedância entre a linha de transmissão e a antena: Eficiência de reflexão (e_r);
- Perdas de transmissão ($I^2 R$): em condutores (e_c) e dielétricos (e_d).

Em geral, caracteriza-se a eficiência total de uma antena (e_0) aquela que considera os diferentes tipos de eficiência e pode ser descrita como:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2)$$

2.2.4 Ganho

Um dos parâmetros de maior importância para avaliação dos resultados e características de uma antena é o ganho. Define-se o ganho como a razão entre a intensidade de irradiação em uma direção e a intensidade de irradiação que seria obtida se a potência da antena fosse irradiada isotropicamente [2]. A expressão 3 descreve matematicamente o ganho de uma antena.

$$G = 4\pi \frac{U}{P_{irr}} = 4\pi \frac{U}{e_0 P_{ent}} \quad (3)$$

Se unirmos as equações 1 e 3 na expressão 4 a seguir, observamos que o ganho relaciona-se com a diretividade com um parâmetro de proporcionalidade, a eficiência total da antena descrita anteriormente. Dessa maneira, tanto o ganho como a diretividade descrevem o comportamento de irradiação no espaço de uma antena e auxiliam na escolha de determinada antena para uma aplicação específica [1].

$$G = e_0 D \quad (4)$$

2.2.5 Parâmetros de espalhamento (S)

Em micro-ondas, dificilmente as análises serão em termos de tensão e corrente como são realizadas para as frequências mais baixas. Isso acontece pois essas medições são realizadas através das magnitudes e fases das ondas em transmissão e a aquisição desses dados não é trivial. Para solucionar isso, utilizam-se as medições de impedâncias e admitâncias do sistemas para avaliação dos resultados e a partir dessas medições iniciais, utilizando os conceitos de onda incidente, refletida e transmitida a matriz dos parâmetros de espalhamentos é construída [10].

Sendo a_x e b_x as amplitudes complexas normalizadas das ondas incidentes e refletidas em um DUT (Dispositivo sob testes) como exposto na Figura 9b, para um quadripolo as ondas incidentes e refletidas se relacionam de acordo com a matriz de espalhamento S, composta pelos elementos S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} , como ilustra a expressão 5.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Os parâmetros da matriz de espalhamento trazem informações importantes de como o sistema se comporta. Os itens a seguir descrevem cada um desses coeficientes separadamente:

- S_{11} : coeficiente de reflexão na porta 1 (entrada);
- S_{21} : coeficiente de transmissão direto (da entrada, porta 1, para a saída, porta 2);
- S_{22} : coeficiente de reflexão na porta 2 (saída);
- S_{12} : coeficiente de transmissão reverso (da saída, porta 2, para a entrada, para a porta 1).

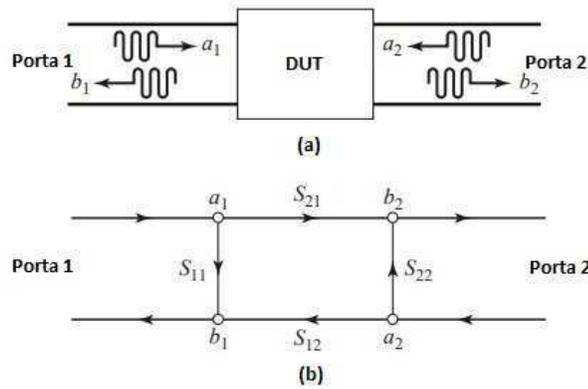


Figura 8: Dispositivo sob testes - Ondas incidentes e refletidas

(a) Componentes de reflexão e transmissão em um DUT

(b) Parâmetros de espalhamento (S)

Fonte: [10] (Adaptado)

Cada um dos parâmetros de espalhamento relaciona-se com as ondas incidentes e refletidas no quadripolo, como indicado nas expressões da equação 6.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}; S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}; S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}; S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (6)$$

2.3 Técnica de varredura de feixes

A varredura de feixes, ou *beamforming*, é uma técnica de processamento de sinais utilizada em sensores e arranjos de antenas para recepção ou transmissão de sinais. O princípio básico de um dispositivo que possui essa característica é utilizar interferências construtivas e destrutivas para fornecer uma potência máxima em determinada direção, de tal forma que essa direção possa ser controlada pelas entradas do sistema [3].

O *beamforming* baseia-se na utilização de antenas inteligentes e arranjos de antenas, além de algoritmos de processamento de sinais para ponderar o sinal de cada elemento da antena, suprimir interferências de outros usuários e calibrar o sinal útil. Dessa forma, a varredura de feixes pode melhorar o desempenho do sistema de comunicação sem fio, com o aumento da cobertura, melhoria na taxa de erros de bit (BER) e aumento da taxa de transferência [5].

Além disso, a tecnologia dos sistemas de antenas adaptativas (AAS) também introduz um novo processamento de domínio espacial para transmissão e recepção direcional e pode acompanhar o estado em terminais de comunicações móveis [7]. Dentre as diversas aplicações disponíveis para a técnica de *beamforming*, exemplificam-se as redes móveis 5G, conexões em Wi-Fi e, como já mencionada anteriormente, o WiMax.

Existem diversas técnicas para executar os sistemas de antenas adaptativas tais como: escaneamento de sinais, arranjos de estruturas com fase variável e técnicas de comutação de feixes (Matriz de Butler e Matriz de Bless) [11]. A técnica utilizada para a execução da varredura de feixes neste trabalho foi a de comutação de feixes com utilização da Matriz de Butler.

2.4 Matriz de Butler

A matriz de Butler foi introduzida primeiramente por Jesse Butler e Ralph Lowe em 1961 e trata-se de um dispositivo com N entradas e N saídas que, dependendo da entrada que está sendo alimentada, a irradiação eletromagnética seguirá uma determinada direção de orientação [9].

Essa estrutura é conhecida pela sua fácil implementação, baixo custo e por apresentar resultados positivos com relação às características de *beamforming* apresentadas na seção anterior [13]. Ela é composta basicamente por 4 elementos: acoplador híbrido, *crossover*, defasador de fase e linhas de transmissão.

O número de elementos necessários para construção da matriz e as possibilidades de rotação do feixe de irradiação são determinados pelo valor de N , ou seja, a quantidade de entradas e saídas do sistema.

Para uma Matriz de Butler com 4 entradas e 4 saídas ($N = 4$), serão utilizados 4 acopladores híbridos, 2 *crossovers* e 2 defasadores de 45° . Além disso, serão 4 combinações de diagramas de irradiação formados. As diferenças de fase entre as portas de saída e de entrada para essa estrutura estão ilustradas na tabela 2 [16].

Saída/Entrada alimentada	Porta 1	Porta 2	Porta 3	Porta 4
Porta 5	135	45	90	0
Porta 6	90	180	-45	45
Porta 7	45	-45	180	90
Porta 8	0	90	45	135
Diferença de fase	-45	135	-135	45

Tabela 2: Diferenças de fases entre saídas para uma matriz de Butler 4x4

A tabela 2 ilustra que, por exemplo, para a porta 1 sendo alimentada, as saídas (portas 5 a 8) devem possuir diferença de fase de -45° , ou seja, as fases das saídas [O5 O6 O7 O8] devem estar defasadas de [135° 90° 45° 0°] da entrada I1 para que o fenômeno de *beamforming* aconteça.

A estrutura de uma Matriz de Butler 4x4 está ilustrada na Figura 10, com destaque para as quatro entradas (I_1, I_2, I_3, I_4) e quatro saídas (O_1, O_2, O_3, O_4), acopladores híbridos de 3 dB, *crossovers* e defasadores de fase de 45° . Cada um dos elementos da matriz serão descritos detalhadamente nas próximas seções.

2.5 Componentes da Matriz de Butler 4x4

2.5.1 Acoplador Híbrido de 3dB

Acopladores híbridos, ou direcionais, são dispositivos utilizados em comunicações RF e micro-ondas na combinação ou divisão de sinais de entrada e saída. Esses sistemas são utilizados para0, realizar a divisão do sinal de entrada (porta 1) entre as portas de saída (2 e 3). A porta 4 é isolada da entrada e, para um acoplador ideal, nenhum sinal deve aparecer nela, entretanto, na prática, uma pequena porção do sinal retorna para essa porta [4].

Os acopladores híbridos de 3dB são estruturas de 4 portas que defasam os sinais de saída (portas 2 e 3) em 90 graus com relação a entrada (porta 1). Além disso, idealmente, o sinal de entrada aplicado será igualmente distribuído entre as saídas, ou seja, a potência de saída em cada uma das portas de

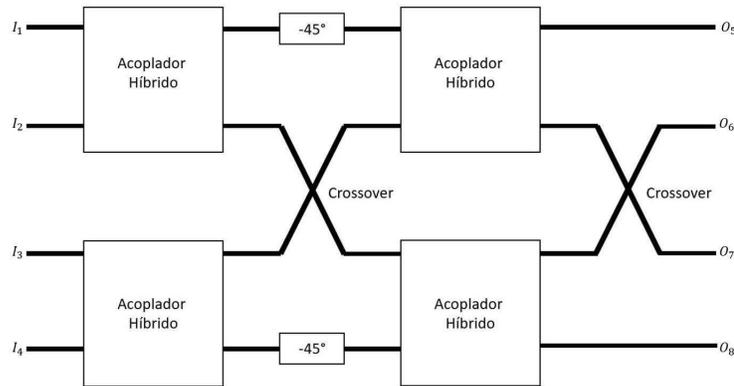


Figura 10: Matriz de Butler 4x4

Fonte: **Autor**

saída será igual a metade da potência de entrada ou, em escala logarítmica, $S_{12} = S_{13} = -3dB$. A porta 4 estará isolada das demais ($S_{14} = -\infty dB$) [13].

Essas estruturas são modeladas utilizando linhas de transmissão com impedâncias características Z_0 e $Z_0/\sqrt{2}$, além disso as distâncias entre as linhas devem ser iguais a $\lambda/4$. A Figura 11 ilustra um acoplador direcional de 3dB e identifica essas variáveis.

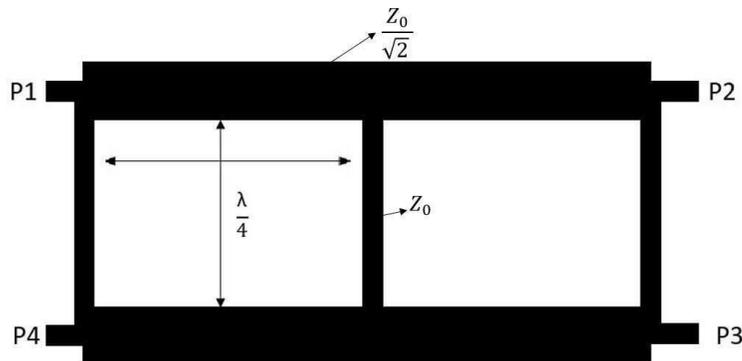


Figura 11: Acoplador híbrido de 3dB

Fonte: **Autor**

2.5.2 Crossover

Um *crossover* é uma estrutura que é utilizada quando ocorre o cruzamento entre duas linhas de transmissão e deseja-se realizar o isolamento entre elas [13]. Esses dispositivos são importantes na matriz de Butler pois ocorre uma interseção entre duas linhas da matriz, como observado na Figura 10.

A característica principal do *crossover* é o isolamento entre as portas adjacentes e a transmissão total do sinal entre as portas diagonais, ou seja, sendo a porta 1 de entrada do sinal, ele será transmitido em sua totalidade para a porta de saída 3 ($S_{13} = 0dB$), enquanto as portas adjacentes estarão isoladas ($S_{14} = S_{12} = -\infty dB$) [15].

A modelagem dessa estrutura é realizada a partir da união de dois Acopladores Híbridos vistos na seção anterior. Dessa maneira, as dimensões equivalem àquelas descritas anteriormente e estão especificadas na Figura 12.

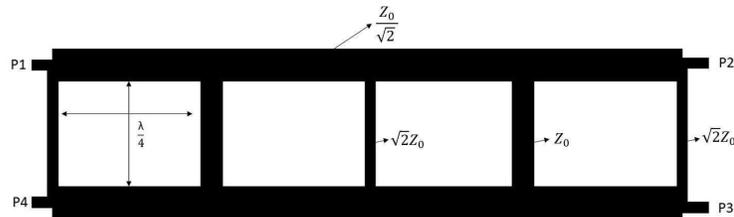


Figura 12: *Crossover*

Fonte: **Autor**

2.5.3 Defasador de 45°

Para garantir o bom funcionamento da matriz de Butler com relação a defasagem é necessário a implantação de um defasador de fase de 45° na estrutura que possui objetivo principal, como o nome sugere, defasar o sinal de saída em 45° com relação à entrada e idealmente $S_{12} = 0dB$, ou seja, deseja-se que não se tenha perdas entre a entrada e a saída do instrumento. Existem diversas técnicas para modelar um defasador de fases e a Figura 13 ilustra o defasador utilizado no projeto.

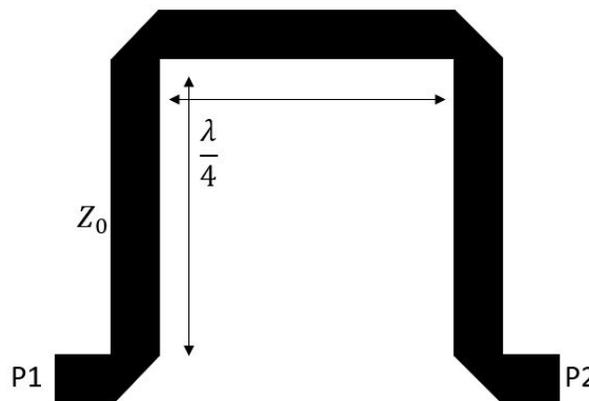


Figura 13: Defasador de 45°

Fonte: **Autor**

2.6 Antena planar

Antenas planares, ou antenas de microfita, são estruturas de cobre impressas em circuito impresso (PCB) em um substrato que possuem características de irradiação de sinais eletromagnéticos. Elas estão sendo extremamente utilizadas nos últimos anos devido às características de facilidade de modelagem, baixo custo de fabricação e características de ganho e diretividade satisfatórias [2].

Essas estruturas podem assumir formas geométricas variadas: quadradas, retangulares, circulares, elípticas, triangulares, anelar, etc. A Figura 14 ilustra uma antena planar retangular impressa em substrato.

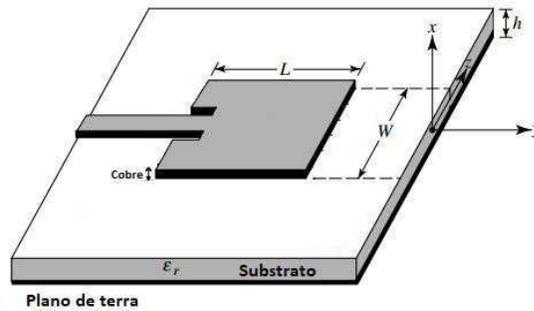


Figura 14: Antena de microfita

Fonte: [2] (Adaptado)

O objetivo deste trabalho é criar uma antena planar retangular que atue a 5,8 GHz com boas características de ganho e diretividade que, uma vez acopladas na matriz de Butler, irá aumentar o ganho total do sistema, tornando viável a estrutura total da antena inteligente.

3 Projeto da antena inteligente

Como mencionado anteriormente, a Matriz de Butler é uma estrutura para a realização da varredura de feixes sendo composta basicamente pelos elementos Acoplador Híbrido, *crossover* e defasador de fases. Cada elemento foi simulado individualmente utilizando o *software* ANSYS® HFSS para realizar a validação e em seguida todos foram unidos para formar a matriz de Butler.

O substrato utilizado nas simulações foi o **FR4** que possui espessura de 1,52 mm, permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$. Para a impressão das linhas de transmissão no substrato utilizou-se a espessura do cobre igual a 0,035mm.

Nessa seção do relatório serão descritos os métodos de modelagem utilizados, dimensões otimizadas e resultados obtidos para cada estrutura, bem como os resultados finais da antena inteligente.

3.0.1 Acoplador Híbrido de 3dB

O acoplador híbrido é a estrutura principal da matriz de Butler, além de ser o elemento em maior número. O resultado esperado, como mencionado anteriormente, é a divisão igual do sinal de entrada (Porta 1) entre as portas de saída (2 e 3), ou seja, os parâmetros de espalhamento devem ser aproximadamente $S_{12} = S_{13} = -3dB$ e as portas 1 e 4 devem estar isoladas, portanto $S_{11} = S_{14} < -20dB$. Além disso, as saídas devem estar defasadas em 90° .

A Figura 15 contém as dimensões da estrutura simulada do acoplador híbrido 3dB.

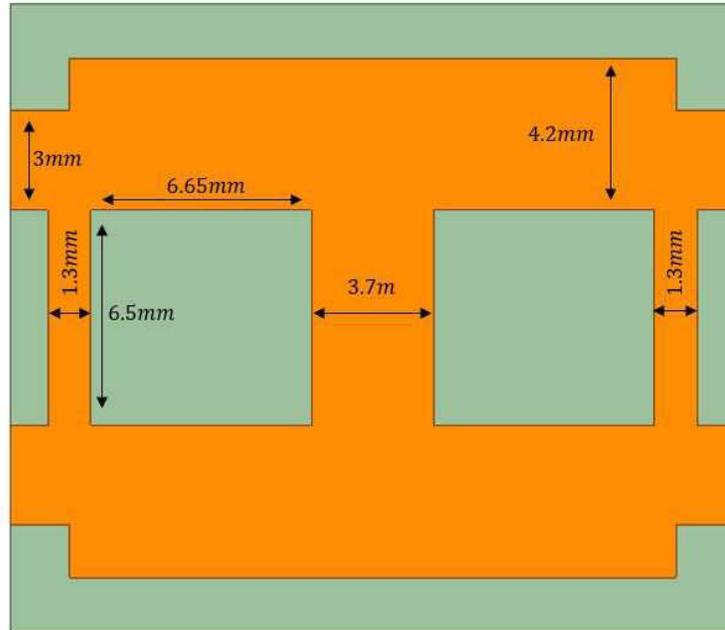


Figura 15: Acoplador híbrido 3 dB simulado

Fonte: **Autor**

Os parâmetros de espalhamento (S) em 5,8 GHz do acoplador híbrido estão ilustrados na Figura 16. Além disso, na Figura 17, a diferença de fase entre as portas 2 e 3 (subtração das fases de S_{12} e S_{13}) para a mesma frequência de operação é observada.

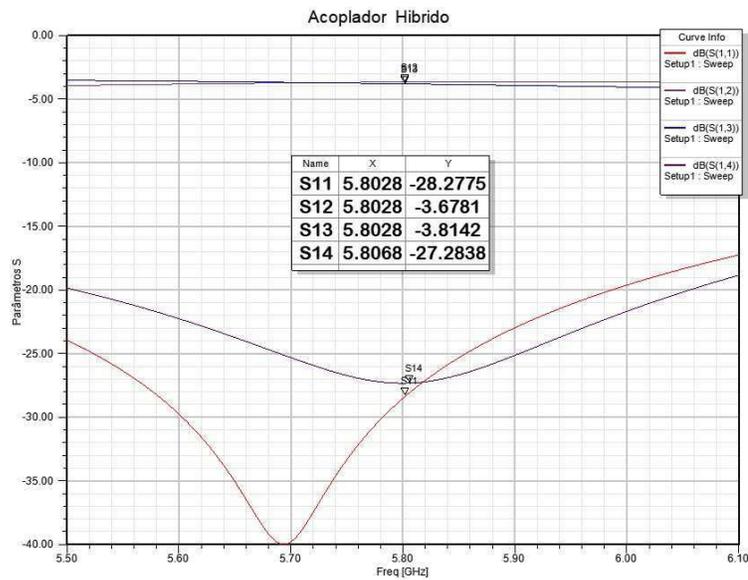


Figura 16: Acoplador Híbrido - parâmetros S

Fonte: **Autor**

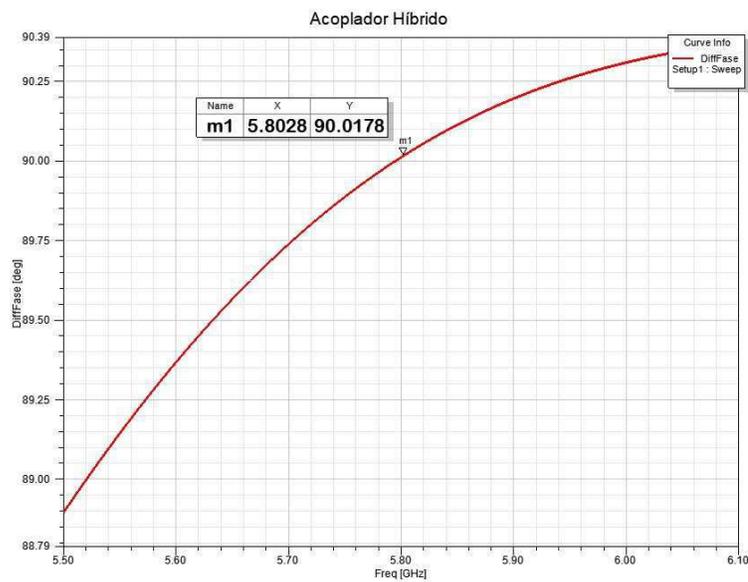


Figura 17: Acoplador Híbrido - defasagem entre as portas de saída

Fonte: **Autor**

Com a análise dos gráficos verifica-se que os valores de $S_{12} = -3,68dB$ e $S_{13} = -3,81dB$ são satisfatórios pois o valor ideal desses parâmetros é $-3dB$, muito próximo dos obtidos. Além disso, percebe-se que há pouca reflexão nas portas de entrada uma vez que os valores de S_{11} e S_{14} são muito baixos, $-28,27dB$ e $-27,28dB$, respectivamente. Essas diferenças encontradas entre os valores simulados e os valores ideais são aceitáveis e estão relacionadas com as perdas intrínsecas do condutor, imperfeições do substrato utilizado e possivelmente erros de cálculos (arredondamentos)

devido ao método numérico utilizado pelo *software*.

Na Figura 17, observa-se que as saídas estão em quadratura como foi visto na teoria. Com os resultados obtidos, o acoplador híbrido foi validado e sua estrutura, com as dimensões especificadas anteriormente, foi utilizada no projeto final da matriz de Butler.

3.0.2 Crossover

O *crossover* é modelado unindo dois acopladores híbridos e realizando otimizações. A resposta esperada para esse dispositivo é o isolamento das portas adjacentes $S_{12} = S_{14} < -20dB$ e o sinal de entrada (porta 1) deve ser totalmente transmitido para a porta diagonal, logo $S_{13} = 0dB$. A Figura 18 contém a estrutura com as dimensões de simulação.

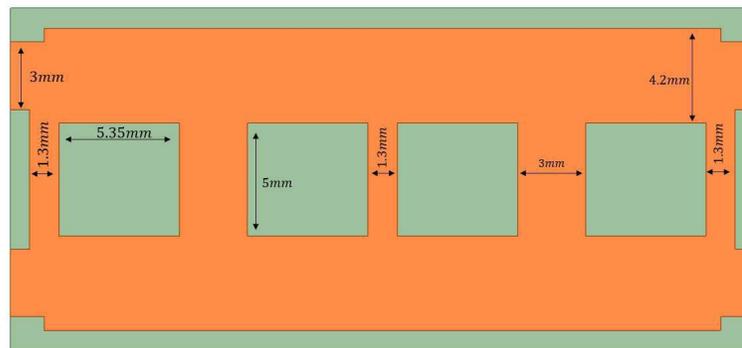


Figura 18: *Crossover* simulado

Fonte: **Autor**

A figura 19 demonstra os parâmetros S para 5,8 GHz do *crossover* modelado. Observa-se que as portas adjacentes e de alimentação estão isoladas do sinal de entrada pois $S_{12} = -23,37dB$, $S_{14} = -23,18dB$ e $S_{11} = -28,3dB$. Por fim, para validar o funcionamento da estrutura, verificou-se que ocorre a transmissão do sinal entre as portas 1 e 3 com poucas perdas ($S_{13} = -1,03dB$). As perdas calculadas no processo de transmissão são justificadas pelos mesmos motivos citados na seção do acoplador híbrido.

3.0.3 Defasador 45°

O terceiro elemento da matriz de Butler é um defasador de fase de 45°. Existem diversas estruturas na literatura para a modelagem de defasadores de 45° e, a partir do estudo das opções, foi desenvolvida a estrutura com as dimensões especificadas na Figura 20. Como o próprio nome já diz, para essa estrutura seu comportamento ideal é defasar o sinal de entrada em 45°, garantindo o mínimo de perdas possíveis.

O resultado obtido para o coeficiente de transmissão (S_{12}) dessa estrutura foi $-0,9617dB$ na frequência de 5,8 GHz e, além disso, a estrutura defasa o sinal de entrada em 45°, como esperado. As Figuras 21 e 22 são os gráficos que contém esses valores de simulação.

Para finalizar a estrutura, como veremos a seguir, foi necessário a modelagem de linhas de transmissão para conectar devidamente cada componente, optou-se, sempre que possível, utilizar linhas com comprimento de um quarto de comprimento de onda ($\frac{\lambda}{4}$). Além disso, uma estrutura

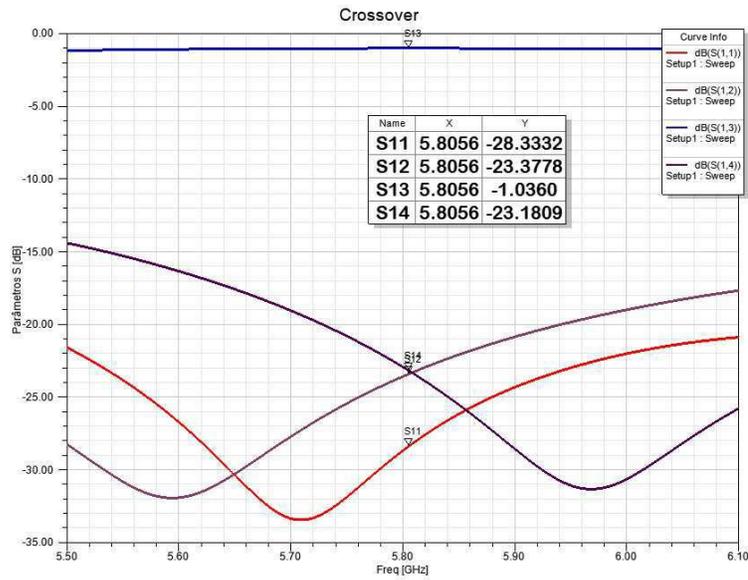


Figura 19: *Crossover* - Parâmetros S

Fonte: **Autor**

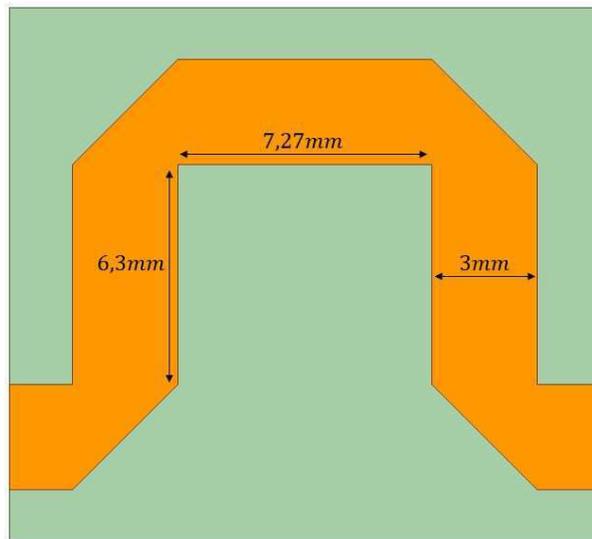


Figura 20: Defasador de fase 45°

Fonte: **Autor**

semelhante ao defasador de 45° foi criado, como mostra a Figura 23. Essa estrutura foi modelada para garantir que a linha de transmissão não realizasse nenhuma defasagem inapropriada no sinal e, como mostra a Figura 24, percebe-se que o objeto possui defasagem praticamente nula entre a entrada e saída na frequência de 5,8 GHz. As dimensões desse componente está presente na Figura 23.

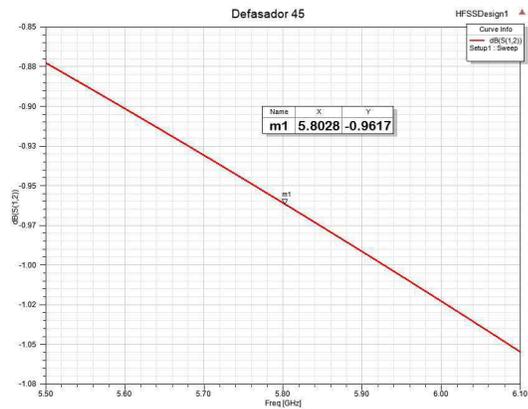


Figura 21: Defasador de fase 45° - Coeficiente de transmissão

Fonte: **Autor**

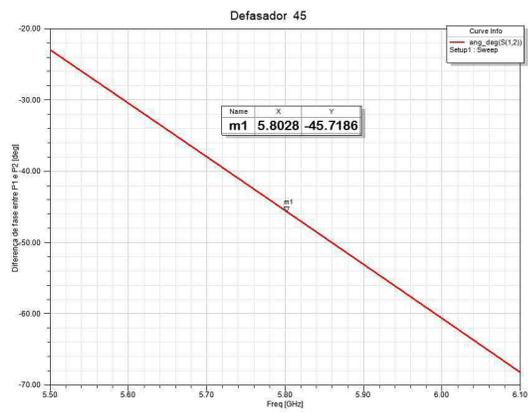


Figura 22: Defasador de fase de 45° em 5,8 GHz

Fonte: **Autor**

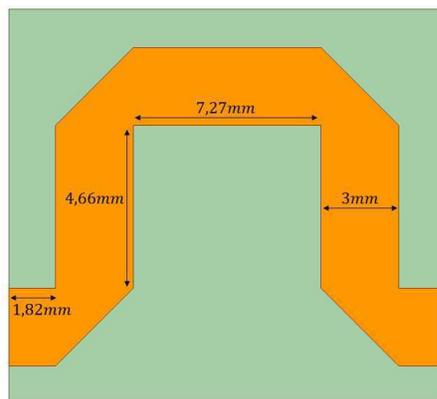


Figura 23: Dimensões da linha de transmissão sem defasagem

Fonte: **Autor**

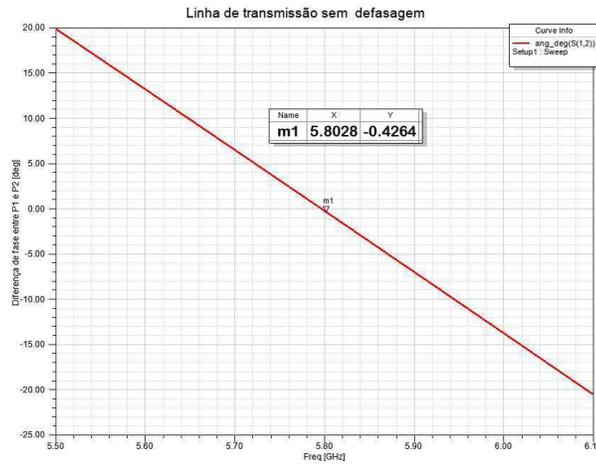


Figura 24: Linha de transmissão sem defasagem em 5,8 GHz

Fonte: **Autor**

3.1 Antena planar

Na seção anterior foi visto a importância da antena planar para o projeto de varredura de feixes: aumentar o ganho da estrutura da Matriz de Butler. Dessa forma, uma antena retangular com frequência de ressonância em 5,8GHz (operação da tecnologia WiMax) foi modelada de tal forma que fosse acoplada na estrutura geradora do *beamforming*. Como os elementos anteriores, realizou-se a simulação separadamente da antena para validação e nessa seção serão expostos os procedimentos de simulação da antena planar, bem como os resultados e dimensões da estrutura.

A antena retangular com frequência de ressonância 5,8 GHz foi modelada a partir do cálculo inicial das dimensões W (largura) e L (comprimento), utilizando as expressões abaixo [2].

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (7)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824h * \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)} \right) \quad (8)$$

onde,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(\frac{h}{W})}} \right] \quad (9)$$

A antena planar desenvolvida e suas dimensões estão ilustradas na Figura 25. O coeficiente de reflexão (S_{11}), representado na Figura 26, para a frequência desejada é igual a $-35,32dB$, a banda de operação ($S_{11} < -10dB$) é de aproximadamente 250 MHz. O ganho máximo da antena projetada é de $5,35dB$ e apresenta características próprias das antenas planares (antena pouco diretiva). O diagrama de irradiação da antena projetada é ilustrado na Figura 27.

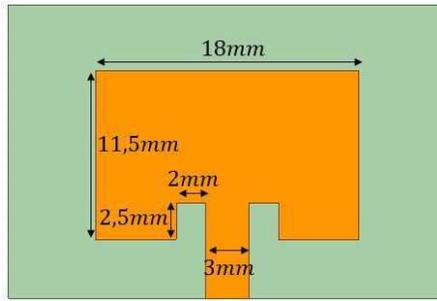


Figura 25: Antena planar projetada para 5,8 GHz

Fonte: **Autor**

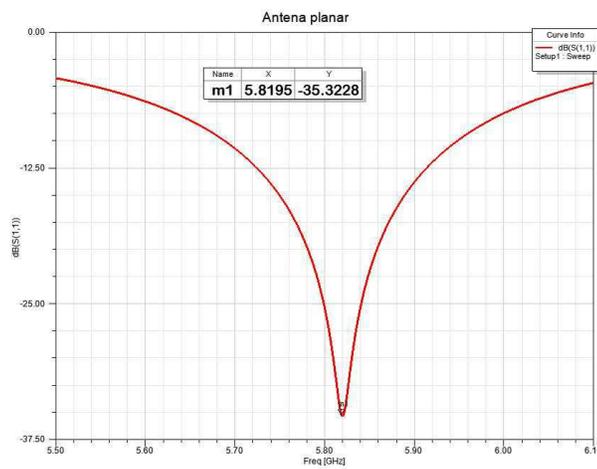


Figura 26: Antena planar - Coeficiente de reflexão

Fonte: **Autor**

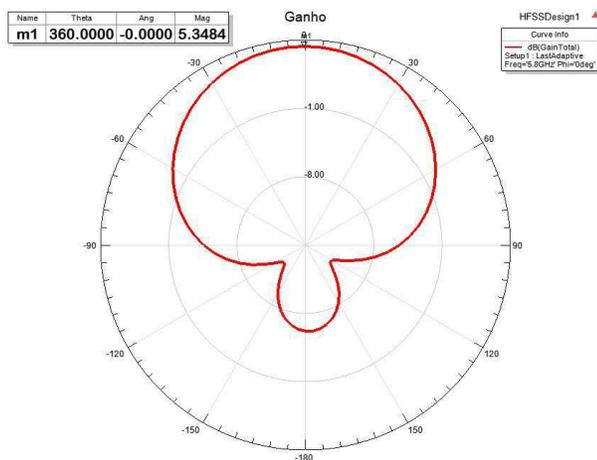


Figura 27: Antena planar - Diagrama de irradiação

Fonte: **Autor**

3.2 Conjunto para realização da varredura de feixes (*beamforming*)

Após a validação de resultados de cada estrutura, o conjunto para varredura de feixes foi montado. A imagem 28 ilustra a matriz de Butler composta por acopladores híbridos, *crossovers*, defasadores de 45° de fase, linhas de transmissão e antena planar retangular. A estrutura completa possui dimensões de 17 cm x 12 cm, o substrato e o cobre utilizados possuem espessuras 1,52 mm e 0,035 mm, respectivamente.

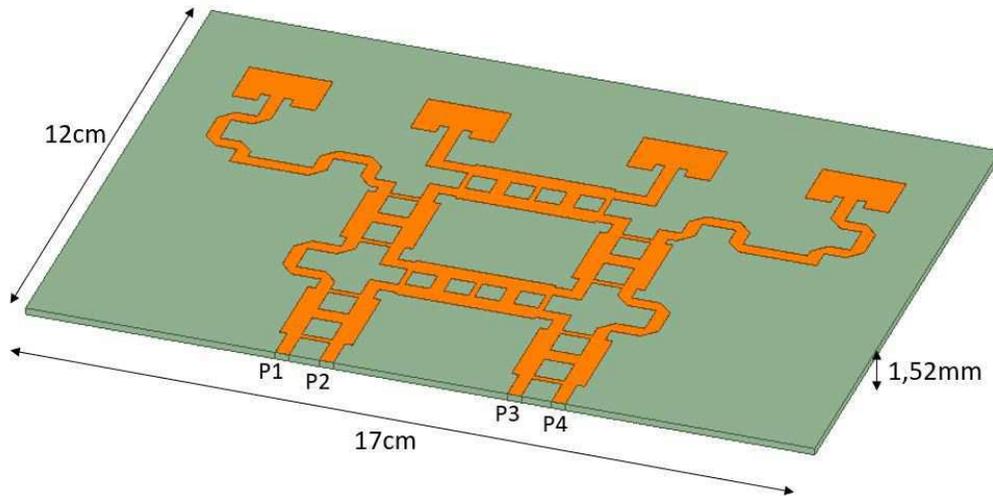


Figura 28: Matriz de Butler desenvolvida

Fonte: **Autor**

Os experimentos realizados para verificar a irradiação por varredura de feixes da estrutura consistiram em alimentar cada uma das portas de entrada por vez (P_1 , P_2 , P_3 , P_4) e analisar os diagramas de irradiação.

Todavia, inicialmente, foram verificados os parâmetros de espalhamento usando como referência a porta de entrada 1 (P_1) para estudar as perdas presentes no sistema. A Figura 29 ilustra os parâmetros S_{11} , S_{12} , S_{13} e S_{14} que representam o isolamento das demais portas de alimentação quando apenas a porta 1 está sendo alimentada. De maneira análoga, a Figura 30 apresenta os parâmetros S_{15} , S_{16} , S_{17} e S_{18} , ou seja, as perdas na estrutura entre a entrada e as saídas.

Os resultados obtidos foram satisfatórios pois foi demonstrado que as portas de entrada adjacentes da Porta 1 (que está sendo alimentada) estão isoladas, com parâmetros S bem abaixo do valor de transmissão. Além disso, as perdas da ordem de -12 dB presentes na Figura 30 são aceitáveis uma vez que trata-se de uma estrutura complexa, com muitas curvas e linhas de transmissão com espessuras diferentes.

Após a análise dos parâmetros de espalhamento, foram verificadas as defasagens das portas de saída com relação a entrada alimentada, utilizando-se como referência a Porta 1. A Figura 31 ilustra cada uma dessas defasagens nas saídas.

A partir da Figura 31, as defasagens de cada saída com relação a entrada alimentada foram projetadas em um círculo trigonométrico com objetivo de verificar as diferenças de fases entre as portas de saída, a Figura 32 ilustra essa projeção. O gráfico é composto por 5 pontos que

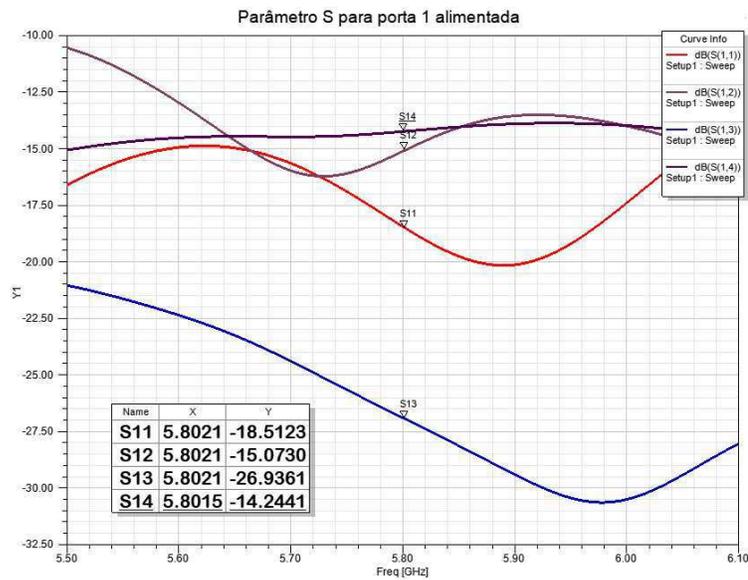


Figura 29: Matriz de Butler - Parâmetros de espalhamento das entradas

Fonte: **Autor**

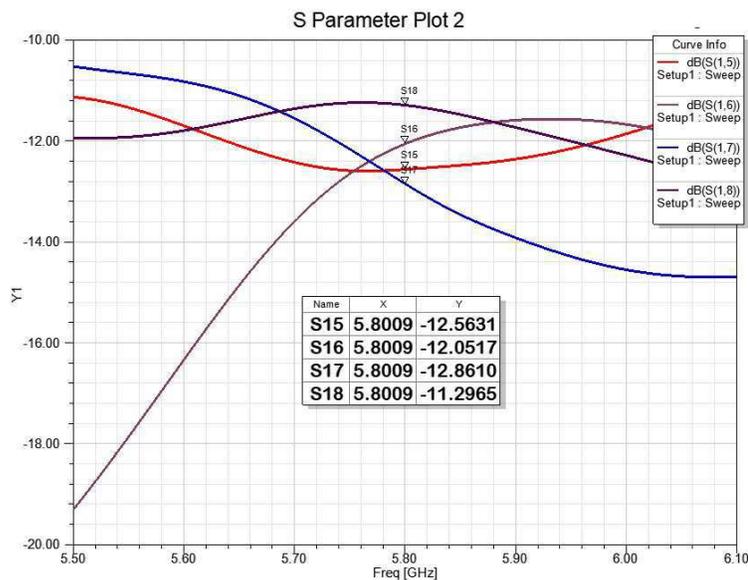


Figura 30: Matriz de Butler - Parâmetros de espalhamento das saídas

Fonte: **Autor**

representam o ângulo de cada uma das saídas (pontos coloridos no círculo trigonométrico) com relação a referência (porta 1, ponto preto na origem).

Sendo assim, utilizando os valores obtidos na Figura 31, as defasagens para as 4 portas de saídas, com relação a entrada, foi representada por cada ponto na Figura 32 e possuem os valores: $\angle S_{15} = 124,63^\circ$ (vermelha), $\angle S_{16} = -139,64^\circ$ (marrom), $\angle S_{17} = -58,50^\circ$ (azul) e $\angle S_{18} = 45,91^\circ$ (verde). A partir desses valores, a tabela 3 foi montada com as diferenças de fases entre cada

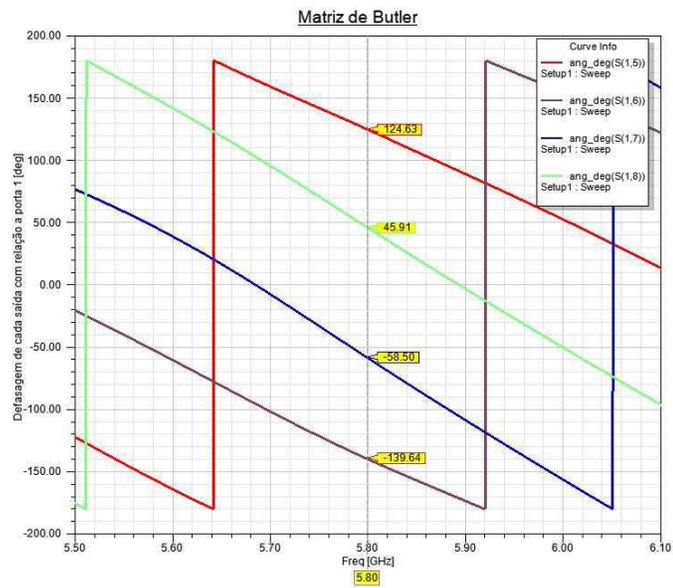


Figura 31: Defasagens de cada saída com referência na porta de entrada

Fonte: **Autor**

uma das portas adjacentes, onde, por exemplo, a diferença de fases entre as portas 5 e 6 é de $95,73^\circ$.

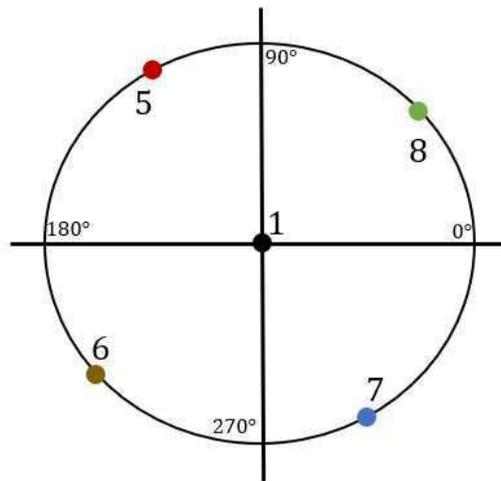


Figura 32: Gráfico polar das defasagens de cada saída com referência na porta de entrada

Fonte: **Autor**

A diferença de fase entre as portas de saída é um parâmetro importante para a validação do fenômeno de *beamforming*. O valor teórico para esse defasamento entre cada uma das saídas quando a porta 1 é alimentada é 45° , como visto na tabela 2 na seção 2.4.

Para o sistema proposto, os valores obtidos de diferença de fase são em torno de 90° de tal maneira que as portas adjacentes na estrutura irradiam com espaçamento entre fases aproximadamente igual, seguindo o comportamento teórico.

Portas	5	6	7	8
5	0	95,73°	-	78,72°
6	-95,73°	0	81,14°	-
7	-	-81,14°	0	104,41°
8	-78,72°	-	-104,41°	0

Tabela 3: Diferenças de fases entre saídas com a entrada 1 alimentada para uma matriz de Butler 4x4

Para finalizar a verificação da varredura de feixes através de uma matriz de Butler com antena planar acoplada, foram gerados os diagramas de irradiação do sistema para a alimentação de cada uma das 4 portas de entrada. As Figuras 33, 34, 35, 36 ilustram os diagramas de irradiação em 3D, em escala linear, com a alimentação sendo realizada em cada uma das quatro portas de entrada. A modificação de porta alimentada foi realizada no *software* HFSS e o procedimento encontra-se em anexo.

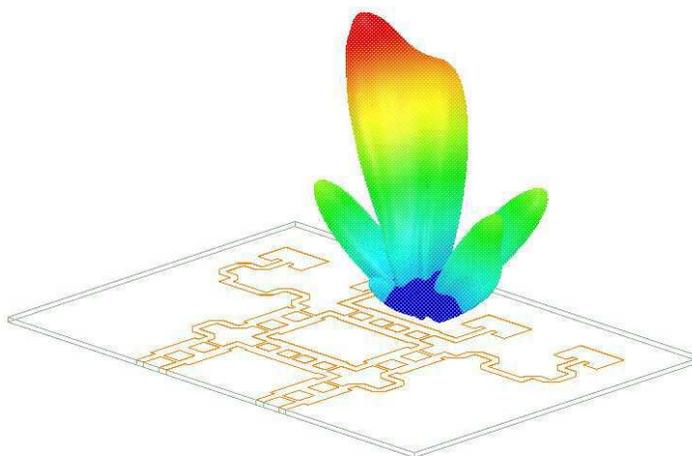


Figura 33: Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 1 alimentada

Fonte: **Autor**

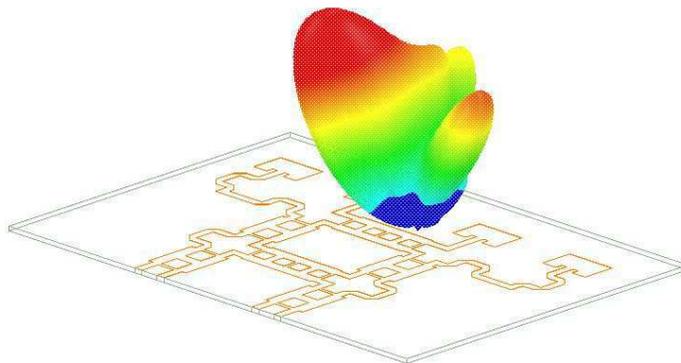


Figura 34: Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 2 alimentada

Fonte: **Autor**

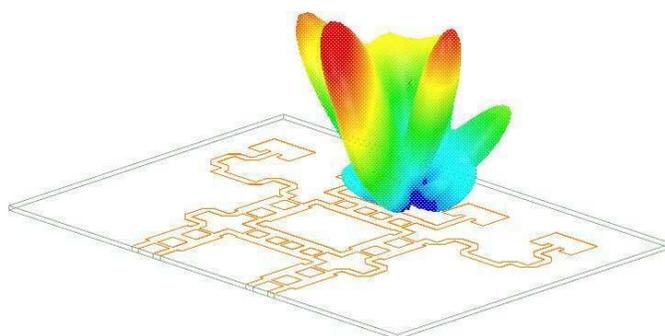


Figura 35: Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 3 alimentada

Fonte: **Autor**

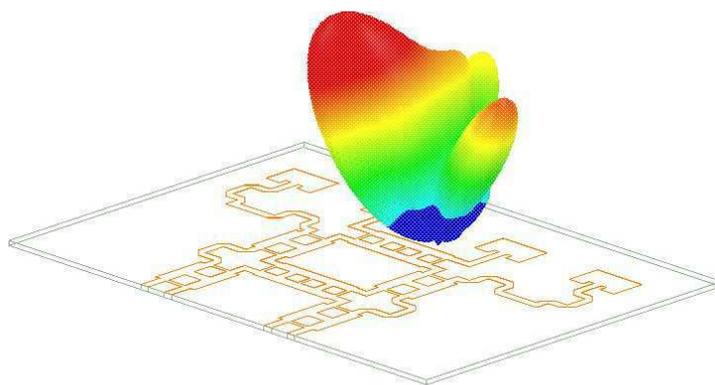


Figura 36: Diagrama de irradiação 3D do sistema com a porta 4 alimentada

Fonte: **Autor**

A partir dos diagramas de irradiação observados, foi verificado a modificação no diagrama de irradiação de acordo com a porta que está sendo alimentada e portanto valida-se a Matriz de Butler proposta como um sistema de varredura de feixes para a frequência de 5,8 GHz.

4 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

No trabalho desenvolvido foi realizado um estudo das redes WiMax móveis, fazendo a revisão bibliográfica do histórico da tecnologia, características de propagação, frequências de operação, recursos de desempenho e aplicações.

Também se discutiu os princípios relacionados a teoria de antenas, tipos, definições, características importantes, parâmetros de diretividade, eficiência da antena, ganho, parâmetros de espalhamento e diagramas de irradiação.

Ainda na revisão bibliográfica os conceitos de varreduras de feixes (*beamforming*), matriz de Butler e seus componentes, bem como o estudo sobre as características das antenas planares foram realizados.

Por fim, foi desenvolvido um sistema de antena inteligente para atuar na banda de operação do WiMax (5,8 GHz) composto por uma Matriz de Butler 4x4 e antena planar acoplada utilizando o software ANSYS [®] HFSS.

Os resultados de simulação foram validados com a metodologia de modelagem de cada etapa do sistema individualmente e verificação dos resultados. Sendo assim, um sistema de antena inteligente foi desenvolvido e os resultados de varredura de feixes observado no diagrama de irradiação foram interessantes, observando-se concordância entre as simulações realizadas e a teoria, finalizando, assim, o projeto de conclusão de curso.

Como sugestão de trabalhos futuros, podem-se destacar:

- Fabricação do protótipo com objetivo de comparar os resultados medidos com os simulados;
- Otimização do sistema para alcançar ganhos no diagrama de irradiação ainda maiores e diminuir as perdas na estrutura;
- Realizar modificações na estrutura para aumentar a banda de operação;
- Utilizar o conhecimento teórico do *beamforming* para produzir antenas inteligentes em outras faixas de frequência para diferentes aplicações como Wi-Fi e redes móveis da quinta geração;
- Realizar a modelagem para o controle de entradas para mapear a rotação do diagrama de irradiação.

5 Anexos

5.1 Modificação da porta alimentada no HFSS

Para sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), normalmente é necessário realizar o estudo da estrutura para a alimentação de diferentes portas, como utilizado no projeto da Matriz de Butler deste trabalho.

Para realizar esta tarefa no ANSYS HFSS, para portas do tipo *Lumped Ports*, basta seguir os seguintes passos:

- **HFSS** ⇒ **FIELDS** ⇒ **EDIT SOURCES**, como mostrado na Figura 37

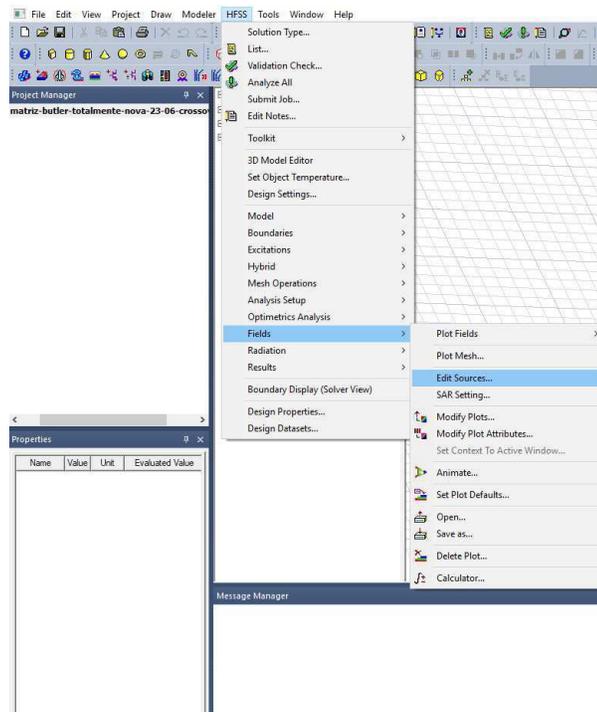


Figura 37: Primeiro passo para modificação de porta alimentada

Fonte: Autor

- Após selecionar **EDIT SOURCES**, a janela da Figura 38 irá aparecer. Para modificar a porta que está sendo alimentada, basta modificar o valor de **Magnitude** para 1 (porta ligada) ou para 0 (porta desligada).

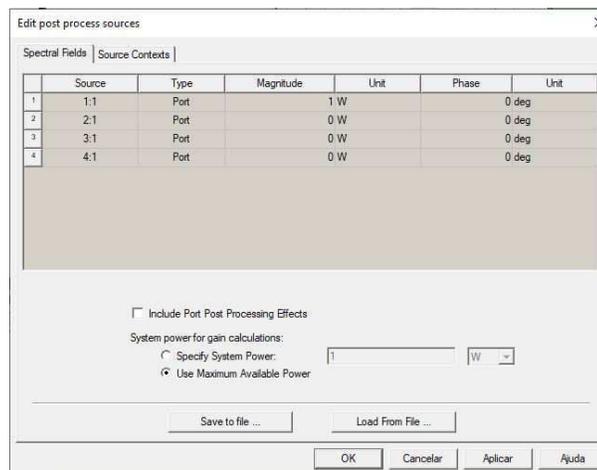


Figura 38: Segundo passo para modificação de porta alimentada

Fonte: Autor

Referências

- [1] R. T. A. Mathur. *Antenna and Wave Propagation*. Scientific Publishers, 2011.
- [2] C. A. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [3] A. Cesare-Herriau, T. Batut, A. Serres, S. Morais, and A. Ghiotto. Design of a butler matrix for switched beam application. In *2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018)*, pages 1--3, Dec 2018.
- [4] L. Chiu and Q. Xue. Wideband parallel-strip 90 hybrid coupler with swap. *Electronics Letters*, 44(11):687--688, May 2008.
- [5] S. Choi and D. Shim. A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a cdma mobile communication environment, *IEEE transactions on vehicular technology*. volume 49, pages 1793--1806, Dec 2000.
- [6] J. I. K. I. N. Howell. *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993), 2014.
- [7] W. X. Li, X. Liu, C. Feng, and P. Li. The research of beamforming in wimax system. In *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, volume 3, pages 915--917, Jan 2011.
- [8] J. G. A. A. G. R. Muhamed. *Fundamentals of WiMax - understanding broadband wireless networking*, volume 1. Pearson Education, Inc, 2007.
- [9] S. K. A. R. N.M. Jizat and T. Rahman. Dual band beamforming network integrated with array antenna. *Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation*, pages 2278--0882, 2010.
- [10] D. M. Pozar. *Microwave Engineering*. United States: Wiley, 2011.
- [11] M. M. Saiju Lukose. A study on various types of beamforming algorithms. *International Journal of Scientific Research Engineering and Technology (IJSRET)*, 2(9):2278--0882, mar 2016.
- [12] B. Sharma, I. , T. Maity, and P. Bhattacharya. An introduction to smart antenna system. 8, 12 2014.
- [13] A. B. R. Snehal Vijaykumar Kalam. Optimum design of 4x4 symmetrically structured butler matrix. *International Journal of Scientific Research Engineering and Technology (IJSRET)*, 5(1):2278--0882, 2016.
- [14] G. A. Stutzman, W. L.; Thiele. *Antenna Theory and Design.*, volume 1. John Wiley Sons, 2012.
- [15] J. Yao, C. Lee, and S. P. Yeo. Microstrip branch-line couplers for crossover application. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(1):87--92, Jan 2011.

- [16] F. Y. Zulkifli, N. Chasanah, Basari, and E. T. Rahardjo. Design of butler matrix integrated with antenna array for beam forming. In *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pages 1--4, Nov 2015.